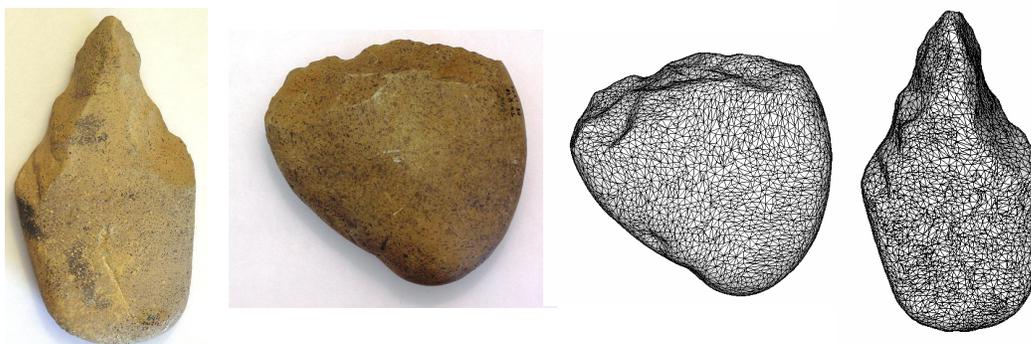


Numérisation 3D de Matériel Paléo- Anthropologique

Etat de l'Art et étude de faisabilité



Quentin BORDERIE

Rapport de stage de fin d'études

**Tuteurs : Patrice TORGUET
Henry de LUMLEY**



Nous voudrions remercier :

Messieurs Gérard SUBSOL et Bertrand MAFART du projet FOVEA, pour leur aide indispensable, leur disponibilité, leur sympathie et tous les conseils et les ouvertures sur l'avenir qu'ils ont pu nous offrir.

au CERPT :

Monsieur le professeur Henry DE LUMLEY, qui s'est montré disponible et nous a orienté dans le choix des acquisitions à réaliser,

Madame Anne Marie MOIGNE, pour son incomparable connaissance de paléontologiste,

Madame Véronique POIS, car, malgré son travail, elle nous a accueilli et aidé au sein du CERPT pendant notre séjour,

Madame Florence TOSCA, pour sa compréhension et sa patience,

Monsieur Gérard BATALLA, spécialiste de l'industrie lithique, qui a choisi pour nous les outils pertinents à scanner au laboratoire et dans le musée de Tautavel,

ainsi que Cyril, Frank, Julien, Tony, Pierre, Vincenzo, Nicolas, Adel, Hélène, Anne et Dinah.

à l'ENSEEIHHT :

Monsieur Bernard THIESSE, enseignant chercheur,

et Monsieur Vincent CHARVILLAT, enseignant chercheur,

à l'IRIT :

Monsieur Jean-Pierre JESSEL, professeur à l'Université Paul Sabatier,

Monsieur Patrice TORGUET, enseignant chercheur à l'UPS,

Monsieur Mathias PAULIN, enseignant chercheur à l'UPS,

Madame Véronique GAILDRAT, enseignant chercheur à l'UPS,

et Chaouki MAIZA, stagiaire DEA du projet SIAMA,

Messieurs Pierre PAYOUX de l'Université Paul Sabatier, Toulouse ; Arnaud VILLENAVE et Jérôme BARLET de la société Kallisto, Fonsorbes ; Robert VERGNIEUX et Loïc ESPINASSE de l'Institut Ausonius, Bordeaux, qui ont eu la patience et la gentillesse de scanner pour nous les deux moulages d'outils préhistoriques.

enfin :

Messieurs Gaspard GUIPERT et Hervé DELINGETTE ainsi que Madame Anne VIGOUROUX, et Maxime, Gueric, Joss, Seb, Pam, Marc, le You, Meuh, Alain et Jean, qui étaient présent, ou pas très loin, pendant ces cinq mois.

SOMMAIRE

I.	Introduction.....	6
1. 1.	Le projet FOVEA	6
1. 2.	L'IRIT	6
1. 3.	Numérisation 3D de Matériel Paléo- Anthropologique.....	6
II.	Etat de l'art	8
2. 1.	L'archéologie Virtuelle	8
2. 2.	Les travaux américains	8
2. 3.	Les systèmes de numérisation 3D	10
2. 3. 1.	L'acquisition passive :	10
2. 3. 2.	L'acquisition active :	10
III.	Numérisation 3D	12
3. 1.	Recherche de contacts	12
3.1.1.	Les institutions	13
3.1.2.	Les sociétés	13
3. 2.	Les outils paléolithiques	13
3.2.1.	Technologies lithiques	14
3.2.2.	Caractéristiques	15
3. 3.	Les différentes acquisitions.....	17
3.3.1.	Stéréophotographie.....	17
3.3.2.	Scanner Tomographique Médical (scanographe).....	25
3.3.3.	Scanner laser Cyberware.....	31
3.3.4.	Scanner laser portable Minolta.....	35
IV.	Comparaison qualitative et quantitative des résultats	41
4.1.	Méthodologie	41
4.2.	L'algorithmme ICP	41
4.3.	Scanalyze	42
4.4.	RapidForm	43
	Comparaison deux à deux.....	44
	Création d'un modèle moyen et comparaison	47
4. 5.	Bilan	50
V.	Etude de faisabilité	51
5. 1.	Le Centre de Recherches Préhistoriques de Tautavel	51
5.1.1.	Description	51
5.1.2.	Mission.....	51
5. 2.	Choix du système	52
5. 3.	Acquisition de moulages de sols	52
5.3.1.	Raisons.....	52
5.3.2.	Acquisition	52
5. 4.	Acquisition d'artefacts	53
5.4.1.	Raisons.....	53
5.4.2.	Acquisition	53
5. 5.	Acquisition in-situ	53
5.5.1.	Les fouilles archéologiques.....	53

5.5.2. Raisons.....	54
5.5.3. Déroulement.....	55
5. 6. Recalage.....	55
5.7. Bilan	56
VI. Conclusion	57
Organisation.....	57
Résultats	58
Poursuites	58
Perspectives personnelles	59
Bibliographie :	60
Introduction :	60
Archeologie Virtuelle :	61
Numérisation 3D :.....	61
Yav++ :.....	62
Stéréovision :	62
Scanographe médical :	63
Scanner laser :.....	63
Iterated Closest Point et recallage de prises de vues :	63

I. Introduction

1. 1. Le projet FOVEA

Créé en juin 2003, le projet de Fouille Virtuelle d'Environnement Paléo-Anthropologique (FOVEA) [FOVEA, 2004] [Guipert et al., 2003] est issu de la rencontre de deux personnes, de deux compétences : MM. Bertrand MAFART, paléo- anthropologue et Gérard SUBSOL, docteur en informatique, fixant ainsi les bases bidisciplinaires d'un ambitieux projet. Financé par le Programme Société de l'Information du CNRS pour une période de deux ans, FOVEA trouve des partenaires dans des institutions prestigieuses : le Département de Préhistoire du **Muséum National d'Histoire Naturelle** (FRE 2677) et le **Centre Européen de Recherches Paléontologiques de Tautavel** d'une part, l'équipe Synthèse d'Images et Réalité Virtuelle de l'**Institut de Recherche en Informatique de Toulouse** (UMR 5505) ainsi que le Projet EPIDAURE de l'**INRIA** de Sophia Antipolis d'autre part.

Les objectifs de FOVEA s'inscrivent au sein de la modélisation en trois dimensions d'un site de fouilles paléo-anthropologique (690 000 avant notre ère) : La Caune de l'Arago à Tautavel (Pyrénées Orientales). Objectifs pédagogiques : simulation de fouilles par outil informatique ; et scientifiques : restitution du contexte préhistorique composé du sous-sol du site, de l'environnement des fossiles et des fossiles eux-mêmes.

1. 2. L'IRIT

L'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, est une Unité Mixte de Recherche, UMR 5505, commune au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), à l'Institut

National Polytechnique de Toulouse (INPT), à l'Université Paul Sabatier (UPS) et à l'Université des Sciences Sociales Toulouse 1 (UT1).

L'équipe Synthèse d'Images et Réalité Virtuelle dans laquelle nous avons travaillé [JES 99], [TOR 99] fait partie d'un de ses trois départements : Informatique des Images, des Sons et du Texte ; les deux autres étant : Programmation, Systèmes et Algorithmes et, Intelligence Artificielle et Systèmes Cognitifs.

La structuration de la recherche s'y organise autour de sept thèmes :

- Analyse et synthèse de l'information ;
- Indexation, stockage et recherche d'informations ;
- Interaction, autonomie, dialogue et coopération ;
- Raisonnement et décision ;
- Modélisation, algorithmes et calcul haute performance ;
- Architecture, systèmes et réseaux 1 et 2.
-

L'Equipe Synthèse d'Images et Réalité Virtuelle de l'IRIT travaille sur les différentes classes de problèmes liées à la description, la représentation et l'évolution des mondes virtuels. Ces mondes peuvent être des mondes tridimensionnels dans les approches classiques ou des mondes multidimensionnels pour les approches liées à la visualisation scientifique.

La description d'un monde virtuel repose sur la modélisation des entités et des relations entre entités composant le monde. Les travaux de recherches reposent sur une approche déclarative de la modélisation d'entités et d'environnements. Les entités sont les objets dont on étudie les différentes façons de modéliser la surface, les volumes et les propriétés qui leur sont propres. L'organisation de ces objets en scènes consiste en la description des relations entre entités et la

recherche de solutions compatibles avec ces relations.

La représentation du monde virtuel, l'obtention d'une image de ce monde, repose sur la modélisation de l'apparence des objets et sur l'impact de chaque objet sur l'apparence des autres composants de la scène. L'apparence d'un objet dépend de sa forme mais aussi de sa réponse à un stimulus, l'apparence globale est la prise en compte de toutes les réponses. Les recherches menées au sein de l'équipe consistent en la modélisation des stimuli (ex. la lumière), la modélisation de la réponse d'un objet à un stimulus (ex. la réflectance), la modélisation des interactions entre les objets ainsi que les algorithmes et architectures permettant une évaluation efficace.

L'évolution d'un monde virtuel repose sur l'évolution individuelle de ses composants et sur l'évolution collective. L'évolution individuelle peut être contrôlée par les lois physiques relatives au mouvement mais aussi par reproduction d'un mouvement capturé. Les travaux de recherche visent à étudier les combinaisons possibles des différentes modalités de contrôle du mouvement ainsi que la réaffectation de mouvements capturés. L'évolution collective repose sur l'apprentissage et la coopération entre composants de la scène. Les recherches dans ce domaine sont orientées vers l'émergence de comportement et l'apprentissage automatique.

La réalité virtuelle est l'assemblage des problématiques fondamentales précédentes auxquelles on ajoute l'interaction et la collaboration. Pour cela, l'équipe mène des recherches concernant l'organisation et la gestion de mondes virtuels distribués, dont les principales problématiques sont la gestion répartie efficace d'un monde virtuel conformément aux standards du domaine, l'interopérabilité des systèmes de réalité virtuelle distribuée et l'interaction coopérative dans les mondes virtuels.

Dans le cadre du projet FOVEA, en plus de notre travail, Jean-Charles THOMAS, dans le cadre d'un DEA également, a effectué le travail intitulé « Interaction de grands ensembles » en s'appuyant sur les informations que sont 1) la base de données répertoriant les artefacts issus de la grotte de La Caune de l'Arago, 2) Le modèle en trois dimensions de la grotte, numérisé par un système MENSI [THOM 04]. A cela, ajoutons, pour les évoquer, les travaux non moins intéressants de Chaouki MAIZA : « Etude de techniques d'appariement entre modèles et fragments de

poteries sigillées » également dans le cadre d'un DEA et au sein, cette fois-ci du projet SIAMA : Système d'Imagerie et d'Analyse pour le mobilier Archéologique. Travaux qu'il poursuit en doctorat [MAI 04].

1. 3. Numérisation 3D de Matériel Paléo- Anthropologique

Au carrefour de deux disciplines, ce stage se devait néanmoins de remplir les deux conditions suivantes :

- Comprendre un aspect d'initiation à la recherche, pour la partie DEA de notre formation ;
- Aborder les responsabilités et les techniques de l'ingénieur, pour la partie ESINSA.

Le sujet proposé par Gérard SUBSOL : "*Numérisation 3D de Matériel Paléo- Anthropologique*" couvre donc ces exigences. Il se décompose en quatre phases :

1. Une phase de *bibliographie* pendant laquelle nous avons analysé les différentes techniques de numérisation d'objet tout en nous concentrant sur les applications au matériel paléolithique, qui comporte certaines spécificités : surface irrégulière et présence de faces par exemple. Nous avons également pu dresser un état de l'art centré sur la numérisation d'objets archéologiques (artefacts) et plus précisément sur les outils paléolithiques.

2. Une phase *d'ingénierie* où nous avons numérisé certains échantillons représentatifs de matériel paléontologique fournis par les paléontologues de FOVEA. Nous avons alors récupéré les données, les avons converties dans un format normalisé et visualisées en trois dimensions en utilisant les logiciels disponibles au sein du projet FOVEA, du domaine public ou, comme nous le verrons, du domaine privé.

3. Une phase de *synthèse* où nous avons étudié et utilisé certaines méthodes pour comparer les différentes modélisations en trois dimensions obtenues à partir des différents systèmes. Il s'agissait en particulier de localiser et de quantifier les écarts et/ou les erreurs de numérisation.

4. Une phase de *validation in situ* qui consista à tester en conditions réelles, sur le site, pendant la période de fouilles et en temps réel, le système d'acquisition finalement choisi. Cela nous a permis, entre autres, d'étudier la faisabilité

d'inclure une numérisation en trois dimensions dans la chaîne de traitement de la fouille archéologique.

Légèrement différent de cette décomposition en quatre phases, ce rapport expose en premier lieu l'état de l'art dressé en phase 1.

Ensuite nous aborderons la numérisation en trois dimensions, explicitant les critères sur lesquels nous nous sommes basés, puis décrivant

les acquisitions proprement dites ainsi que les conversions informatiques nécessaires et les résultats individuels respectifs. Cela nous permettra déjà de tirer quelques conclusions pour envisager la suite : la comparaison quantifiée des résultats avec l'étude des algorithmes et des logiciels disponibles et l'application à nos différentes données.

Enfin, nous présenterons l'étude de faisabilité par la description du travail d'acquisition *in situ* et du traitement informatique qui s'en est suivi.

II. Etat de l'art

L'état de l'art présenté ci-après est issu de la recherche bibliographique que nous avons menée à Sophia Antipolis du 15 mars au 5 avril 2004. Les résultats de cette recherche sont présentés dans notre *Compte rendu de recherche bibliographique : état de l'art des acquisitions 3D d'outils paléolithiques*

2. 1. *L'archéologie Virtuelle*

"Les possibilités progressivement offertes par la recherche scientifique et technologique ont ouvert à l'archéologie de nouveaux horizons, dessiné de nouvelles frontières à la connaissance."

Reprenant cette phrase de Maurizio FORTE [Forte et al., 1996] on ne peut que constater la véritable explosion des réalisations dans ce domaine. Déjà, il y a 8 ans, cet ouvrage ne présentait pas moins de 62 travaux allant de la reconstruction par ordinateur d'un crâne d'*Homo Sapiens* à la représentation virtuelle de l'immense centre cérémoniel de Tenochtitlan (Mexique). Il devient donc désormais fastidieux de vouloir dresser un exposé exhaustif des réalisations de ce type.

Il est intéressant de noter que, des premières associations entre l'archéologie et l'informatique dans les années soixante, on passe dès 1991 à l'emploi du terme "*Archéologie virtuelle*" (Paul REILLY), témoin de l'évolution constante des applications "informatico-archéologiques".

Mais les réticences sont nombreuses et une lourde inertie était encore fortement présente en 1997 : "*La numérisation des documents devrait permettre de les consulter à distance et d'alléger du même coup les publications. Mais la communication par réseau paraît peu adaptée aux analyses complexes et aux descriptions détaillées et longues de l'archéologue ; elle ne se prête pas non plus aisément à la conservation d'une documentation volumineuse.*" Jean-Marie PESEZ dans : "L'archéologie, Mutations missions méthodes." Nathan, Paris.

Pourtant, apparaissent désormais des organismes privés : Arius3D (www.arius3d.com), Archidata (<http://www.archeotech.ch/archidata/index.htm>), ou publics : Archéovision (<http://archeovision.u-bordeaux3.fr/hm/demarrage.htm#>), spécialisés dans la numérisation de documents archéologiques, de grande échelle : le site archéologique dans son ensemble, comme de moindre dimension : ses poteries, par exemple.

L'archéologie virtuelle, ou "*Virtual Heritage*" en anglais est maintenant un des principaux marchés de la numérisation en trois dimensions, comme le prouve cette réclame du site Internet de Fastcan (concepteurs de scanner laser 3D) : "*The FastSCAN Cobra is perfect for archaeological digs. FastSCAN is lightweight and portable, giving the option of bringing the handheld laser scanner directly to the field for accurate scanning of relics, and exploring cultures and civilizations from the past.*"¹

2. 2. *Les travaux américains*

Il semble bien y avoir une nécessité de représentation en trois dimensions des outils préhistoriques. A défaut de 3D, on utilisait jusqu'à présent des figures dessinées en projection ou des photos prises sous plusieurs angles.



¹ "le FastSCAN Cobra est idéal pour les numérisations archéologiques. FastSCAN est léger et portable, offrant une alternative pour porter l'assistance du scanner laser directement sur le chantier de fouille pour des acquisitions précises d'artefacts, et explorer les cultures et les civilisations du passé."



Figure 1 - Un outils préhistorique trouvé en Normandie par un américain à la fin de la deuxième guerre mondiale est maintenant exposé sous toutes ses coutures sur Internet pour être vendu.

On saisit aisément comment une modélisation 3D simplifierait ces représentations. Facile à manipuler car de « petite dimension » en comparaison à l'original en pierre, elle offre de plus l'incomparable avantage d'être transportable par Internet, copiable à l'infini, et reconstituible à nouveaux en solide par stéréo lithographie.

Mais, excepté les quelques données présentées par les sociétés de services de numérisation en trois dimensions, que nous avons déjà mentionné plus haut (Arius3D), nous pouvons affirmer sans risque que le matériel paléo- anthropologique n'a pas, ou du moins extrêmement peu relativement aux autres époques ou "échelles", soulevé d'étude numérique, d'application informatique, ou d'autre recherche "virtuelle".

Il y a néanmoins deux universités, toutes deux américaines, qui ont poussé ce travail plus loin que la seule exhibition numérique (quoique) : L'université d'état du Dakota du Nord (the North Dakota State University : NDSU) et le programme 3DKnowledge de l'université d'état d'Arizona (Arizona State University : ASU).

Le 3DK Knowledge Project est un vaste projet de librairie informatique accessible et utilisable à des fins de recherche en matière d'imagerie trois dimensions : "*a knowledge network*"². Dépendant du PRISM (*Partnership for Research in Spatial Modeling*)³ et ayant le soutien de la *National Science Foundation*, 3DK applique ses données à quelques projets pilotes, dont le *lithics refitting* : restauration des industries préhistoriques. Le but de ces travaux est de supplanter au fastidieux exercice de puzzle un algorithme et une méthode automatisés.

² "Un réseau de connaissances"

³ Partenariat de recherche en modélisation spatiale.



Figure 2 - Nucléus ou "livre de beurre" et une des lames en ayant été extraites. La reconstruction des méthodes de taille de pierres passe par l'identification de ce type de correspondance. C'est le sujet d'étude du *lithics refitting* du 3DK.

Le matériel d'acquisition 3D utilisé est de la marque Cyberware (scanner laser non contact et prenant en compte la texture de type 3030 pour les numérisation d'outils préhistoriques, cf. paragraphe 3.3.3.), mis à disposition par le PRISM.

Actuellement ce projet pilote semble en sommeil : aucune information nouvelle ou publication ne sont parues depuis plusieurs mois. Les prises de contact que nous avons tenté avec l'anthropologue Peter McCartney, responsable de projet, n'ont pas donné de suites.

Il en est de même des travaux menés par l'**Archaeology Technologies Laboratory**⁴ (ATL) de l'Université d'Etat du Dakota du Nord (NDSU). Etabli depuis 1999, l'ATL a numérisé de nombreux artefacts archéologiques, dans le but de constituer, là aussi, une bibliothèque numérique : le **Digital Archive Network for Anthropology and World Heritage**⁵ (DANA-WH).

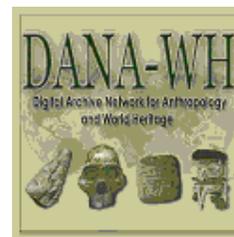


Figure 3 - logo du DANA - WH, le réseau d'archives numériques dont l'accès est libre par Internet.

Accessibles depuis Internet, les différents objets sont présentés par leurs caractéristiques, taille, provenance sous forme textuelle, et visuellement sous forme de photographies.

⁴ Laboratoire des technologies archéologiques.

⁵ Réseau d'archives numériques pour l'anthropologie et le patrimoine mondial.

Seulement quelques objets sont visualisables en trois dimensions.

L'ATL a procédé à l'aide d'un scanner Minolta vivid 700 : laser non contact et prenant en compte la texture (cf. paragraphe 3.3.4.).

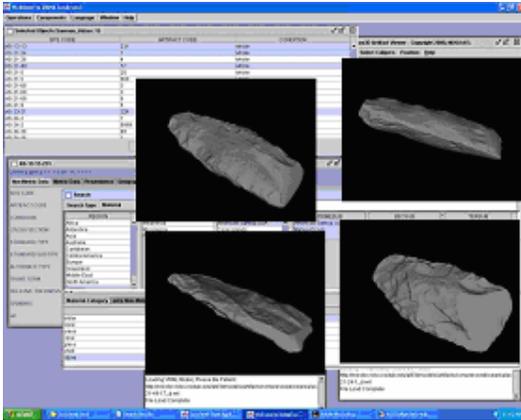


Figure 4 - Impression d'écran montrant l'interface du DANA : les artefacts sont classés par région d'origine, puis par type, et certains offrent une visualisation en trois dimensions.

Cependant, ici aussi, il ne semble pas que ces travaux aient donné de suite. Nous sommes parvenus à entretenir une petite correspondance avec le Professeur Aaron BERGSTROM, mais aucune collaboration concrète n'a été réalisée. Ce rapport lui sera tout de même communiqué.

2. 3. Les systèmes de numérisation 3D

Issus pour une grande partie de l'industrie (l'autre part venant de la médecine), les scanners en trois dimensions trouvent leur première utilité dans les domaines du "reverse engineering" et de l'inspection de parties complexes de pièces. Le "reverse engineering" consiste à créer une représentation virtuelle d'un objet réel pour aboutir généralement à un "rapid prototyping" : une réalisation matérielle. La seconde utilisation est une comparaison entre un modèle et sa représentation (plus facile à manipuler), qui nécessite donc une numérisation précise et permet de calculer une "carte" d'erreurs. Notre travail reprendra ces deux pratiques : précision de la numérisation par une étude préalable de l'objet et création d'un modèle virtuel.

2. 3. 1. L'acquisition passive :

On appelle "acquisition passive" un processus qui n'interagit en aucune manière avec l'objet de la numérisation.

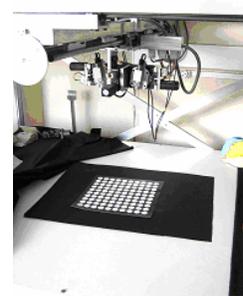


Figure 5 - Banc d'acquisition photogrammétrique : deux caméras observent la même scène.

Ce sont les systèmes uniquement optiques : la photogrammétrie, aussi appelée stéréovision. L'information de profondeur ne peut y être extraite que des images elles-mêmes, cette méthode nécessite donc une parfaite connaissance des paramètres de la caméra utilisée (distance focale, plan focal, mouvements). Ce qui entraîne des ajustements optiques réguliers de la part de l'utilisateur. Son utilisation est tout de même réduite.

2. 3. 2. L'acquisition active :

Par opposition, l'acquisition active sous-entend une interaction entre le scanner et l'objet de la numérisation, interaction qui peut être de types très différents :

- Contact physique ;
- Emission de lumière (structurée le plus souvent) ;
- Emission d'onde ou de rayonnement.

Scanners de contact :

Ce sont les scanners les plus répandus. Une sonde fixée sur un bras mécanique enregistre la position spatiale du point de contact par rapport à un référentiel défini. Très lents (10 pts/min manuellement et 100 pts/min automatisé), ils ne permettent pas l'acquisition de détails internes ou d'accès difficiles, et ne peuvent avoir une précision inférieure au diamètre de la sonde. De plus, les matériaux mous sont impossibles à traiter.

Scanners non contact :

- La dernière catégorie de scanners comprend :
- Les scanners basés sur la détermination du "temps de vol" : l'imagerie radar par exemple ;
 - Les scanners issus de l'imagerie médicale, qui ont l'avantage de présenter l'intérieur des objets : Tomographie par rayon X, Echographie par ultrasons, Résonance Magnétique Nucléaire ;
 - Les scanners optiques sans laser, basés sur des méthodes de lumière structurée : l'objet est illuminé par un motif de couleurs et/ou de formes puis l'observation est comparée avec le motif initial. C'est l'effet Moire ;
 - Les scanners optiques laser, qui fonctionnent sur le principe de la triangulation : une caméra CCD (Charged Coupled Device) observe l'objet qui est parcouru par un faisceau laser. Ce faisceau peut être un point : on repère donc la position de ce point dans la matrice CCD, ou un plan, généré par une lentille cylindrique, ou un miroir et un galvanomètre. De cette manière, un plus grand nombre de points peut être acquis en même temps.

Ce travail a permis plusieurs résultats qui nous sont parus importants de relever.

Le premier, indépendant du but initial, a été l'information apportée en matière de numérisation 3D d'un point de vue général : les différentes méthodes (cf. paragraphe 2.3.) mais également les différentes applications, allant de l'industrie (*reverse engineering*) à la mode vestimentaire, en passant, bien sûr, par la numérisation de sites archéologiques de grande échelle ou l'analyse microscopique d'artefacts.



Figure 6 - Un scanner "actif non contact optique laser" : le Minolta vi-910. Acquisition par M. Jérôme BARLET d'un moulage de sol préhistorique au Centre de Recherche Préhistorique de Tautavel.

La seconde chose que ces recherches ont permise, c'est la mise en évidence du peu de travaux qui sont effectués dans ce domaine précis. Une recherche quelque peu poussée renvoyant vite aux mêmes auteurs, laboratoires ou entreprises.

Finalement, cet état de l'art nous indique les grands axes de notre travail :

- Tester le plus de systèmes différents, qu'ils soient passifs, actifs, contact, non contact, laser, etc.
- Approfondir les méthodes d'acquisitions effectuées par le 3DK et l'ATL, en testant les systèmes laser de type Cyberware et Minolta ;
- Et enfin, comparer les systèmes utilisés et les numérisations obtenues.



Figure 7 - Les acquisitions papier en deux dimensions : le carnet de fouille, le classeur de zone, le mètre enrouleur et les artefacts référencés protégés dans leur sachet plastique. Tout cela sera remplacé par une unique visualisation informatique en trois dimensions.

III. Numérisation 3D

Au centre de notre travail, la numérisation 3D ne se limite pas à la simple acquisition des données. Le travail commence par la recherche des organismes possédant les systèmes puis la prise de contact et de renseignement. Ensuite vient effectivement la digitalisation, étape brève mais unique, car chère, donc à effectuer avec le plus grand soin.

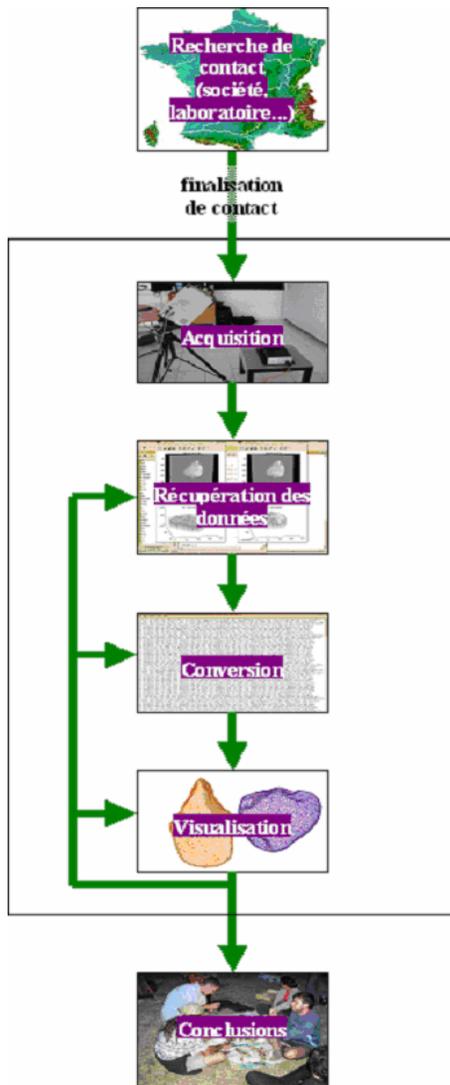


Figure 8 - Procédure de travail pour un système d'acquisition donné, depuis la recherche de contacts à l'élaborations de conclusions. Il n'est pas possible de revenir sur l'étape de la numérisation.

Puis, il s'en suit tout un processus lent et compliqué de récupération des données (support, transfert) de conversion (programmes informatiques), de visualisation et de corrections éventuelles.

A ce niveau il est envisageable de formuler une critique propre à chaque système.

Ensuite, la comparaison (qualitative, quantitative, pratique, esthétique) des différents systèmes complète cette étude.

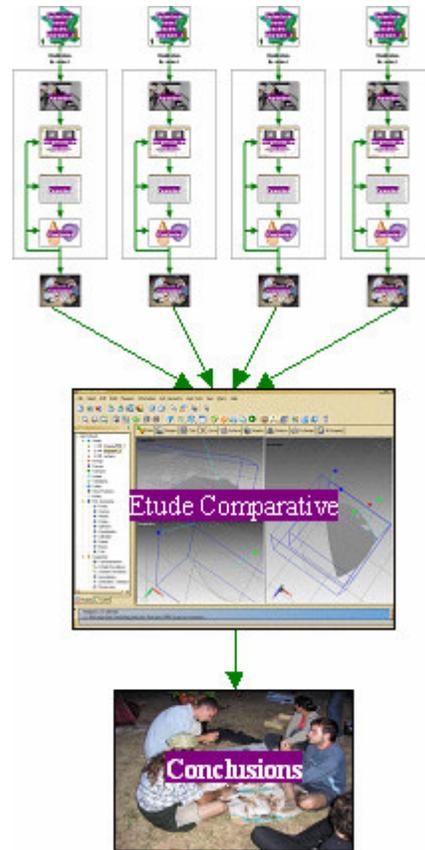


Figure 9 - Procédure de travail globale : tous les systèmes utilisés sont comparés.

3. 1. Recherche de contacts

La recherche de contacts a débuté en même temps que la recherche bibliographique, c'est à dire dès le début du stage, puis elle s'est

poursuivie jusqu'au début du mois d'août. Ce fut donc un travail réalisé parallèlement aux autres.

Cette étape conditionnant tout le reste de notre stage, nous avons dû mener un véritable travail de communication : prise de contact, constitution d'un carnet d'adresses, maintien des relations. La rédaction d'emails pris la majeure partie du temps imparti à cette recherche : emails en français mais également en anglais, pour, par exemple, prendre contact avec les membres de l'ATL et du 3DK ou avoir des renseignements directement auprès des concepteurs de scanners et de logiciels.

Le laboratoire de l'IRIT travaillant avec de nombreux partenaires, nous avons pu entamer notre recherche à Toulouse, l'éloignement étant un des facteurs de sélection. Ensuite, notre champ d'action s'est élargi à la France puis à l'Europe, et nous n'avons pu établir des relations françaises américaines, anglaises et coréennes.

Nous avons donc abouti, au fur et à mesure, à un choix de lieux d'acquisition et reçu différents conseils de la part de plusieurs spécialistes.

3.1.1. Les institutions

Les organismes publics qui ont participé à notre stage en proposant des systèmes d'acquisition en trois dimensions sont :

- L'Ecole Nationale Supérieure d'Electronique, d'Electrotechnique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications de Toulouse (ENSEEIH), en les personnes de MM. Bernard THIESSE et Vincent CHARVILLAT qui ont développé un système d'acquisition passif par stéréovision ;

- Le centre d'Imagerie Médicale de la faculté de médecine de Toulouse et M. Pierre PAYOUX, qui nous a permis de recourir à un scanner tomographique à rayons X ;

- La plate-forme Archeovision du centre de recherche archéologique et historique Ausonius de la faculté de Pessac à Bordeaux, dirigée par M. Robert VERGNIEUX et spécialisée en "archéologie virtuelle", M. Loïc ESPINASSE a effectué là-bas la numérisation 3D par scanner laser Minolta Vivid 900 ;

3.1.2. Les sociétés

Nous avons également dû faire appel aux services de plusieurs sociétés :

- Cyberware US, qui nous a permis de localiser un scanner de leur marque en France ;

- Saint-Gobain Desjonquères dans la Baie de Somme, où M. Patrick ROGER a procédé pour nous à la numérisation 3D par scanner Cyberware ;

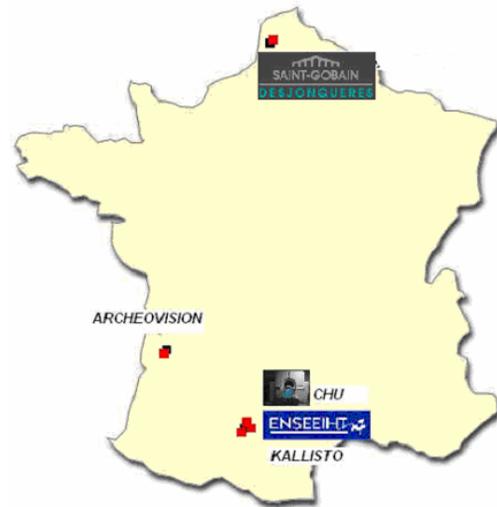


Figure 10 - Situation géographique des lieux d'acquisition 3D : Mers les Bains, Bordeaux et Toulouse.

- Kallisto, entreprise de la région de Toulouse fournisseur de scanners Minolta et qui, après avoir fait l'acquisition par Vivid 900 de nos deux modèles de référence, s'est déplacé à Tautavel avec un scanner Vivid 910 pour réaliser avec nous la dernière phase de notre étude.

3. 2. Les outils paléolithiques

Comme nous l'avons expliqué dans la partie 2.3., il est indispensable de procéder à l'étude de l'objet de la numérisation avant d'y procéder.

L'essentiel de l'information véhiculée par le matériel préhistorique, sans évoquer la typologie, réside dans l'histoire de sa fabrication et l'utilisation qu'il en a été fait. En effet, certains préhistoriens définissent l'homme comme "l'hominidé ayant la faculté de conceptualiser" (prof. H. de Lumley). Or le projet qui entoure la fabrication d'outils est le seul support conceptuel qu'il nous reste aujourd'hui d'une époque où la fabrication du feu était inconnue. C'est donc à travers l'évolution des techniques de taille que l'on peut percevoir l'évolution de l'homme.

3.2.1. Technologies lithiques

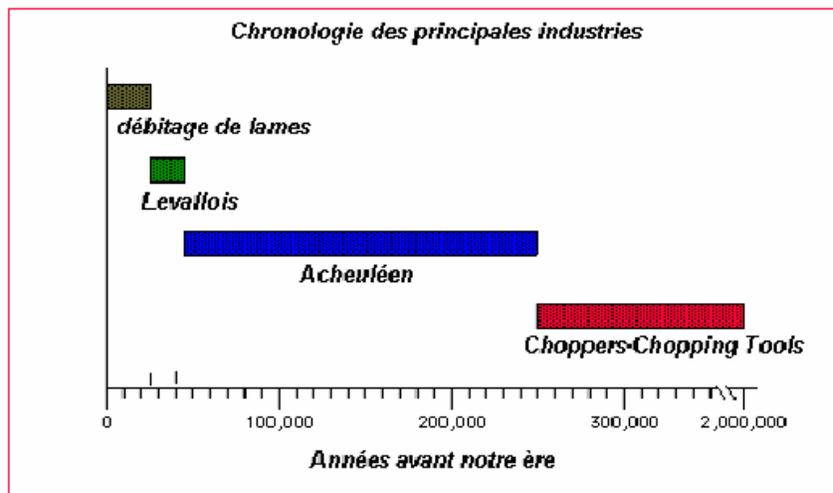


Figure 11 - Frise chronologiques présentant les différents principaux types d'industrie lithique depuis deux millions d'années : les galets aménagés (2 millions d'années à 250 mille ans), l'Acheuléen (250 mille ans à 40 000 ans), Levallois (40 000 ans à 25 000 ans) et débitage des lames (à partir de 25 000 ans).

Les techniques de taille d'outils en pierre ont progressé depuis les premiers galets aménagés (deux millions d'années avant notre ère), jusqu'aux industries néolithiques (encore utilisées au siècle dernier par les amérindiens).

Galets aménagés et bifaces

Les plus anciens hommes ont fabriqué des outils tranchants pour désarticuler et découper le cuir des animaux qu'ils consommaient (Homo Habilis) :

- Les **choppers** sont des galets aménagés taillés d'un seul côté. Ils sont utilisés pour désarticuler le gibier, fracturer les ossements. ;

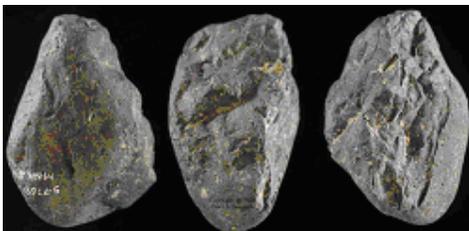


Figure 12 - Trois vues différentes d'un Chopper. On constate la nécessité de représenter l'outils sous de nombreux angles pour en saisir la particularité : des enlèvement unifaciaux.

- Les **chopping tools**, plus perfectionnés, sont taillés des deux côtés. Leurs arêtes

tranchantes, souvent marquées, écrasées, témoignent d'une utilisation violente, assez semblable à celle des choppers. Le chooping-tool pouvait également servir au travail du bois.



Figure 13 - Essai de reconstitution d'une utilisation de chopping tool : la fracturation d'un os pour en manger la moelle.

- Le **biface**, inventée par l'Homo Erectus, implique, pour le tailleur de **silex** une connaissance empirique acquise des propriétés physiques du matériau. Cette roche siliceuse, très dure possède une constitution moléculaire très homogène qui lui permet d'absorber les ondes de choc de façon continue. Les éclats sont ainsi prévisibles suivant l'angle de frappe et suivant la dureté du percuteur. Le biface est un outil taillé sur les deux faces, en forme d'amande. On

l'obtient à partir d'un rognon de silex, sur lequel on enlève une grande quantité de matériaux.

Technique dite "de Levallois" et débitage de lames

Ainsi dénommée en référence au site de **Levallois-Perret**, dans la région parisienne, le premier sur lequel ce type d'éclats a été observé. Les premiers éclats Levallois apparaissent autour de 100 000 ans av J.C.. Cette technique, très élaborée, a été parfaitement maîtrisée et perfectionnée par l'homme de Neandertal. Elle permet de débiter plusieurs éclats prédéterminés à partir d'un rognon de silex. Elle constitue un progrès technique par rapport au biface. Seul un homme intellectuellement développé, capable de prévoir par anticipation une série d'actes techniques pour obtenir un résultat, a pu mettre au point cette technologie.

Le **débitage de lames** consiste à fabriquer, à partir d'un nucléus caréné, des séries de lames de silex auxquelles on affectera ensuite une fonction (burin, grattoir, perceur) en les retouchant. André Leroi-Gourhan avait exprimé de façon simple l'évolution de la technologie lithique en estimant qu'avec un kilo de galets aménagés on obtenait 10cm de tranchant, avec un kilo de bifaces on obtenait 40 cm de tranchant, avec un kilo d'éclats, 2 mètres de tranchant et avec 1 kilo de lames 20 mètres de tranchant. L'évolution technique de la taille du silex va dans le sens d'une économie plus grande de matière première et d'un meilleur rendement de l'outillage.

Les enlèvements

Quelle que soit la période ou la technologie, le principe repose donc sur la **réduction** : l'opération d'enlèvement d'éclats.

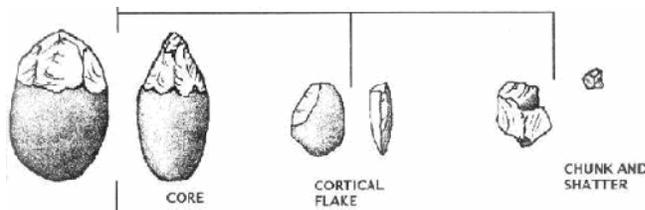


Figure 14 - Les étapes de la réduction : le nucléus, les éclats de "première génération" et les éclats retravaillés.

Elle s'opère en heurtant avec percuteur, plus résistant, un point stratégique du futur outils.



Figure 15

Ensuite, de petits ajustements permettent un découpage plus fin du tranchant.



Figure 16

3.2.2. Caractéristiques

Les caractéristiques des outils paléolithiques qu'il ne faut pas négliger lors de la numérisation (en *italique* les termes anglais) sont donc les suivantes (cf. figure 19) :

- Les traces d'éclats (*flake scar*) qui déterminent le bord tranchant, donc utile, de l'objet ;
- Les traces d'aides à la fixation sur d'éventuels supports ou manches (*hafting trace*) (encoches) ;
- Les bulbes de percussion (*Bulbe of applied force* ou *Bulbe of force*), comprenant parfois certaines traces (*bulbar scar*)
- Les traces concentriques dues à l'onde de choc (*ripples* et *concentrics rings*) ;

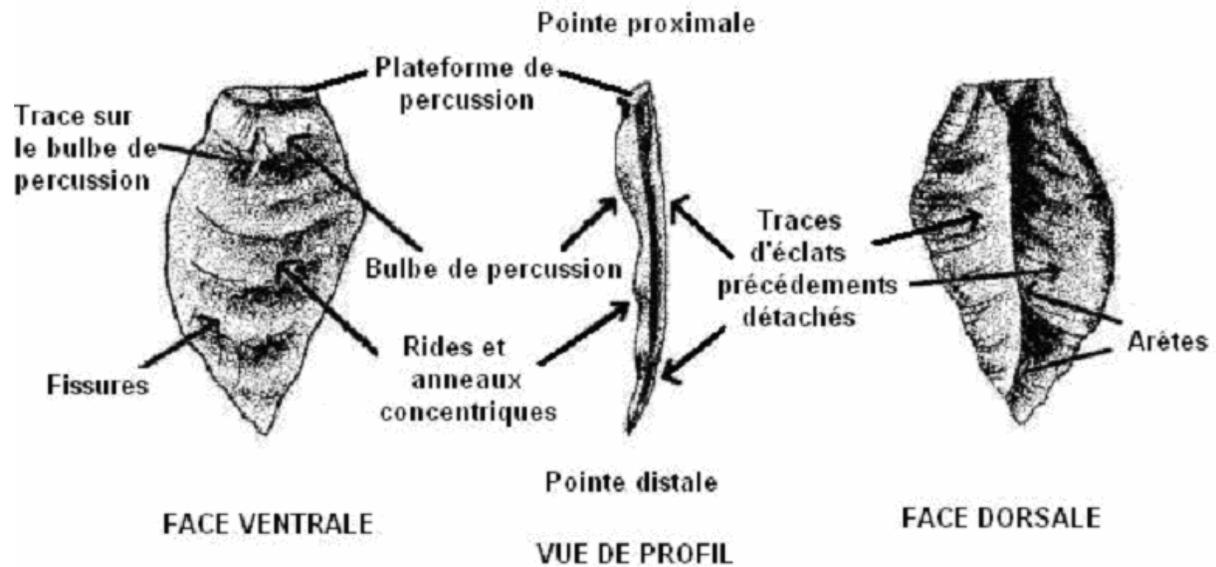


Figure 17 - Les attributs géométriques qui permettent de définir et de décrire un outil préhistorique sont tous issus de la technique utilisée pour sa fabrication.

Notre travail ne pouvait pas se faire sans disposer d'exemplaires de référence à scanner. Il est cependant très compliqué d'enlever à leur laboratoire ou à leur musée d'origine des objets si précieux. Nous avons donc décidé d'opérer avec des moulages d'outils :

- un Chopper (644) : enlèvements uni faciaux (186x100x32 mm)



Figure 18 - Le moulage de chopper utilisé pour la numérisation.

- un Chopping Tool (1279) : enlèvements bifaciaux (122x124x44 mm)



Figure 19 - Le moulage de chopping tool utilisé pour la numérisation.

Ces deux outils proviennent de Terra Amata : un site situé à Nice (06) où ont été trouvées les plus anciennes traces de feu : il y a environ 400 000 ans. Le temps a poli les arêtes tranchantes de ces deux outils, mais les traces d'enlèvements sont encore très nettes.

La différence entre un moulage et son original ne réside ni dans la texture ni dans la forme, mais uniquement dans la matière : le moulage est creux et léger, et les propriétés de réflexions de sa surface sont modifiées. C'est ce dernier point, non négligeable, qui faussera nos acquisitions. Cependant, comme nous le verrons, la résine des moulages se prête moins bien qu'un original à un type d'acquisition par laser. De même, l'acquisition d'une roche ne soulève pas de problème. (cf. IV. Etude de faisabilité)

3. 3. Les différentes acquisitions

Réductions et limitations

Devant la grande variété de scanners 3D disponibles : Model maker, Replica, CTB, Optocam, Chameleon, Scirocco, CSS-100, Digibot II, The Handy, Faro Arm, V-Star + Inca, Tritop, Atos, Digiplus, Hyscan 45C, Microscribe, KLS 51, KLS 171, Surveyor 3200, Palpage, C3D, Soisic, LR 20/100, LC 20/100, Vivid-900, Euro-C Apex, ScanWorks, Fastscan, 3Draw, Cyclone, Pizca Pix 30, SP12, MMTP, Comet 500, Tricolite, Autoscanner, CHR 150, Inspect, Tricorder... nous devons faire un choix.

Notre premier critère fut la disponibilité. Ensuite, il nous paraissait indispensable d'utiliser un matériel proche de celui de l'ATL et du 3DK. De plus, il était intéressant d'expérimenter des

systèmes provenant de catégories différentes : passif, actif, contact, non contact, etc.

Malgré la possibilité que nous avons d'utiliser un scanner Microscribe (contact avec bras mécanique et sonde) nous avons décidé de ne pas le faire. En effet, ce procédé est intéressant lorsqu'il s'agit de numériser des objets géométriques simples ou des points de repères (*Landmarks*), mais dans notre cas, nous ne pouvions pas raisonnablement, à raison de dix points par minute, numériser l'intégralité des deux moulages.

3.3.1. Stéréophotographie

C'est par un système passif que nous avons commencé la série de numérisation à l'Ecole Nationale Supérieure d'Electronique, d'Electrotechnique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications de Toulouse, avec le système d'acquisition en trois dimensions N.O.I.S.I.V. mis au point par M. Bernard THIESSE.

Le système est un banc d'acquisition par stéréovision, appliquant le principe de la photogrammétrie : deux points de vue d'une même scène permettent la construction d'une représentation en trois dimension. C'est "tout simplement" ce qu'effectuent nos yeux. Il est composé de deux caméras pointant sur une table d'acquisition.

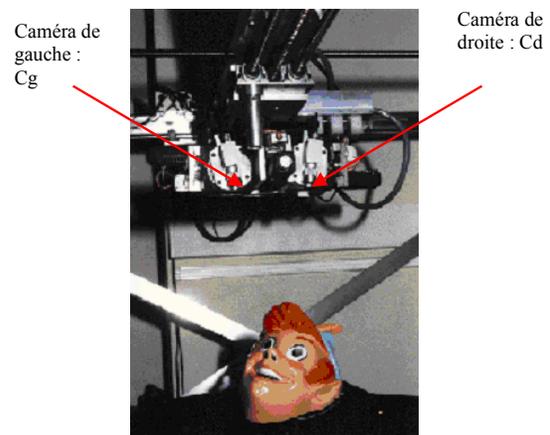


Figure 20 - La tête d'acquisition de N.O.I.S.I.V. : deux caméras.

Un éclairage puissant et réglable est nécessaire, pour assurer un contraste suffisant et

empêcher les jeux d'ombres qui viendraient masquer des zones de l'objet.

Fonctionnement

Les deux caméras de droite et de gauche de **centre optique** respectivement **Cg** et **Cd** "regardent" le même objet **M** sous deux angles différents (**Dg** et **Dd** sont les rayons de projection). Il est donc possible, en connaissant les paramètres des caméras : la transformation 3D -> 2D des points de l'objets sur le plan focal (**mg** et **md**), de connaître la position de **M** dans **l'espace**. Donc d'effectuer une reconstruction de l'objet en trois dimension.

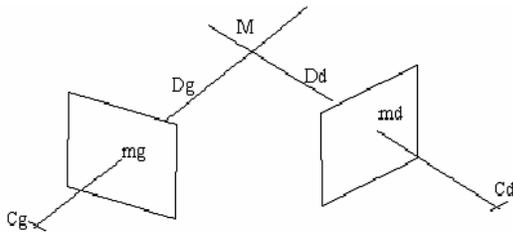


Figure 21 - Schématisation d'un système de stéréovision : deux caméras Cg et Cd définissent un rayon de projection Dg et Dd du point M sur leur plan focal en mg et md.

Le processus complet comprend donc trois étapes :

- Déterminer les paramètres des caméras, c'est le **calibrage** ;
- Effectuer la correspondance entre les projetés de **M** sur le plan focal de droite (**md**) et de gauche (**mg**), c'est **l'appariement** ;
- Enfin, déterminer la position des points de l'objet dans l'espace, c'est la **triangulation**.

Les différents travaux qui sont venus s'ajouter à celui de M. Bernard THIESSE proviennent principalement des différentes thèses que le système d'acquisition a suscité : [CHA 97], [CHA 94], [MAR 93], [RAG 89].

Calibrage :

Le calibrage est effectué à l'aide de mires : des objets dont on connaît tous les attributs géométriques.

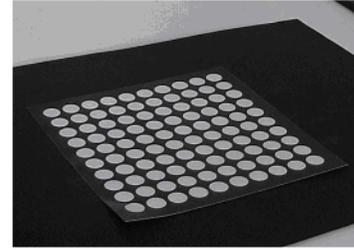


Figure 22 - Mire utilisée pour le calibrage du système N.O.I.S.I.V. : des ronds blancs sur fond noir répartis uniformément.

Ces mires permettent de calculer les paramètres de la transformation 3D->2D (projection centrale par exemple) en mesurant sur les images droite et gauche des caméras les nouvelles positions des centres des cercles. Un algorithme des moindres carré (par exemple) permet ensuite de résoudre le système linéaire homogène et enfin, d'obtenir les paramètres intrinsèques et extrinsèques des caméras.

Pour plus de détails, voir [THI 03] et [RAG 89]. Notons seulement les étapes du calcul :

- 1) Changement de repère du repère absolu vers le repère image ;
- 2) Modélisation du phénomène Optoélectronique ;
- 3) Résolution de la modélisation (Problème d'estimation des paramètres physiques) ;
- 4) Repérage des points de référence (x_{3D} , y_{3D} , z_{3D}) de l'espace 3D (les mires) ;
- 5) Repérage des point (y_{2D} , z_{2D}) images ;
- 6) Vérification du modèle.

Le calibrage est un travail à n'effectuer qu'une fois, si l'on suppose que le système ne bouge pas. Le calibrage du système de l'ENSEEIHRT a été fait il y a six ans !

Appariement :

L'appariement des points (pixels) des images des caméras gauche et droite s'appuie sur plusieurs contraintes :

- Un pixel ne peut avoir plus d'un pixel homologue ;
- L'homologue **md** d'un pixel **mg** est situé sur le segment épi polaire contenant le point de fuite de la direction **mgCg**.
- Le problème d'appariement en deux dimensions est de cette manière ramené à un problème en une seule dimension.
- D'autres critères sont également pris en compte, notamment des critères de **ressemblance** (de l'image droite à l'image gauche, un pixel conserve ses informations géométriques et radio

métriques), basés sur la valeur absolue du coefficient de corrélation sur une fenêtre 5x5 centrée sur le prétendant homologue, ainsi que des critères de connaissance "a priori" de la géométrie de l'objet : la continuité-régularité locale, traduite par la **disparité** dont le calcul est basé sur le gradient de Julesz. (variation de la distance entre deux points d'une même image selon s'ils sont vus dans l'image gauche ou dans l'image droite) [CHA 94].

Nous obtenons donc ainsi un problème à optimiser comprenant différentes contraintes. Pour le résoudre, nous utilisons un algorithme hybride conçu par V. CHARVILLAT [CHA 94] s'appuyant sur les trois algorithmes suivants :

- Le Recuit Simulé (optimisation locale et amélioration itérative) ;
- La recherche Tabou (recherche par voisinages exploitant l'historique de la recherche) ;
- L'algorithme génétique (optimisation globale s'inspirant du brassage chromosomique des êtres vivants et de la sélection naturelle : mutation, taux de survie...).

Triangulation :

Si le pixel considéré a été appareillé nous pouvons utiliser la triangulation :

La triangulation consiste à déterminer la position dans l'espace d'un point M à partir des droites de projection issues des points images droit et gauche : Dg et Dd. Trois cas de figure se présentent :

- 1) Dg et Dd sont coplanaires, alors elles se rencontrent en un point unique M ;
- 2) Dg et Dd ne sont pas coplanaires : M est le milieu de la perpendiculaire commune à Dg et Dd ;
- 3) Dg et Dd sont parallèles : M est projeté à l'infini.

Si le pixel considéré n'a pas été appareillé, sa position est déterminée par interpolation avec ses proches voisins.

L'utilisation du système peut être décomposée en cinq étapes principales :

- Mise en fonctionnement : mise en route des différents appareils (ordinateurs, éclairage, téléviseurs), réinitialisation mécanique des positions des caméras MICAM et calcul de l'angle de 9° avec la verticale (grâce aux moteurs de précision), pour mettre la verticale à zéro.
- Visualisation : disposition des objets sous les caméras : deux téléviseurs permettent de valider cette étape et de vérifier le centrage des objets et

le contraste qu'offre l'éclairage. Cette étape doit être réalisée avec soin.

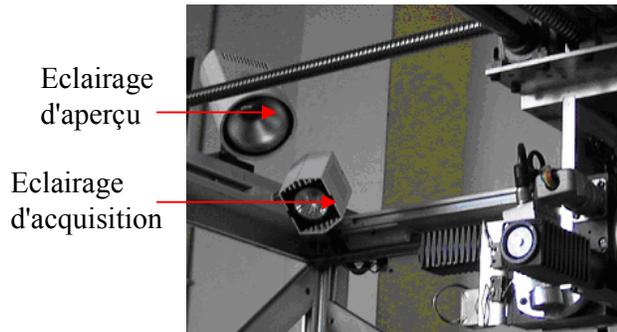


Figure 23 - L'éclairage par spots du système N.O.I.S.I.V. : il permet une optimisation des réflexions.

- Saturation : affinement de l'éclairage par une visualisation d'une seule composante RGB. Cela permet de voir les zones de saturation : les points trop brillants de l'objets. Ce soucis de saturation est un compromis : en diminuant l'intensité de l'éclairage pour qu'il n'y ai pas de saturation, certaines zones deviennes trop sombre et peuvent être prises pour une composante connexe du fond (si elles se trouvent sur le bord de l'objet). Nous avons eu des problèmes lors de cette étape à cause des références vernies des moulages.

- Acquisition : l'acquisition proprement dite, c'est à dire l'exécution des programmes FORTRAN et Matlab reprenant les principes de stéréovision. Cette étape dure une quarantaine de secondes.

- Affichage : visualisation des images 2D droite et gauche et 3D obtenues à l'aide de l'interface graphique de MatLab et de l'exécution de *mlniz.m* (lecture des données et mise en page de l'affichage).

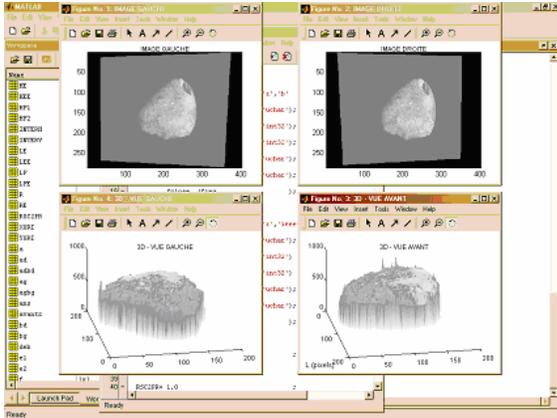


Figure 24 - Utilisation de Matlab pour lire les acquisitions et les afficher.

Pour finir, il s'est posé le problème du transfert des données et de leur conversion afin de les utiliser sous Yav++ (cf. Annexes : A propos de Yav++). Cette étape a consisté en la récupération des fichiers envoyé par Monsieur Bernard THIESSE depuis l'ENSEEIHHT par email, leur conversion d'un format Sun en un format Windows (passage de big endian en little endian), l'exécution du programme d'affichage sous Matlab, leur conversion en .tr (cf. Annexe : A propos de Yav++) avec un programme C (cf. Annexes : Programme C de conversion) et pour finir leur visualisation avec Yav++.

Résultats et conversion

Acquisition :

La phase d'acquisition pure, sans comptabiliser le positionnement des objets ni le réglage de l'éclairage (cf. I.3. saturation), met une **quarantaine de secondes** à s'exécuter sur la station de travail SUN de l'ENSEEIHHT. Exactement (à titre indicatif) : 42 secondes pour 644 supérieur et 43 pour 644 inférieur par exemple. Ce qui est tout de même relativement rapide.

Visualisation :

Le logiciel développé en FORTRAN et Matlab à l'ENSEEIHHT crée deux fichiers :

z3d.do (cote des points 3D) ;

nivg.do (les niveaux de gris de l'image de photographique de gauche).

Ces deux fichiers sont ensuite ouverts en exécutant *mlnzz.m*. C'est à ce point que se sont posés les problèmes de conversion SUN - Windows que nous avons évoqués précédemment

: afin de tenir compte du format big endian des fichiers issus d'une station SUN il est nécessaire d'ajouter dans la fonction *open* de matlab l'option 'b'.

$$fz3d = fopen ('z3d.do', 'r', 'b') ;$$

$$fnivg = fopen ('nivg2.do', 'r', 'b') ;$$

Les objets en trois dimensions issus de cette méthode d'acquisition sont donc des **surfaces** (deux par moulage) texturées en niveau de gris.

Le fichier *mlnzz.m* utilise donc l'opérateur **surface** de Matlab, qui prend en paramètres :

- la matrice d'altitudes issues du fichier *z3d.do*
- la matrices de niveaux de gris issus du fichier *nivg.do*.

$$avantz = surface (z3d ,nivg) ;$$

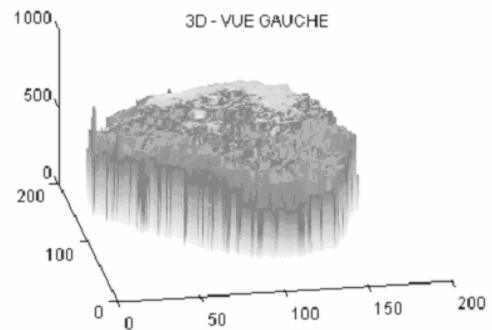


Figure 25 - Vue gauche du chopping tool numérisé par stéréovision et visualisé par Matlab.

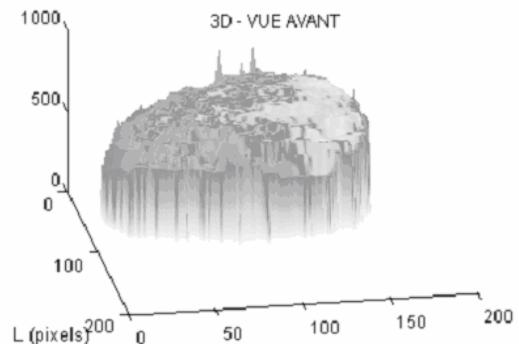


Figure 26 - Vue droite du shopping tool numérisé par stéréovision et visualisé par Matlab.

On peut donc déjà se rendre compte d'une des faiblesses de ce système : seuls les niveaux de gris de l'image de gauche sont pris en compte.

A cela viens s'ajouter une erreur qui s'est

produite lors du transfert des données sur Internet. En effet, les fichiers *nivg.do* se sont ouvert en tant que texte pur (.txt) dans le mail que M. Bernard THIESSE nous a envoyé. Les visualisations que nous avons là sont donc faites avec des niveaux de gris erronés, dû à la récupération hasardeuse de ces fichiers.

Cependant, cette perte et ce soucis de niveaux de gris sont relativement peu graves si l'on se concentre uniquement sur l'acquisition de la géométrie des surfaces. Mais là encore de mauvaises surprises nous attendent.

Acquisition 3D de surfaces :

Il est facile de comprendre que la stéréovision ne permet pas une reconstruction totale de l'objet, mais seulement de sa surface. Les contours verticaux de l'objets n'étant pas numérisé a cause de **l'occultation**.

C'est pour cette raison que les moulages 644 et 1279 ont été numérisés deux fois chacun. La mise en correspondance des faces supérieure et inférieure d'un même objet est, comme le confirme M. Bernard THIESSE d'une extrême difficulté, et de plus, ne donne pas de résultats satisfaisants.

Cet inconvénient est majeur, notamment vis à vis des systèmes CT-scanners (imagerie médicale) ou scanners laser qui assurent une reconstruction totale de l'objet.

L'occultation :

Le second désavantage de cette méthode d'acquisition, qui est intrinsèque à de nombreuses méthodes d'acquisition, est le problème de l'occultation : des zones de l'objet ne sont pas visualisées par l'une ou l'autre des caméras, ce qui interdit tout appariement des pixels de cette zone.

Le schémas suivant résume la situation.

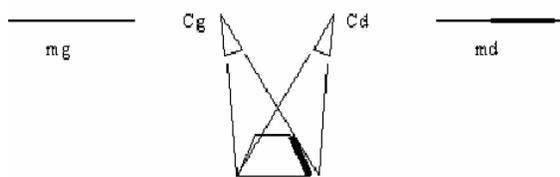


Figure 27 - L'occultation, un problème d'acquisition 3D propre à de nombreux dispositifs. La zone sombre de l'objet n'est "vue" que par la caméra Cd. Il y a donc impossibilité d'appariement, donc perte

d'information. Ce problème est d'autant plus important que les objets sont creusé ou parsemés d'impacts profonds. Dans le meilleur des cas, il reste toujours 10% des pixels qui ne sont pas appareillés.

Les deux moulages utilisés ne présentaient pas de reliefs compliqués, excepté 1279 sur sa face "supérieure" : un creux. Néanmoins, une disposition judicieuse de l'objet sous les caméras a permis de visualiser ce creux. Cependant il ne sera pas possible pour tous les artefacts de trouver une disposition permettant un visualisation totale de la surface.

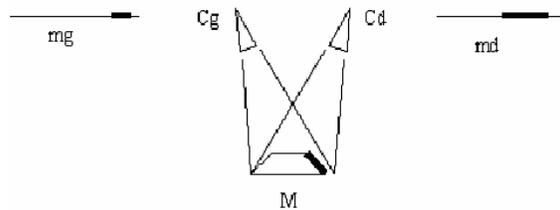


Figure 28 - Dans le cas moins extrême ou la zone en biais (marquée en sombre sur la figure suivante) est tout de même vue par les deux caméras, il n'y a pas occultation mais la zone n'est pas représentée dans chaque image par le même nombre de pixels. Dans l'exemple ci-dessous, certains pixels de md n'ont pas d'homologues dans mg. Ils sont donc appareillés comme leur pixel voisin.

Le rendu visuel :

Après une analyse visuelle purement qualitative, nous avons noté les remarques suivantes :

- 1) Les surfaces sont formées d'escaliers très marqués. Cela, nous explique Monsieur Bernard THIESSE, est du à la prise en compte de façon entière, et non pas fractionnaire, des disparités.
- 2) Il existe de nombreux problèmes de bord : des pixels erronés qui créent des pics après interpolation. Cependant, cela peut être ajusté manuellement ultérieurement en utilisant un logiciel comme Yav++.
- 3) Les facettes des outils, les granulosités et tous les autres détails n'apparaissent pas. Cela diminue donc radicalement l'intérêt de cette méthode (cf. paragraphe 3.2.2.).

Escalier de disparité

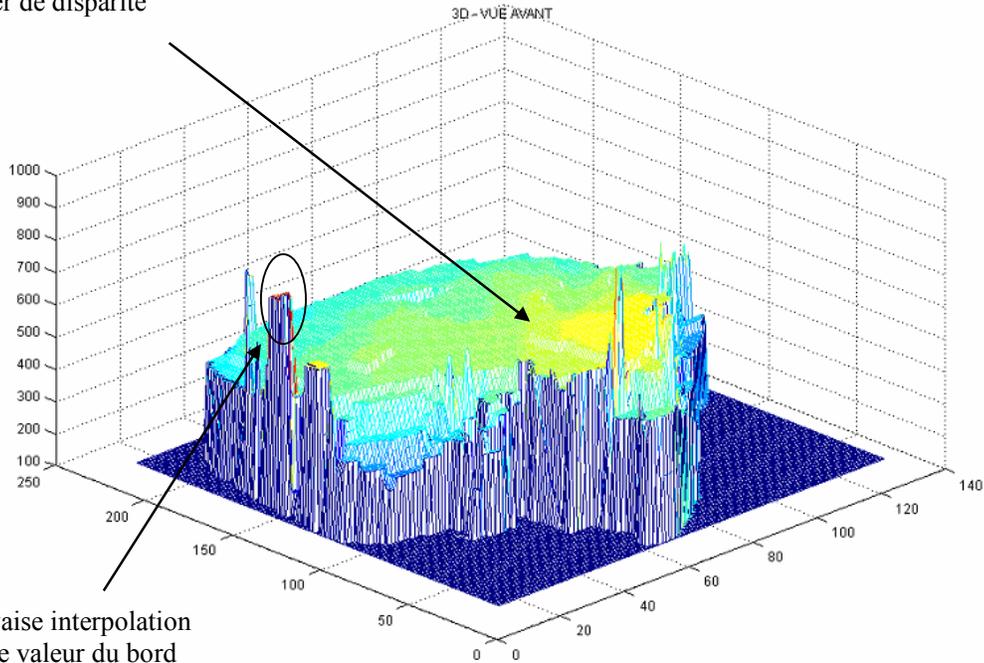


Figure 29 - Si nous observons plus attentivement le résultats de la stéréovision, ici avec la fonction mesh de Matlab, nous constatons même que la perte d'information est conséquente !

Conversion des fichiers au format .tr :

Pour visualiser les Modèles Numériques de Terrain (MNT) avec Yav++, il est nécessaire de les convertir en triangulation : passer d'un nuage de points 3D à une surface triangulée (cf. Annexe : A propos de Yav++).

Pour cela, nous disposons uniquement du fichier de données *z3d.do* : fichier binaire en big endian :

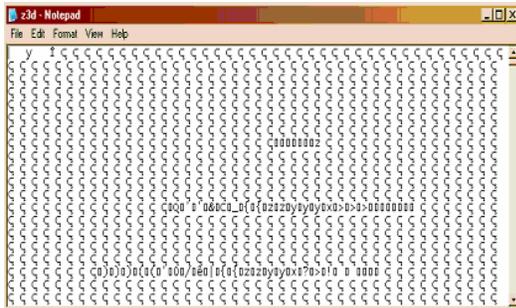


Figure 30 - Fichier binaire *z3d.do* parfaitement illisible tel quel.

Il va donc être nécessaire de convertir :

- De little en big endian ;
- De binaire en ascii ;

Avant de créer la triangulation (.tr), c'est à dire créer un fichier contenant :

- le nombre de points (vertex en anglais) ;
- les coordonnées des points ;
- le nombre de triangles ;
- les indexes des vertex du triangle.

Note : Un triangle est une structure reliant trois vertices (sommets) par des edges (segments).

Donc, il va s'agir d'extraire de *z3d.do* toutes les altitudes et d'inter changer les bits de poids fort avec les bits de poids faible, de relever ensuite la taille de la matrice du MNT (nombre de lignes : nbLignes, nombre de colonnes : nbColonnes), puis d'extraire la matrice en elle-même et de copier ainsi les coordonnées dans le nouveau format .tr. Les coordonnées x et y sont données par la position dans la matrice (i,j) et la cote z par la valeur à cette position. Il y a autant de sommets que d'éléments dans la matrice (ce que nous nommerons *taille*), et le nombre de triangles est, après un petit calcul :

$$\text{nombre de triangles} = (\text{taille} - \text{nbLignes} - (\text{nbColonnes}-1)) \times 2$$

En effet, comme les sommets sont répartis sur une grille, nous pouvons créer la triangulation de la façon suivante :

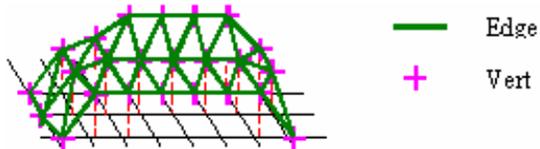


Figure 31 - Méthode de triangulation primaire pour reconstituer le modèle formé par la carte d'altitude des acquisitions par stéréovision.

Soit, dans une représentation 2D :



Figure 32 - Méthode de triangulation : il s'agit de relier trois sommets pour former des triangles cohérents.

Et le nombre de triangle est bien égal à la formule précédente : il y a deux triangles par sommets excepté ceux de la dernière ligne et de la dernière colonne :

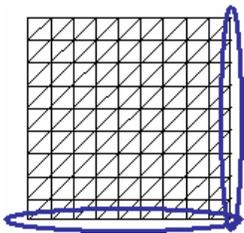


Figure 33 - la dernière ligne et la dernière colonne de la matrice MNT ne sont pas prises en compte pour la détermination du nombre de triangles créés.

Donc, en procédant de façon algorithmique et avec les considérations définies dans l'annexe : A propos de Yav++ (exemple d'un .tr) nous complétons un fichier vide comme ceci :

```
fichier = fichier vide
nbLignes = nombre de lignes (défini dans l'en-tête de z3d.do)
nbColonnes = nombre de colonnes (défini dans l'en-tête de z3d.do)
taille = nbLignes x nbColonnes
nbsommets = taille
fichier <= nbsommets
pour m de 0 à nbColonnes-1 faire :
  pour n de 0 à nbLignes-1 faire :
    convertir donnée.do en cote (ascii <= little endian binaire <= big endian binaire)
    fichier <= m x cste n x cste cote (cste permet de rétablir l'échelle dans le plan)
```

```
fin pour
fin pour
fichier <= [taille - nbLignes - (nbColonnes - 1)] x 2
pour s parcourant tous les sommets sauf ceux de la dernière ligne faire :
  si s n'est pas un sommet de fin de ligne faire :
    fichier <- s s+1 s+nbColonnes
    fichier <- s+1 s+1+nbColonnes
    s+nbColonnes
  fin si
fin pour
```

Si nous reprenons une représentation 2D, nous comprenons mieux le choix des indices :

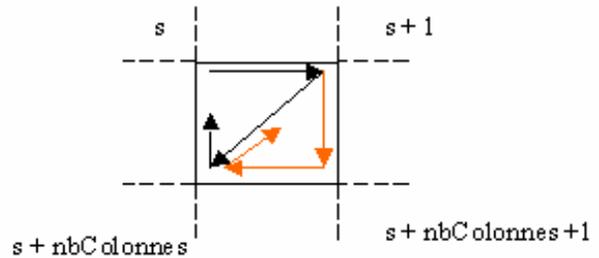


Figure 34 - Les triangles sont indexés dans le sens des aiguilles d'une montre. D'une ligne à l'autre il suffit d'ajouter le nombre de colonne à l'indice courant.

Voici le résultats :

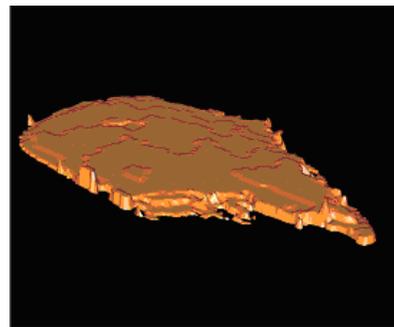


Figure 35 - Visualisation avec Yav++ de l'acquisition par stéréovision de la face supérieur du chopper.

D'un point de vue esthétique, il est remarquable comme Yav++ est un outils satisfaisant. Les multiples représentations possibles (fil de fer, triangles, lissé) sont très agréables à manipuler : sélection d'un vertex, plans de coupes, etc. [GUI 04].

L'information géométrique, lors du passage de Matlab à Yav++ grâce à notre programme est totalement conservée. Nous pouvons constater les

mêmes escaliers, les mêmes pics d'interpolation (cf. figure suivante) et la même chute brutale du relief sur les bords de l'objet.

Mais si Yav++ conserve les données, il ne les améliore pas non plus !

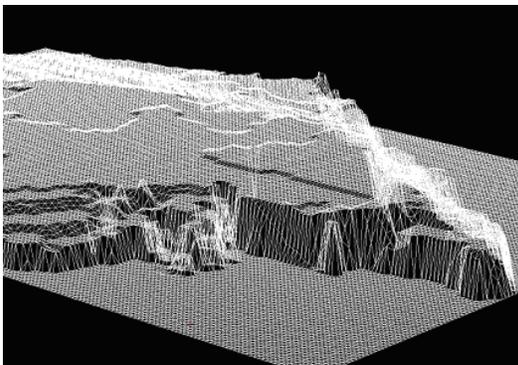


Figure 36 - Visualisation avec Yav++, sous forme de maillage, de l'acquisition par stéréovision de la face supérieure du chopper (détail).

Conclusion :

Voyons tout de suite le problème de "faisabilité" d'une telle expérience sur un terrain de fouilles archéologiques.

Il est facile de comprendre que le système que nous avons utilisé pour cette première acquisition n'est pas transportable. De part sa taille et à cause de l'étalonnage prenant en compte le mouvement des caméras qu'il serait complexe d'exécuter à chaque fois : c'est un **système immobile**.

Mais, l'ENSEEIHHT possède un modèle réduit de NOISIV.



Figure 37 - Modèle réduit de N.O.I.S.I.V. utilisé par les étudiants lors des travaux pratiques.

La différence entre les deux modèles réside dans la qualité des instruments utilisés et la mobilité des caméras. Dans le petit système, **les caméras sont immobiles** et il ne possède pas

d'éclairage propre. Néanmoins sa taille permet très aisément de le transporter. Le seul soucis étant d'effectuer le calibrage des modèles de caméras entre chaque transport. On peut facilement imaginer un programme automatique permettant une telle chose. Il est ensuite facile d'ajouter un éclairage et d'utiliser ce système sur le terrain. A condition qu'il ne soit pas heurté.

Voyons en les avantages et les inconvénients principaux :

Les **avantages** que nous pouvons relever sont les suivants :

- le système (dans son modèle réduit) est **portable et très simple à réaliser**. De nombreux laboratoires conçoivent d'ailleurs souvent leur propre banc d'acquisition stéréoscopique pour s'affranchir des tarifs d'un scanner, déposant ainsi de nombreux brevets. L'immobilité requise pour éviter le re- calibrage reste pourtant un problème.
- la rapidité d'acquisition (40 secondes) est remarquable

Les **inconvénients**, importants, sont :

- L'acquisition uniquement de la surface. Cela pourrait-être intéressant dans la mesure où la précision serait grande, mais ce n'est malheureusement pas le cas. Le recalage des surfaces supérieure et inférieure peut être envisageable, mais compte tenu de nos résultats, il nous semble raisonnable de dire que le jeu n'en vaut pas la chandelle ;
- L'occultation de certains détails, pour des objets comprenant des creux, rejoint la remarque précédente ;
- Les problèmes de saturation, créant des pics négatifs, ainsi que les problèmes de bord, ne sont pas à prendre en compte, une rectification manuelle peut immédiatement les supprimer et pour gêner l'information : elles n'entrent pas en compte dans notre comparaison (ce sont des outliers) ;
- La précision des texture est quasi-nulle. On ne constate que très peu de reliefs : des escaliers grossiers, sans parler des éclats de l'outils, qui, se trouvant sur la tranche, n'apparaissent pas. Hors contexte, nous irons jusqu'à dire que cet objet 3D est méconnaissable, ce qui est justifié (l'expérience à été faite).

Il apparaît donc que , malgré certains atouts de portabilité, un dispositif de stéréovision similaire à celui auquel nous avons eu accès n'est pas une solution viable.

3.3.2. Scanner Tomographique Médical (scanographe)

L'introduction suivante est extraite du site Internet : www.radiologie.hcuge.ch, département de radiologie des hôpitaux de Genève :

"Le scanner utilise la propriété des rayons X d'être absorbés de façon différente suivant les tissus qu'ils traversent. Cette différence d'absorption peut être mesurée par une cellule photoélectrique ou détecteur. Les informations sont ensuite utilisées pour reconstituer une image du corps selon la densité d'absorption aux rayons X grâce une série de calculs basés sur la Transformée de Fourier.

*On parle alors de Tomographie d'ou le nom CT qui signifie en anglais **Computed Tomography**.*

Le déplacement du patient au milieu de la machine permet la réalisation d'images constituées d'autant de pixels que de calculs de densité.

Deux facteurs caractérisent la tomodensitométrie ou scanner
 - *La résolution spatiale est définie par la possibilité de visualiser des détails de petites dimensions. Elle dépend de la finesse du faisceau de rayons X, de la qualité des détecteurs et de l'informatique de traitement des informations. L'unité de définition est le pixel.*

- *La résolution de densité d'un scanner est le pouvoir discriminatoire de la machine pour différencier deux structures voisines de coefficients différents d'atténuation aux rayons X. Ces coefficients d'absorption sont fonction de la masse atomique des constituants du pixel."*

Note : Les différents paragraphes et images qui suivent sont issus de [BACH et al.]

Fonctionnement

Précisons tout d'abord que le scanner à rayons X a plusieurs dénominations: scanner X, scanographe, scanneur, tomodynamomètre..., et en anglais computerized tomography (C.T.).

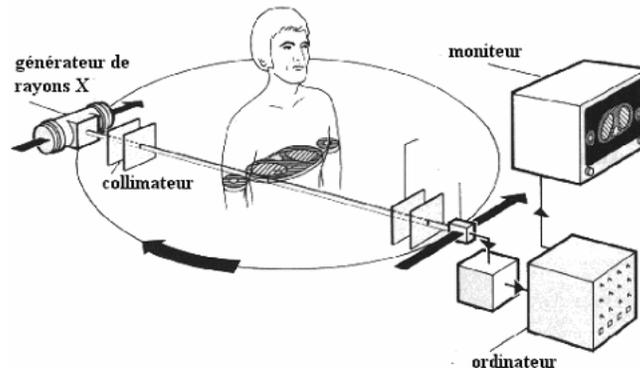


Figure 39 - Schéma global du fonctionnement d'un scanner tomographique.

Le scanner X est apparu à la fin des années soixante. L'idée initiale vient de deux médecins: le Dr Oldendorf et le Dr Ambrose, et le premier prototype industriel fut réalisé en 1968 par G.N. Hounsfield, ingénieur de la firme E.M.I., qui reçut le prix Nobel en 1979.

En radiologie classique, le faisceau de rayon X projette sur une plaque radiographique les ombres des organes traversés en les confondant. Les zones entourées par des tissus plus denses (comme les os) ne sont donc pas visibles. Le scanner X pallie à cet inconvénient. Son principe est en effet de choisir un plan de coupe et d'effectuer de multiples projections sous différents angles afin de connaître le coefficient d'atténuation en chaque point du plan.

Principe du scanner X :

Les rayons X sont atténués par les milieux biologiques traversés suivant une loi exponentielle tenant compte de l'absorption photoélectrique et de la diffusion par effet Compton. Soit I_0 le flux incident de rayons X pénétrant suivant l'axe x un milieu hétérogène de coefficient d'atténuation $\mu(x)$, et I le flux émergent, nous avons la relation suivante :

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\int \mu(x) dx\right)$$

Figure 38 - Formule d'absorption des rayons X par les milieux biologiques.

Le scanner X est basé sur la mesure des différents coefficients d'absorption des tissus traversés par un faisceau de rayons X. Chaque tissu a son coefficient d'absorption propre qui dépend de la densité du tissu et de l'énergie du faisceau du rayon X le traversant.

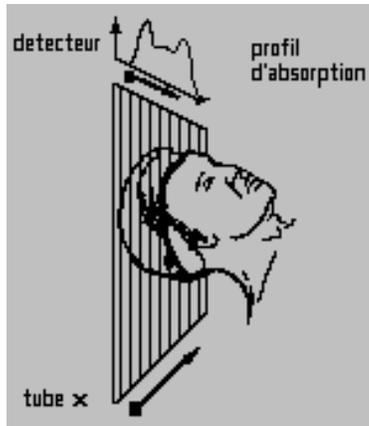


Figure 40 - La réalisation d'un scanner X nécessite un émetteur de rayons X et un détecteur qui lui est solidaire.

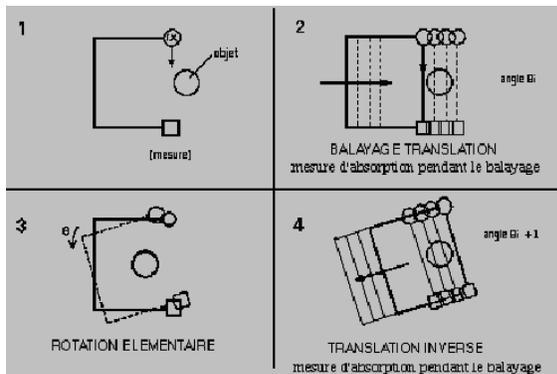


Figure 41 - En animant simultanément d'un mouvement de translation le faisceau de rayons X et le détecteur, on connaît les projections des coefficients d'absorption en plusieurs points pour un angle donné par rapport à l'objet. Ensuite on fait tourner le système de quelques degrés, et on recommence une série de mesures lors de la nouvelle translation. Cette opération est répétée sur 180 degrés, et la connaissance des profils d'absorption suivant les différents angles permet de calculer la valeur de l'absorption en chaque point du plan.

C'est un ordinateur qui se charge des calculs et qui reconstitue une image plane numérique en donnant à chaque pixel un niveau de gris correspondant au coefficient d'absorption.

Evolutions technologiques :

Les systèmes tomodensitométriques ont beaucoup évolué depuis le premier prototype, constitué uniquement d'un tube à rayons X et d'un détecteur entre lesquels était placé le patient.

Dans les scanners de deuxième génération, au lieu d'envoyer un pinceau de rayons X vers un

seul détecteur, le tube envoie un faisceau plus ouvert capté par plusieurs détecteurs. Ceci permet par rapport au premier prototype de réduire le nombre de déplacements de l'ensemble tube+détecteur lors des translations mais aussi de réduire le nombre de pas angulaires. Ceci s'est traduit par une amélioration de la vitesse de balayage.

La troisième génération vit la translation disparaître, la barrette détectrice étant suffisamment longue pour accepter tout le champ de mesure et tournant de façon synchrone avec le tube à rayon X.

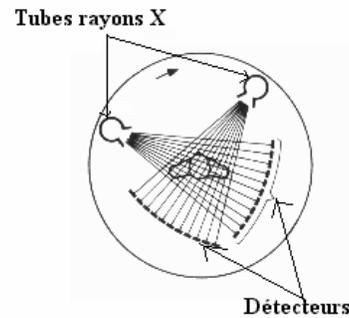


Figure 42 - Scanographe troisième génération : disparition de la translation grâce à la largeur de la barrette de détecteurs.

Toujours afin de réduire les temps d'acquisition et d'améliorer la qualité des images, de nouveaux scanographes utilisant des chaînes de détection à multi-détecteurs ont fait leur apparition. C'est le cas pour les scanners X de la quatrième génération : Le tube tourne seul dans une couronne comprenant de nombreux détecteurs fixes (de l'ordre de 800 à 1000).

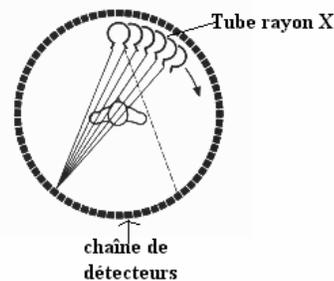


Figure 43 - Scanners tomographiques de quatrième génération : la barrette de récepteurs ne tourne plus mais encercle complètement l'émetteur.

De nouvelles technologies sont apparues récemment. On est actuellement à la cinquième

génération de scanners X. Afin de réduire l'effet de pénombre par une meilleure focalisation et augmenter la distance patient-tube, cette nouvelle génération place le tube à rayons X en dehors de la couronne, cette couronne est animée d'un mouvement de nutation, les détecteurs proches du tube s'effaçant pour laisser passer le rayonnement incident.

On peut pousser encore plus loin cette technique et obtenir des images en trois dimension : ce sont les scanographes à acquisition hélicoïdale rapide. Cette technique requiert un scanographe à rotation continue et rapide de la source radiogène ainsi qu'un puissant multiprocesseur qui assure simultanément des tâches d'acquisition, de reconstruction et de visualisation. A la suite d'opérations d'interpolation, le processeur reconstruit une série de coupes axiales qui présentent entre elles un certain degré de chevauchement. C'est ce type de scanographe que nous avons utilisé.

Applications médicales – Avantages et inconvénients du scanner X :

Le scanner X a été longtemps confiné aux examens cranio-cérébraux mais il est désormais utilisé dans de nombreux secteurs de la médecine: pathologie cranio-encéphalique, pathologie ophtalmique et faciale, examen de l'abdomen et du thorax, examen des poumons et du médiastin.

Ses indications médicales et ses résultats demeurent très larges mais il est de plus en plus concurrencé par l'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM). Leurs caractéristiques sont comparativement les suivantes :

Scanner rayons X : radiations ionisantes, mise en rotation de l'appareillage, résolution spatiale fixée par les détecteurs, acquisition en quelques secondes. Fournit une carte anatomique avec effet de masque osseux

IRM : champ électromagnétique, appareillage sans éléments mobiles, résolution spatiale fixée par le temps de mesure, acquisition en quelques minutes. Fournit une carte anatomique et chimique avec transparence du squelette.

Les conditions d'acquisition :

Un scanographe à acquisition hélicoïdale assure donc une représentation directement en trois dimensions de l'objet. C'est un outil remarquablement intéressant pour notre étude. Le niveau de définition qu'il offre nous permettra de posséder de modèles de référence.

Nous n'utiliserons pourtant pas l'avantage incontournable du scanner X : sa possibilité de "voir" l'intérieur des objets. Les outils paléo-anthropologiques ne nécessitant qu'une acquisition de surface 3D, les données internes des moulages (les moulages sont creux comme nous le verrons) sont un surplus d'information gênant.

D'un point de vue pratique, l'acquisition s'est déroulée à l'hôpital de Toulouse Purpan, grâce à M. Pierre PAYOUX, chercheur au centre d'imagerie médicale du CHU de Rangueil.

Les scanners X de l'hôpital sont évidemment, et heureusement, utilisés en priorité pour traiter les patients. Dans quelle mesure pouvions-nous donc exécuter une telle entreprise ?

Le centre d'imagerie médicale travaille en partenariat avec l'IRIT dans de nombreux projets. Intéressé par notre suggestion d'acquisition, M. Pierre PAYOUX s'est montré prêt à assurer la numérisation. Nous l'avons donc rencontré à la faculté de médecine et lui avons confié les moulages du Chopper (644) et du Chopping Tool (1279). En effet, comme nous l'expliquera plus tard le responsable du département à l'hôpital, le budget qui est consacré aux scanner X par l'hôpital est calculé sur une base quotidienne. C'est donc en dehors des heures de travail conventionnelles, et prenant sur son temps personnel, que M. Pierre PAYOUX a utilisé pour nous le scanner.



Figure 44 - Un scanner X Siemens Somatom du type de celui utilisé à Toulouse.

Les outils furent disposés dans le scanner sur une couverture afin d'être correctement orientés. Puis, les données obtenues furent enregistrées sur le réseau "imagerie" de l'hôpital. C'est là que nous les avons extraites en format DICOM par le logiciel DCMdll.V21 (cf. Annexe : A propos de DICOM) et gravées sur un CD-ROM.

Cette phase dura toute une journée. Il fallu en effet que nous prenions connaissance des stations

de travail (fort diverses d'ailleurs) et de la façon de les utiliser, de même avec les logiciels médicaux.

La conversion de ces coupes (*slices* en anglais) à ensuite été réalisé à l'IRIT, grâce à des logiciels mis à notre disposition (cf. Annexe : A propos de DICOM) et un petit programme en perl.

Résultat et conversion

Après cette seconde acquisition, nous n'avons pas pu visualiser directement les fichiers obtenu. Il a été nécessaire de les convertir, d'abord sous un format visualisable par Yav++, puis sous forme de triangulation.

Images en coupes :

Les formats DICOM se présentent sous forme d'images 2D correspondant au différentes couches d'acquisitions. Il y a donc une image 2D par unité de définition en z.

Nous pouvons lire l'en-tête d'un fichier des image DICOM (cf. Annexe : A propos de DICOM) et y lire les information suivantes :

Pour le Chopper :

- Acquisition Date=20040513
- Acquisition Time=192630.00
- Rows=512
- Columns=512
- Pixel Spacing= 0.3008 0.3008

Pour le Chopping Tool :

- Acquisition Date=20040513
- Acquisition Time=191955.00
- Rows=512
- Columns=512
- Pixel Spacing= 0.2734 0.2734

Les images définies sur 512 par 512 pixels ont une définition de 0.3008 mm ou de 0.2734 mm. Ce qui est remarquable.

Le nom des images va de :

Pour le Chopper : **s151i60326_1.dcm** à **s151i60514_1.dcm** soit 188 images.

Pour le Chopping Tool : **s151i61087_1.dcm** à **s151i61226_1.dcm** soit 139 images.

Avec toutes ces informations, il devient assez aisé d'effectuer la conversion du format DICOM au format INR en exécutant un petit programme selon la démarche suivante (cf. Annexe : A propos de yav++, A propos de DICOM et MakeInrimage):

- conversion de chacune des coupes en un format reconnu par yav (.jpg) : en exécutant dicom2jpg ;

- création d'une nouvelle en-tête inrImage à partir d'une ancienne et la combler de caractères jusqu'à ce qu'elle fasse 256 octets ;

- concaténer les images (par paquets de 10) dans un fichier tmp puis concaténer ces paquets ;

- renommer le fichier final en .inr.

A cela nous pouvons ajouter une fonctionnalité qui permet de décimer en trois dimension : ne pas prendre en compte toutes les coupes, mais seulement une sur deux par exemple, ce qui permet de réduire la quantité d'information à afficher, donc le temps de calcul.

Nous pouvons ensuite visualiser le résultat avec Yav++ :

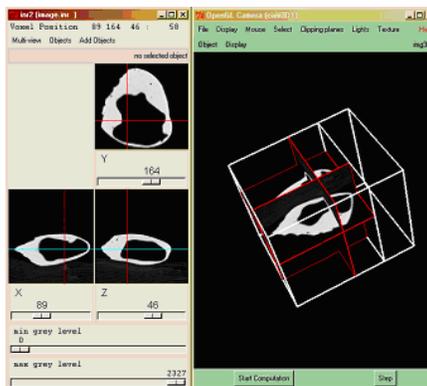


Figure 45 - visualisation des images de coupes scannographies du chopping tool.

Ce logiciel permet de parcourir les coupes aussi bien en deux qu'en trois dimensions. Nous pouvons donc déjà avoir une perception cohérente de notre objet. Avant d'analyser ce premier résultat, notons que certains modes de couleurs permettent une meilleur visualisation que d'autres.

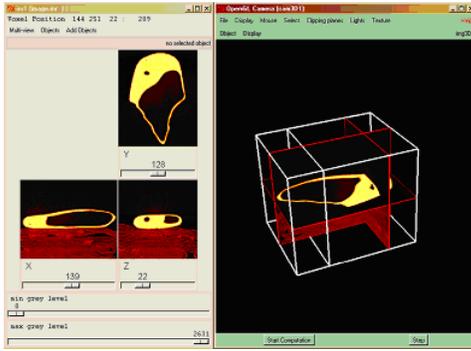


Figure 46 - Des couleurs de type image TEP font apparaître la couverture sur laquelle reposait le moulage lors de l'opération.

Visualisation d'un format médical :

Le format .inr de type médical est très intéressant dans le cadre de l'étude interne des numérisation, c'est d'ailleurs sa première utilité. Une image scanographique, IRM, TEP, etc, n'est pas une image de surface, comme l'est la stéréoscopie, elle permet d'examiner l'intérieur d'un corps humain, et par extension de tout type de matière perméable à différents degrés vis-à-vis des rayons X.

Or, notre étude n'est pas d'examiner la constitution interne des outils à notre disposition, mais uniquement leur surface. Une telle étude (constitution interne) est envisageable, mais la roche utilisée étant généralement très siliceuse, sa compacité génère des problèmes d'acquisition en créant des artefacts visuels (cf. Colloque de l'université de Liège (2001) :

<http://www.isi.uu.nl/People/Frans/baris1049.pdf>). De plus nous ne disposons pas du matériel original, mais uniquement de moulages dont juste la surface est fidèle au modèle.

Donc, cet aspect remarquable du scanner X se révèle totalement inutile. Nous pouvons même dire qu'il devient gênant : les moulages sont creux, et lors de l'extraction d'isosurfaces pour former des triangulation, nous allons extraire les surfaces internes qui ne comportent aucun intérêt, donc un surplus d'information.

Néanmoins, nous pouvons profiter de l'aspect "coupe" de ces formats médicaux, ce qui n'est plus évident avec une triangulation, pour observer les tranchants de l'objet.

Visualisation d'une triangulation :

Yav++ permet d'effectuer de façon quasi immédiate le passage d'un format de type inr à un

format de type triangulation (.trian ou .tr), en effectuant une extraction d'isosurfaces.

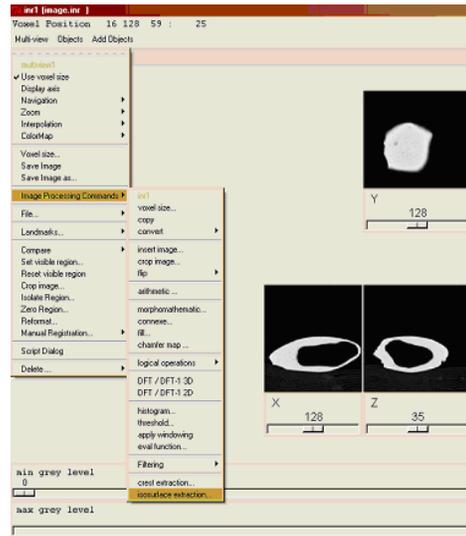


Figure 47 - Menus déroulants de Yav++.

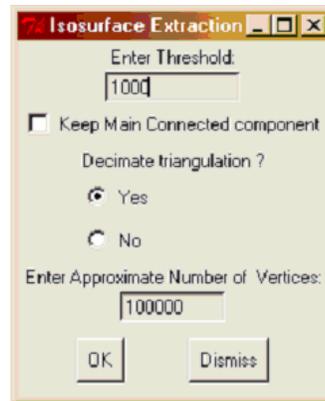


Figure 48 - Fenêtre de dialogue des paramètres d'extraction d'iso surfaces.

Il suffit de définir deux paramètres :

- le seuil (niveau de gris) sur lequel va être construit la surface : nous choisissons 1000 car cela semble correspondre au niveau discriminatoire entre l'intérieur et l'extérieur de l'objet ;

- le nombre approximatif de sommets de la triangulation obtenue. Notons là qu'il est évident qu'en dessous d'une certaine valeur, la triangulation devient trop grossière et que le résultat est inexploitable, mais qu'au dessus d'un certain seuil, des sommets sont inutiles et n'ajoutent plus d'information. Il est nécessaire aussi de prendre en compte la capacité de calcul de l'ordinateur utilisé. Au dessus de 100 000

sommets, le calcul devient "exigeant".
Cependant, entre 100 000 et 250 000 sommets,

les résultats sont satisfaisants, parfaitement exploitables et sans surplus d'information.

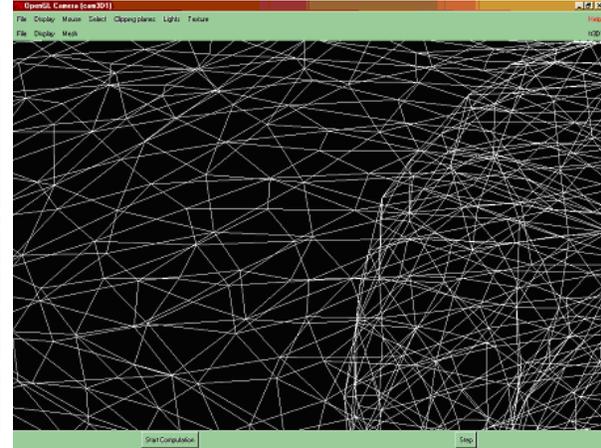
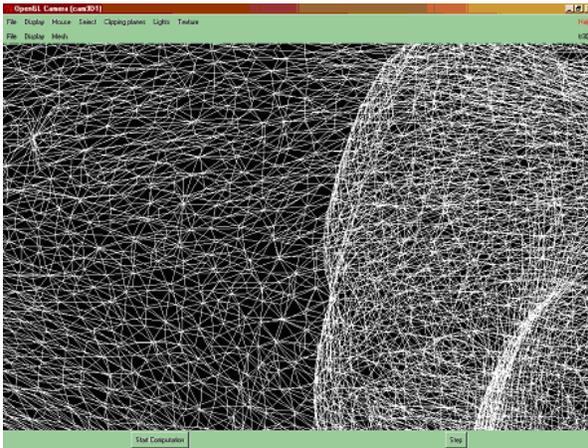


Figure 49 et Figure 50 - Maillage d'une triangulation à environ 200 000 sommets et maillage d'une triangulation à environ 50 000 sommets.

Voici les résultats :

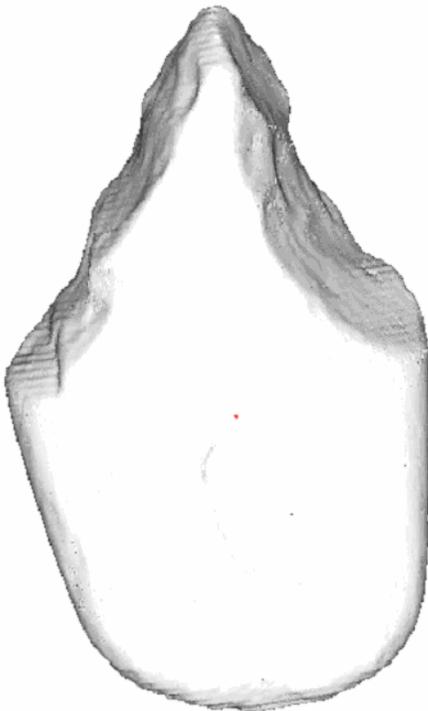


Figure 51 - Modèle 3D du chopper 644 à partir d'une acquisition scanographique de type médicale. Environ 200 000 facettes.

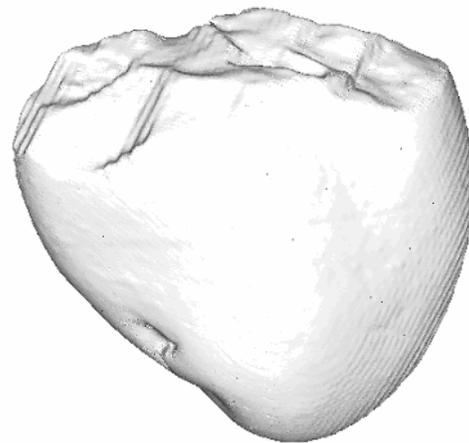


Figure 52 - Modèle 3D du chopping tool 1279 à partir d'une acquisition scanographique de type médicale. Environ 200 000 facettes.

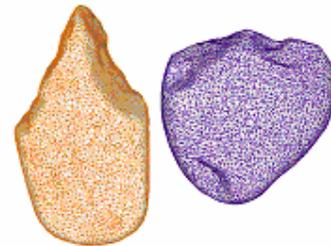


Figure 53 - chopper 644 et chopping tool 1279.

Texture :

De part leur nature d'image scanner, les acquisitions précédentes ne présentent pas de texture de surface, mais notre étude est plus centrée sur les défauts de volume que de texture. Il est toujours envisageable, pour améliorer le rendu visuel, de plaquer la texture 2D d'une photo.

Acquisition de coupe :

Malgré la précision des résultats, nous constatons un défaut qui ne pourra sûrement pas être négligé par la suite : la création d'escalier sur les surfaces orthogonales au plans de coupe.

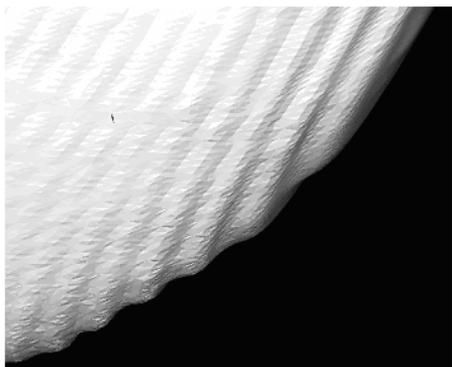


Figure 54 - Détail du modèle 3D de chopper par scanographie : il apparaît des marches d'escalier.

L'interprétation nécessite donc un mode de vue lissé de l'acquisition, qui a le mérite d'effacer ces "escaliers", mais efface les tranchants des éclats, ce qui n'est pas dans notre optique.

Conclusion :

Après cette numérisation, voyons-en ses avantages et ses inconvénients principaux :

Premièrement, l'accès aux scanographes en très limité, et cette expérience n'a pu être réalisée que grâce à M. Pierre PAYOUX.

Ensuite, il n'est évidemment pas envisageable d'apporter un tel matériel sur un chantier archéologique. Rappelons qu'il existe des systèmes similaires dans l'industrie, mais, là aussi, ce sont des appareils de grande taille dont l'utilisation reste extrêmement onéreuse.

Enfin, les "marches d'escaliers" dues aux couches du scanner sont, malgré leurs faibles proportions à une résolution maximale, désavantageuses pour l'étude des outils préhistoriques.

L'avantage incontournable du scanner médical est l'obtention quasi-immédiate de la 3D, et le nombre incalculable d'outils pour manipuler de telles données.

Même si dans notre cas cela n'a aucune importance, nous nous devons de citer l'atout principal du scanner : la visualisation de l'intérieur des objets.

Mais l'avantage que nous considérons le plus remarquable est le fait de pouvoir extraire des formats .inr une triangulation comportant un nombre choisi de facettes. Il devient possible d'adapter cette quantité au modèle scanné !

3.3.3. Scanner laser Cyberware

Conformément à nos souhaits, nous avons effectué l'acquisition des moulages par un système Cyberware. Cela en référence aux travaux fait par le 3D Knowledge et l'Université de l'Etat d'Arizona (ASU).

Le modèle 3030 que nous avons utilisé permet d'acquérir simultanément, en une trentaine de secondes, le volume et la couleur à une précision d'un millimètre.



Figure 55 - Scanner Cyberware 3030.

D'application principalement industrielle, ce système est relativement répandu dans le monde pour beaucoup d'autres utilités (biologie, archéologie, etc), mais peu en France malgré tout. C'est donc difficile que nous avons localisé un dispositif Cyberware. Pour cela nous avons du contacter Mme Sue Addleman, la responsable commerciale de l'entreprise, entreprise basée en Floride mais dont le seul distributeur Européen se situe en Angleterre.

C'est de cette manière que M. Yanick ROGER à accueilli M. Gérard SUBSOL dans la société Saint-Gobain Desjonquères : une fabrique de flacons de parfum. Le scanner est utilisé pour le "reverse engineering", dans l'étude des designs.



Figure 56 - Exemple des travaux réalisés à Saint Gobain Desjonquères.

Fonctionnement

Généralités :

Comme décrit dans la partie 2.3.2., ce scanner laser est constitué d'un laser basse densité, d'un miroir de quartz (permettant la création du faisceau laser plan) et d'une caméra CCD.

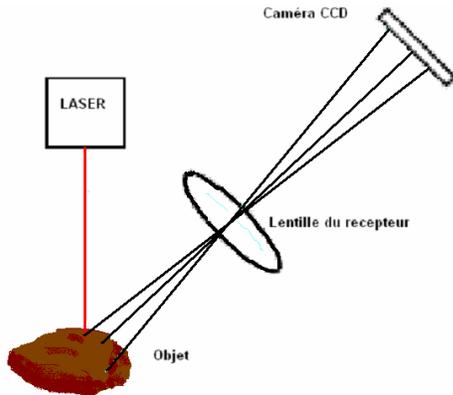


Figure 57 - Schéma simple du fonctionnement du scanner laser.

La distance entre un point de référence et le point de réflexion du faisceau provenant de l'objet permet de calculer l'éloignement de l'objet. Les surface diffuse sont donc une source de problèmes.

Surfaces spéculaires et surfaces diffuses :

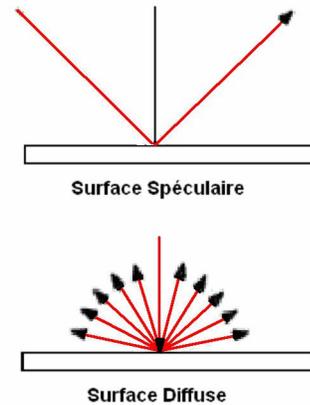


Figure 58 - Il existe deux types de surfaces : spéculaire : le rayon incident est réfléchi dans une unique direction, et diffuse : le rayon incident est réfléchi dans toutes les directions.

Si le signal laser émis est trop faible, aucun point ne sera réfléchi en direction de la caméra CCD, donc ne sera perçu. A contrario, si le signal laser émis est de trop forte intensité, le récepteur sera saturé est, ici aussi, aucun point ne sera perçu (ou, comme nous le verrons plus tard, le rapport signal sur bruit deviendra trop faible). Pour une surface diffuse, l'acquisition de données est donc très compromise.

Diamètre du Laser :

Un autre aspect conditionnant les résultats est le diamètre du laser : un relief de taille inférieure au laser ne sera pas pris en compte.

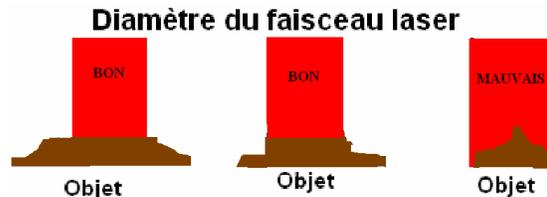


Figure 59 - Selon le diamètre du faisceau laser, certain détails ne seront pas considérés.

Le laser du Cyberware 3030 a un diamètre de environ 0.1 mm, la précision résultante (d'après les spécifications techniques) est de 500 µm à 2 mm en x (la vitesse de rotation de la table tournante influant) et de 313 µm en y (fixé par la caméra CCD).

La matrice CCD :

En deux dimensions, la matrice de la caméra peut être représentée par une barrette de longueur

X éléments ($X = 128, 256$, selon le modèle) dont la valeur dépend de l'intensité du signal reçu. La position du spot laser est ensuite déterminée par seuillage.

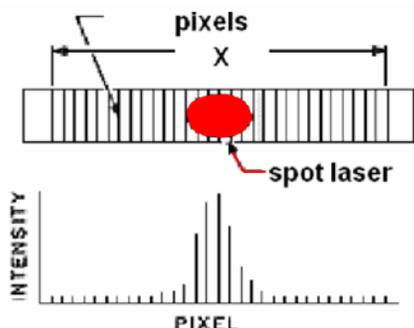


Figure 60 - La présence du spot laser dans la matrice de la caméra CCD crée un pic d'intensité.

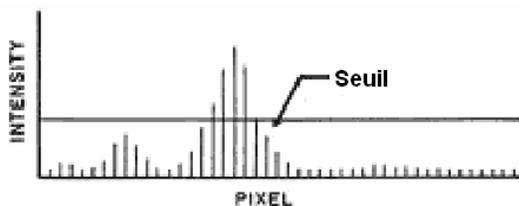


Figure 61 - Un seuillage permet d'isoler le pic du spot laser d'éventuels pic de bruit, par exemples dus à une surface diffuse.

Numérisation :

D'un point de vue pratique, l'objet est disposé sur une table tournante intégrée au scanner, dont la position de l'angle de rotation lui est communiquée. Ainsi, le faisceau va parcourir l'objet dans ses deux dimensions x (la table tourne) et z (le laser balaye l'objet). La texture est également acquise en chaque point par la caméra.

Triangulation :

La méthode précise de triangulation nous est inconnue. Cependant, en examinant les fichiers ascii des acquisitions et au vu de notre travail de conversion en .tr des données de l'ENSEEIH, nous pouvons identifier la même technique primaire :

```
58770 58771 58592
58592 58771 58593
58771 58772 58593
58593 58772 58594
58772 58773 58594
```

Les sommets sont donc considérés comme étant les points juxtaposés d'une matrice et les triangles formés de la façon suivante :



Figure 62 - Méthode de triangulation des modèles 3D par acquisition Cyberware.

Nous pouvons affirmer que cette triangulation n'est pas adaptée. En effet, pour une surface relativement plane, les triangles auront une forme homogène, mais pour des reliefs complexes, comme nos moulages le présentent, les triangles vont démesurément s'allonger et fausser les informations de tangente, normale, lumière, etc.

Resultats et conversion

Les numérisation effectuées par scanner Cyberware sont exportées dans un format particulier : .ply. (cf. annexes)

Nous avons volontairement reproduit tel quel le format binaire dans les annexes, pour illustrer la difficulté de lecture d'un tel format. De plus, comme le précise l'en-tête (deuxième ligne), le fichier est en big-endian (l'acquisition s'est faite sur une station de travail SUN).

Il nous a donc fallu convertir ce fichier de big-endian en little-endian, et de binaire en ascii, comme nous avons procédé pour les .do de Matlab. (cf. annexes : ply2ascii.cpp)

Mais compte tenu des problèmes de triangulation expliqués précédemment, nous avons préféré conserver uniquement une liste de points. Nous ne pouvions donc pas former un .tr complet !

Autres programmes :

Entre temps, nous avons réussi à obtenir par Internet une série de programmes de conversion intéressants, proposés par la société Headus. Ces programmes, une fois compilés, permettent la conversion des .ply dans de nombreux autres formats : .obj, .ascii, .wrl, etc. (ces formats sont détaillés en annexe) Cela nous a énormément facilité le travail, même si nous avons pu vérifier que notre programme ply2ascii.cpp était parfaitement correct.



Figure 63 - Les programmes de conversions de formats .ply utilisés.

En entreprenant des recherches pour la troisième phase de notre stage (paragraphe 4.) nous avons également trouvé un logiciel libre de recalage en trois dimensions : Scanalyze (que nous détaillerons au paragraphe 4.3.), qui utilise uniquement des .ply. Ainsi nous avons pu afficher nos résultats (ici le scan2.ply, dos du moulage de Chopper 644) :

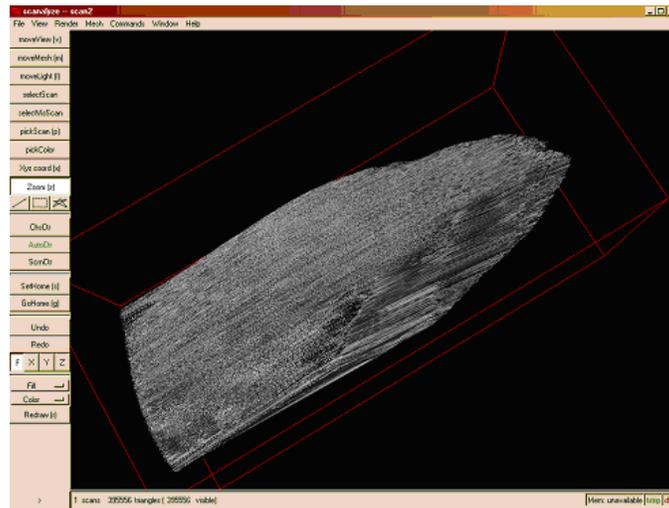


Figure 64 - Le scan2.ply, dos du moulage de chopper 644 visualisé par Scanalyze. On y constate les erreurs de triangulation.

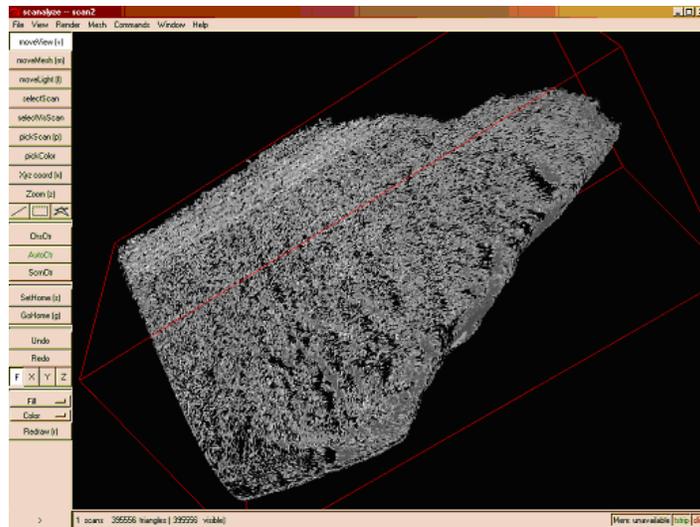


Figure 65 - Le scan2.ply, dos du moulage de chopper 644 visualisé par Scanalyze en mode point. On constate que l'acquisition est bonne.

Lors de la troisième phase de notre stage, nous avons finalement travaillé avec un outils plus complet que Scanalyze : RapidForm, de la société Inus Technology. Cela nous a permis, outre le travail de recalage et de comparaison, d'afficher

les acquisition Cyberware avec plus de détail : les textures notamment (toujours le scan2.ply, dos du moulage de Chopper 644 et le) :

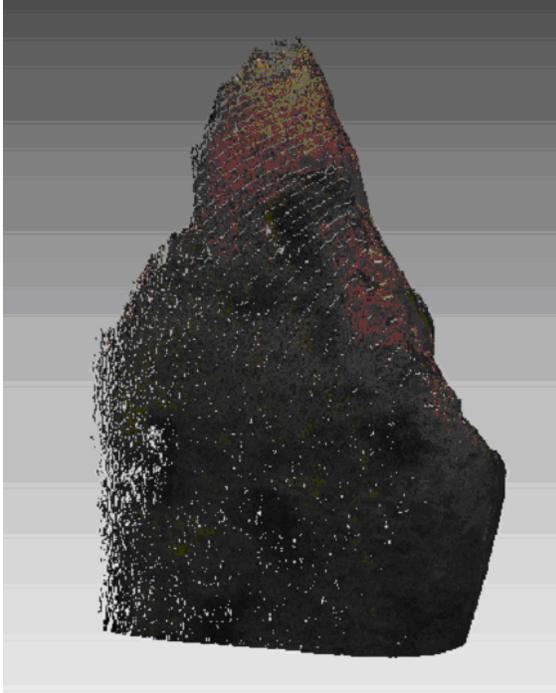


Figure 66 - Le scan2.ply, dos du moulage de chopper 644. Le texture à base de points apparaît.

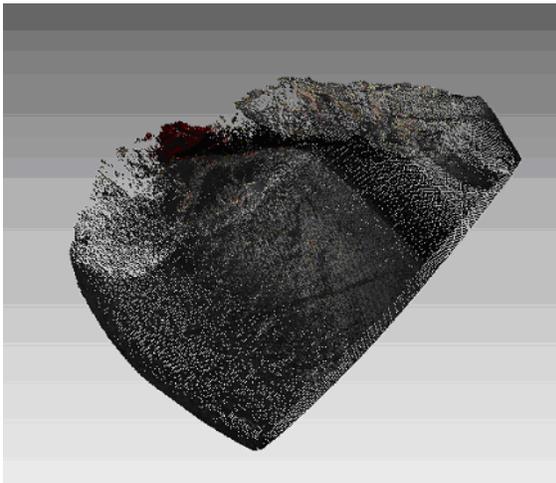


Figure 67 - Le scan5.ply du moulage de Chopping tool 1279. Le texture à base de points apparaît.

Acquisition incomplète :

Il est tout de suite remarquable que ces acquisitions ne font pas figurer l'ensemble des objets. Ceci n'est en aucune manière préjudiciable à notre étude, car les parties les plus intéressantes des outils figurent tout de même : le tranchant et ses arêtes.

Il est également saisissant de constater le témoignage du déplacement du laser sur ces

images : les spirales concentriques sur lesquelles les points s'alignent.

Pour des raisons qui nous sont inconnues, la texture de certaines zones de ces modèles est saturée : en rouge sur l'image précédente.

Conclusion :

Après cette numérisation, voyons-en ses avantages et ses inconvénients principaux :

La non-portabilité est déjà un point faible en faveur de ce scanner. Toutefois, au même titre que le système des travaux pratiques de l'ENSEEIH, il peut avoir sa place dans un petit laboratoire de campagne.

La triangulation étrange n'est pas non plus une faveur. On peut cependant supposer que ceci est particulier à nos résultats, et, comme nous l'avons vu, la représentation par points est très viable en utilisant un visualisateur performant. De plus, il est toujours possible de construire un algorithme de triangulation pour palier à ce problème. Laissons à d'autres ce travail !

Enfin, les mêmes soucis d'occultation que pour la stéréovision viennent se poser. Mais nous verrons au paragraphe suivant que plusieurs prises de vues différentes résolvent vite cela.

Avantage que nous n'avions pas jusqu'alors : la texture. En supposant que différentes prises de vues viennent aussi résoudre les problèmes de saturation.

3.3.4. Scanner laser portable Minolta

Le dernier système dont nous avons fait l'usage est le scanner laser portable non contact Minolta vi (ou vivid) 900.

Encore une fois, ce dispositif répondait à un besoin de comparaison vis-à-vis des travaux effectués par les américains : l'Archéology Technology Laboratory de l'Université de l'Etat du Dakota du Nord (NDSU). L'ATL avait utilisé un vi 700, nous avons donc déjà dépassé leurs résultats en faisant l'usage du modèle supérieur, le vi 900.

Le travail d'acquisition a été fait dans deux endroits, par deux organismes différents :

- l'entreprise Kallisto : prestataire de service dans la numérisation 3D et distributeur de scanners Minolta ;

- la plate-forme Archeovision du laboratoire Ausonius du CNRS : spécialisée dans l'acquisition

3D de documents archéologiques (cf. paragraphe 2.1.).

Pourquoi utiliser deux fois le même scanner ?

Cette question, posé par M. Loïc ESPINASSE, auxiliaire de recherche à Archéovision, a la réponse suivante :

Jusqu'à maintenant, et même au sein de Kallisto, les acquisitions ont été réalisées par des personnes non sensibles (ou si peu) aux critères archéologiques de nos documents tels qu'ils sont définis au paragraphe 3.2.2. et qui sont pourtant essentiels. Nous ne pouvons pas prétendre faire un travail applicable à l'archéologie si ces données ne sont pas prises en compte. Il était donc intéressant de faire faire ce travail par un expert.

A cela nous pouvons ajouter qu'il arrive que, par inconscience involontaire bien sûr, des dégâts conséquents soient fait sur des documents précieux car leur manipulation n'est pas soignée. A la fin de notre série de numérisation, et malgré toutes les recommandation que nous avons pu donner, les moulages ont subits quelques dégâts qu'il serait inadmissible de constater sur les documents d'origine : texture effacée, éraflures, présence d'une matière blanche sur le tranchant du Chopping tool (cette substance aurait permis au scanner Cyberware de mieux percevoir les détails de cette zone).

Fonctionnement

Le scanner Minolta vi-900, comme le scanner Cyberware (cf. paragraphe 3.3.3.), est un scanner laser. Cependant, le laser du vi est plan, et la méthode d'acquisition est légèrement différente.

La caméra CCD est fixe, par rapport à la source du laser ainsi que par rapport à l'objet, et représente une matrice de pixels. C'est le laser qui va balayer l'objet.

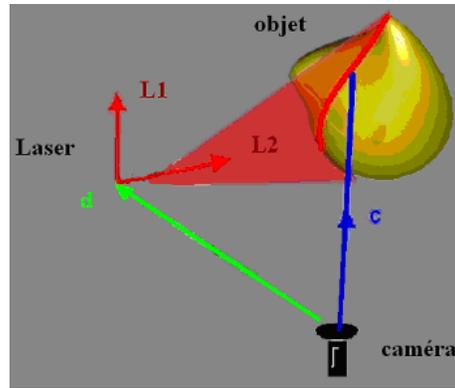


Figure 68 - **C** : vecteur de la caméra ; **d** : position du laser par rapport à la caméra ; **L1, L2** : vecteurs définissant le plan du laser ;

Le principe d'acquisition est le suivant :

- Le laser éclaire l'objet à une position p ;
- La caméra CCD effectue l'acquisition de l'image ;
- Analyse de l'image et détection de la ligne du laser ;

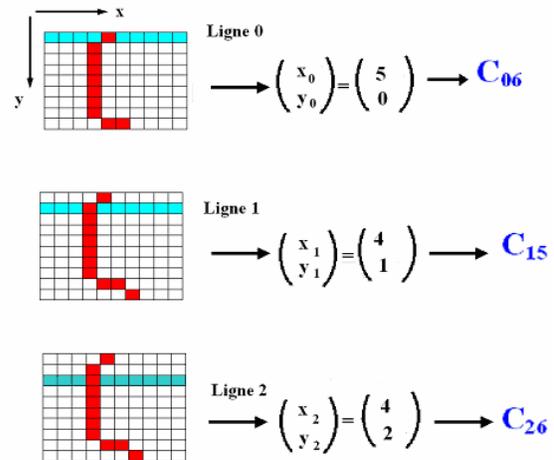


Figure 69 - Localisation des pixels illuminés par le laser.

- Détermination de la position de chaque point de la ligne du laser dans l'espace en résolvant le système à trois équations à trois inconnues (les couleurs ramènent au de la figure 69) :

$$l.C = d + n.L1 + m.L2 ;$$

- Déplacement du laser à la position p+1 ;

- Répétition des étapes précédentes jusqu'à ce que le laser ai parcouru la fenêtre d'acquisition de l'objectif ;
- Extinction du laser ;
- Triangulation du modèle 3D.

Ensuite, la texture est acquise par photographie numérique : cette photographie est replaquée sur le modèle.

Pour finir, la table tournante ne permet pas d'acquérir la dimension en x, ce qui est fait par la caméra CCD, mais assure une **coordination des prises de vues** tout autour de l'objet afin d'en avoir la numérisation dans sa totalité.

Résultats

En entreprise

Kallisto, basée à Fonsorbe (31) à réalisé gratuitement pour nous l'acquisition des deux moulages. L'expérience à duré un après-midi et nous avons pu y assister du début à la fin.

Fixé verticalement avec de la pate à modeler, le scanner va effectuer six prises de vues, la table tournante effectuant une rotation de 60 degrés entre chaque, pour l'objet disposé le tranchant vers le haut, puis six autres le tranchant vers le bas. Les paramètres de la table tournante étant directement communiqués à l'ordinateur auquel est relié le scanner, il ne va plus y avoir pour l'utilisateur qu'à recaler deux prises de vue.

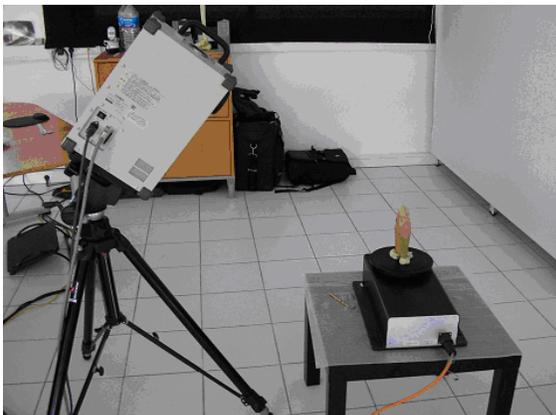


Figure 70 - Acquisition par scanner laser portable non contact Minolta vi-900 avec table tournante à l'entreprise Kallisto.

Ensuite, le travail de traitement informatique des prise de vues a été fait par un employé : M.

Jérôme BARLET. Nous avons récupéré les 3D par l'intermédiaire de leur site ftp.

Le Minolta travaillant avec les logiciels Polygon Editing Tool et, à Kallisto, RapidForm, nous avons récupéré directement les données dans de nombreux formats 3D, et notamment .obj, .wrl et .asc, qui sont les formats que nous avons déjà utilisé pour les données Cyberware.

Les acquisitions sous format wrl sont directement visualisables avec un navigateur web en utilisant un plugin de type Cosmoviewer :

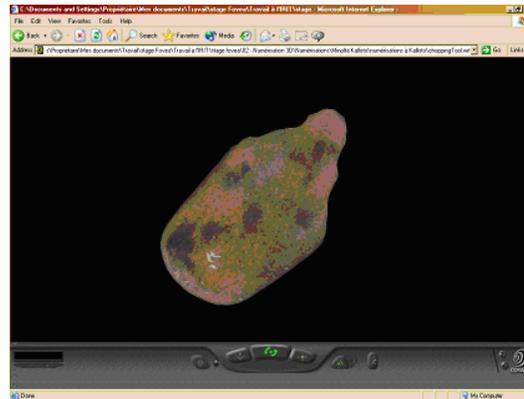


Figure 71 - Visualisation du modèle 3D du chopper 644 scanné à l'entreprise Kallisto avec Internet Explorer en utilisant le plugin Cosmoviewer. On y remarque des trous dans la texture.

Sur la l'image précédente, il apparaît des "trou" de texture. Ceci est du à la saturation : la zone qui apparaît ici en gris n'a pas été numérisée par le scanner car sa surface était trop diffuse, donc le rebouchage a été fait manuellement et, évidemment, le modèle ne comporte pas de texture à cet endroit.

Si l'on ne prend pas en compte la texture, les résultats sont les suivants :

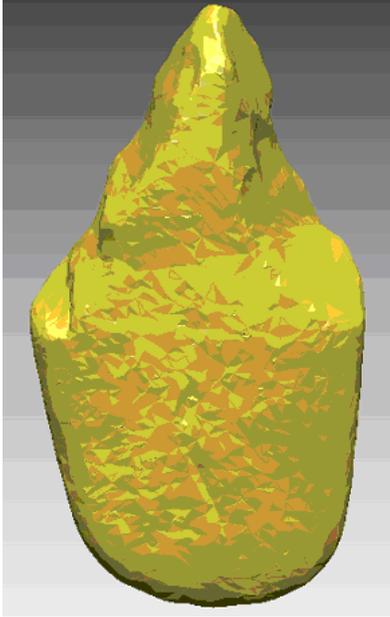


Figure 72 - Modèle 3D par scanner laser Minolta vi-900 à l'entreprise Kallisto : Chopper 644, 4927 sommets.

Le nombre de sommets semble très faible. Nous verrons pourtant que le Minolta est capable d'en acquérir bien plus.

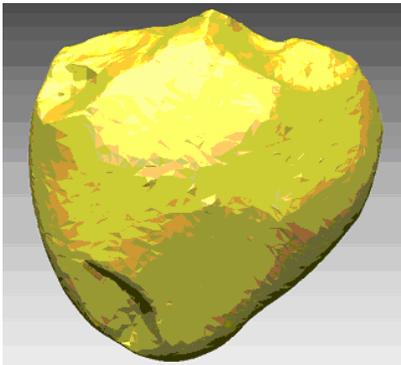


Figure 73 - Modèle 3D par scanner laser Minolta vi-900 à l'entreprise Kallisto : Chopping Tool 1279, 4732 sommets.

En laboratoire

Comme nous l'avons présenté dans le paragraphe 3.1.1., Archéovision est une plateforme de numérisation en trois dimensions spécialisée dans l'archéologie. Nous avons donc pu bénéficier de l'expertise de son personnel, qui est sensible à la valeur archéologique des documents préhistoriques.

Par exemple, M. Loïc ESPINASSE n'a pas utilisé de pâte à modeler pour disposer les moules devant le scanner, mais les a

directement posé sur la table tournante. Les angles d'acquisition étaient plus difficiles à choisir, mais le caractère non-contact du scanner était utilisé complètement. Un autre exemple de cette expertise réside dans l'acquisition détaillée du tranchant : des prises de vues supplémentaires ont été réalisées pour le tranchant des outils, afin de multiplier le nombre de facettes à cet endroit et donc d'acquérir un maximum d'informations.

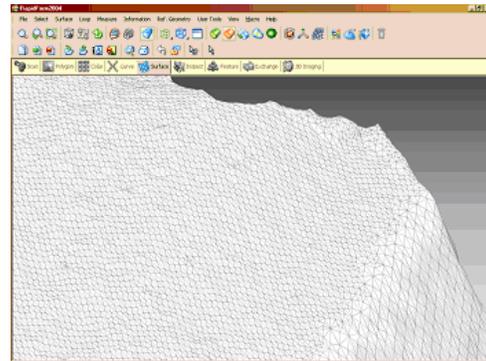


Figure 74 - Visualisation du chopping tool scanner au laboratoire Archéovision (détail) : le maillage est plus serré au niveau du tranchant de l'outils.

Enfin, la texture appliquée par le Minolta est issue de la caméra CCD noir et blanc sur laquelle ont été appliqués trois filtres : un rouge, un vert et un bleu. M. Loïc ESPINASSE préfère prendre indépendamment du scanner une photographie numérique précise pour l'appliquer ensuite au modèle en utilisant un logiciel de traitement d'image et de synthèse 3D. Dans notre cas, cette étape n'a pas été faite par manque de temps, les résultats que nous avons n'ont donc pas de texture.

Les résultats au format .wrl sont directement visualisables sur un navigateur web.

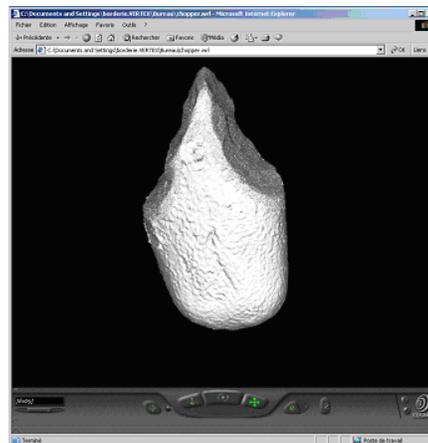


Figure 75 - Visualisation du modèle 3D du chopper 644 scanné au laboratoire Archéovision avec

Internet Explorer en utilisant le plugin
Cosmoviewer.



Figure 76 - Modèle 3D par scanner laser Minolta vi-900 au laboratoire Archéovision : Chopper, 285 815 sommets.

Cette fois-ci, ça n'est pas la saturation que nous observons sur l'image précédente, mais une granulosité inattendue du modèle. Ceci est dû au bruit créé par une trop forte intensité du laser.

En effet, afin de palier au problème posé par les surfaces trop diffuses, il est possible d'augmenter la puissance du rayon laser pour assurer la réception par la caméra CCD du rayon réfléchi. Mais ceci entraîne la génération d'un bruit qui vient fausser toutes les surfaces.

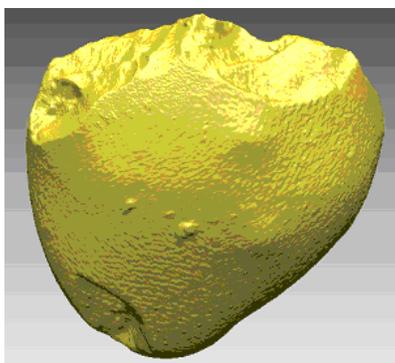


Figure 77 - Modèle 3D par scanner laser Minolta vi-900 au laboratoire Archéovision : Chopping Tool 1279, 266 178 sommets.

Conclusion :

Après ces deux numérisations, nous pouvons exposer les avantages et les inconvénients principaux d'un tel système :

Le compromis entre bruit et saturation est un problème important que seul un nombre plus élevé de prises de vues détaillées peut relever, ce qui augmente d'autant le temps de numérisation. Les occultations, inévitables avec un système de type optique, nécessitent un gros travail post-numérisation. La table tournante est un élément qui ne vient que partiellement résoudre cette difficulté.

Nous verrons dans la partie V. de ce rapport comment le recalage des différentes vues est réalisé.

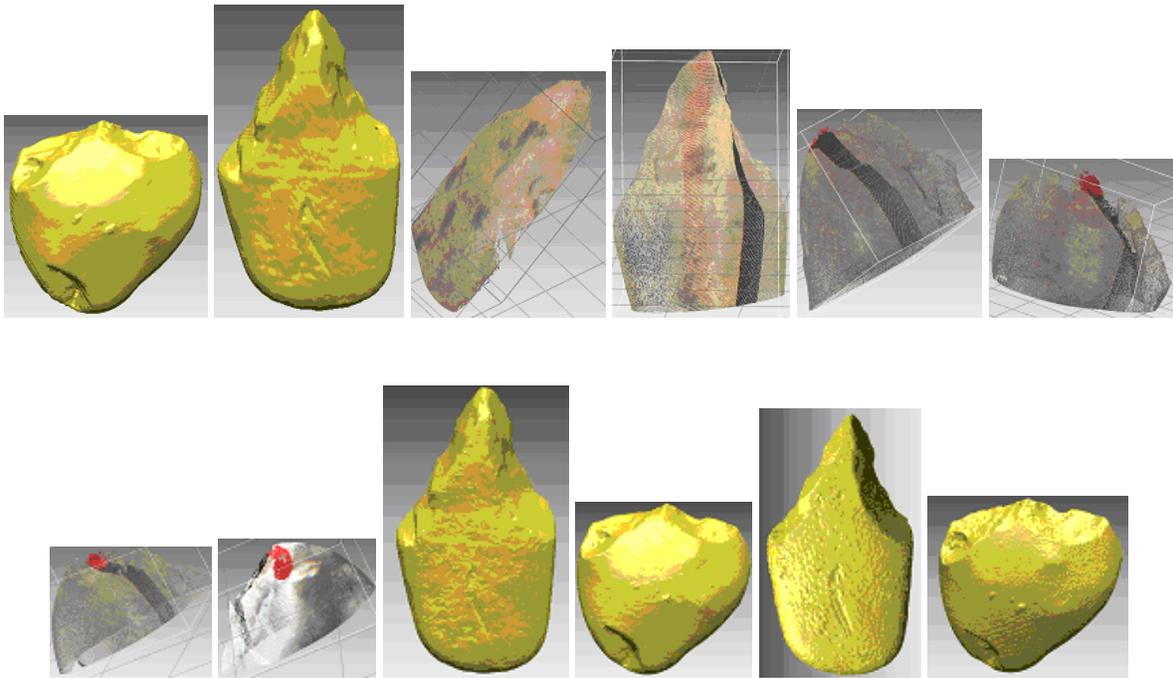
La portabilité et le caractère non-contact sont les atouts majeurs de ce système : l'appareil peut fonctionner sans être relié à un ordinateur, stockant les données dans une mémoire interne.

Enfin, la précision et la rapidité des acquisitions (300 000 sommets) sont des résultats convaincants. (la fiche technique du scanner est reportée en annexes)

Nous possédons désormais les 16 acquisitions suivantes :

- Stéréovision :
 - Chopper : **644 supérieur, 644 inférieur** ;
 - Chopping Tool : **1279 supérieur, 1279 inférieur** ;
- Scanographe médical :
 - **Chopper Purpan** ;
 - **Chopping Tool Purpan** ;
- Scanner laser de marque Cyberware :
 - Chopper : **scan2, scan3** ;
 - Chopping Tool : **scan4, scan5, scan6 scan7** ;
- Scanner laser de marque Minolta :
 - En entreprise : **Chopper Kallisto** et **Chopping Tool Kallisto** ;
 - En Laboratoire : **Chopper Bordeaux** et **Chopping Tool Bordeaux**.

Les voici (excepté les acquisitions par stéréovision) dans le même ordre :



IV. Comparaison qualitative et quantitative des résultats

Afin d'aboutir à un jugement basé sur des résultats quantitatifs, bien que les critères qualitatifs soient suffisants pour discriminer les méthodes, nous avons cherché à comparer les différents modèles en les superposant et en calculant la différence (ou distance) d'un modèle à l'autre.

4.1. Méthodologie

Pour faire ce travail, il nous a fallu choisir une méthode d'alignement, un recalage à la main des modèles étant naturellement insuffisant !

Il existe différentes méthodes de recalage (*registering* en anglais) rigide : qui ne modifie que la position relative de deux modèles, c'est à dire qui applique à l'un des deux modèles une translation et/ou une rotation.. Cependant, la méthode de loin la plus utilisée est celle des moindres carrés appliquée à la distance entre deux modèles. Le principe est d'aboutir à la meilleure (minimum global) superposition d'un modèle M sur une scène S. Par exemple, nous pouvons citer les travaux suivants basés sur différents principes :

- Projection du modèle sur la scène le long des lignes de vue du scanner : recalage point par point et vérification en étudiant le voisinage [WEI 97] ;
- Projection complète du modèle sur la scène et recalage en deux dimensions [PUL 97] ;
- Utilisation d'un modèle source [EGG 98] ;

Cependant, l'algorithme le plus utilisé, car le plus efficace, est celui du plus proche voisin itéré (PPVI) ou, en anglais, **Iterated Closest Point (ICP)**, [HOR 87] [CHEN 91] [BESL 92].

C'est celui que nous avons utilisé.

Dans un premier temps, nous avons choisi de comparer nos différentes acquisitions deux à deux, constituant ainsi une table de différences relatives. Ne possédant pas de modèle parfait, sur lequel axer notre jugement, nous avons dans un second temps créé un modèle moyen, puis comparé les acquisitions pertinentes (scanner laser et scanographe médical)

4.2. . L'algorithme ICP

L'algorithme ICP est très courant pour le recallage des différents points de vues d'un même objet lors d'une numérisation 3D par système laser.

Son principe, très simple, est le suivant :

1. Configuration initiale ;
2. Détermination du plus proche voisin de m_i appartenant au modèle M parmi les s_j appartenant à S.
3. Détermination de la transformation rigide (R,T) de M en S en minimisant la fonction :

$$f(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \| \mathbf{s}_i - \mathbf{R} \mathbf{m}_i - \mathbf{T} \|^2$$

4. Application de la transformation (R,T) sur M.
5. Retour à l'étape 2. si le critère :

$$|f_n(\mathbf{R}, \mathbf{T}) - f_{n-1}(\mathbf{R}, \mathbf{T})|$$

est inférieur à un seuil donné ou si le nombre maximum d'itérations a été atteint.

La transformation (R,T) comprend :

- R, la matrice carrée de rotation, déterminée en calculant la matrice des covariances conjointes des paires de points. La rotation finale est donnée par le quaternion unitaire, qui est le vecteur propre correspondant à la valeur propre la plus grande de la matrice des covariances conjointes ;
- T, la matrice de translation ;

Les principales caractéristiques de l'ICP sont :

- La nécessité d'une "bonne" configuration initiale, c'est à dire qu'un recalage a précédemment été réalisé "à la main" ou que l'utilisateur a déterminé des points de contrôle, ou de correspondance, entre le modèle et la scène ;
- Une convergence monotone lente vers un minimum local : il est en effet très rare que deux applications de l'algorithme amènent à un résultat identique ;
- Une complexité en $n \cdot \log n$, "n" étant le nombre de points du modèle ;

De nombreuses modifications sont venues améliorer le principe de base. Par exemple :

- Utilisation d'une carte de courbure des modèles [ZHA 94];
- Extension du vecteur normal des facettes du modèle jusqu'à ce qu'ils coupent la scène [ZHA 94];
- Algorithme ICP basé sur les caractères invariants des modèles [SHA 00];
- Ajout d'un facteur de confiance pour chaque paire de points [STA 00] [GOD 94];
- Le seuillage des distances séparant deux points correspondant, éliminant ainsi les *outliers* [PUL 99] [DOR 98];
- le rejet des points situés sur le contour du modèle lors de l'appariement [TUR 94].

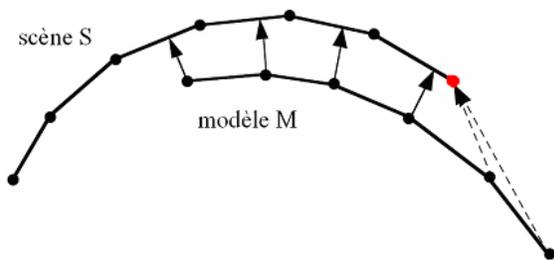


Figure 78 - Appariement des points avant application de la transformation. On se rend bien compte ici que le point du bord (en rouge) va engendrer un décalage vers la gauche qui n'est pas souhaitable.

Deux variantes intéressantes sont :

- le recalage d'un point appartenant au modèle sur un point appartenant à la scène [BESL 92] : c'est le recalage point à point.

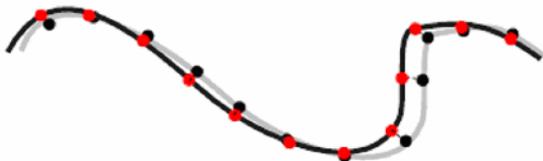


Figure 79 - ICP point à point.

- le recalage d'un point appartenant au modèle sur une tangente appartenant à la scène [CHEN 92] [NEU 97]: c'est le recalage point à plan.



Figure 80 - ICP point à plan.

Nous n'avons pas implémenté un algorithme de type ICP, mais après avoir étudié son implémentation et ses différentes améliorations depuis 1992, nous avons choisi d'utiliser les logiciels présentés aux paragraphes suivants. (Paragraphes 4.3. et 4.5.)

4.3. Scanalyze

(traduction du site Internet : "Scanalyze, a system for aligning and merging range data")

"Scanalyze est une application graphique interactive conçue pour visualiser, éditer, aligner et fusionner des acquisitions scanner à haute densité de polygones. Son utilité première fut, lors du Digital Michelangelo Project, d'assembler les différents modèles 3D des acquisitions des statues de Michelange. Elle a aussi été largement utilisée lors du Digital Forma Urbis Romae Project. Ce logiciel [...] a été réalisé pour une utilisation scientifique et commerciale, libre."

"Scanalyze a été développé pendant une période d'environ cinq ans, au laboratoire Computer Graphics de l'université de Stanford. Ses principaux auteurs sont Kari Pulli et Matt Ginzton. Plus précisément, le logiciel d'alignement d'acquisitions scanner a été développé par Kari Pulli. [...] L'interface graphique a été programmée par Kari Pulli, Matt Ginzton, et James Davis, avec la contribution de tous les autres membres du projet. [...] Enfin, le Digital Michelangelo Project était sous la direction de Marc Levoy."

Scanalyze a donc été initialement conçu pour une application de "Virtual Heritage" !

L'algorithme ICP de Scanalyze bénéficie des dernières améliorations apportées par Szymon RUSINKIEWICZ et Marc LEVOY [RUS 01]: ils ont étudié les nombreuses variantes de l'ICP, puis ont conçu un algorithme rapide en combinant les caractéristiques suivantes :

- un algorithme de détermination du plus proche voisin basée sur une projection [BLA 95] ;
- un algorithme de correspondance point à plan [NEU 97] ;
- une itération classique (“select-match-minimize”) ;

- un facteur de confiance constant ;
- une distance de seuillage pour rejeter les paires mauvaises.

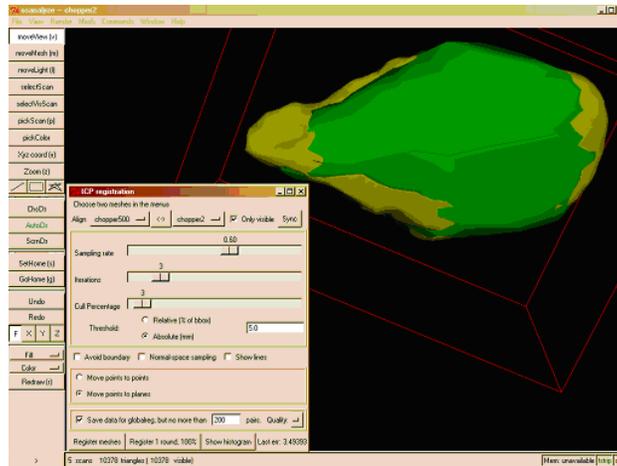


Figure 81 - Utilisation de Scanalyze.

Comme le montre l'image précédente, nous avons voulu utiliser Scanalyze pour superposer nos acquisitions. Mais, une mauvaise adaptation du logiciel sur un système d'exploitation, la difficulté à convertir certaines acquisitions en .ply, Scanalyze ne travaillant qu'avec des format .ply (cf. annexes : VII. le format .ply), et l'impossibilité d'extraire des valeurs numériques d'erreurs significatives, notamment les histogrammes, nous ont poussé à utiliser un autre programme.

4.4. RapidForm

Lors de la quatrième phase de notre stage, nous avons été amené à utiliser le logiciel RapidForm de la société coréenne Inus pour recalibrer les prises de vues des acquisitions réalisées à Tautavel.

Ce logiciel offrant de nombreuses autres applications :

- Extraction de caractéristiques géométriques de zones spécifiées ;
- Mesures d'angles ;

et surtout :

- Recalage de plusieurs modèles.

RapidForm étant un programme commercial, nous n'avons pas de détails concernant l'algorithme utilisé. Cependant, nous avons tout de

même eu la réponse suivante de Inus Support suite à nos interrogations :

Dear Quentin,

Thank you for your interest about our product with your research project.

And about your question, Yes, we're using ICP algorithm for our registration function, and it's not simple ICP but some kind of our "advanced" version. And it works with both point and face data. But internally the algorithm needs the normal direction information of each vertex, so it generates normal information with input data – point shell of polygon shell.

And here is maybe your problem exist, the scanned "stone" data with no face.

For a point-only shell, Rapidform automatically evaluate vertex neighborhood relation and with that info, generates point normal with no faces. But, in noisy scanned data, like stone, the result might be false in local noisy region, Then, this can be effect final registration result of yours. So we recommend generate polygonal models for Noisy data registration.

And also, for good registration result, overlap region must have some features in it.

Thanks,

Sungwook.

C'est donc, ici aussi, un algorithme ICP qui est implémenté, mais là, l'étape d'initialisation est comprise dans l'algorithme, c'est un recalage par points de contrôle. La manipulation complète à suivre est :

- Sélection des deux modèles à superposer ;
- Choix d'au moins trois points de contrôle (entre 5 et 8 au mieux) correspondants sur chacun des modèles ;

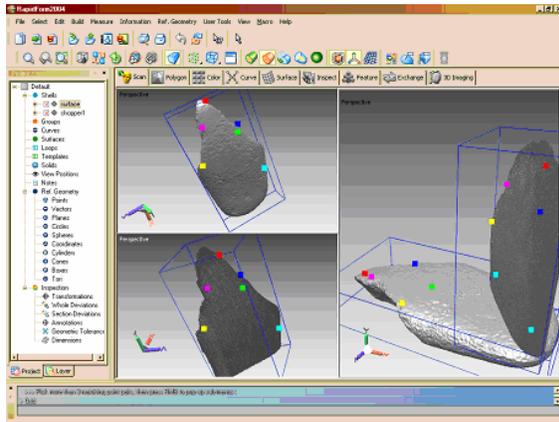


Figure 82 - Recalage de modèles 3D Cyberware et Kallisto du chopper 644 : choix des points de contrôles correspondants sur chaque modèle.

- Première exécution de l'algorithme ;
- Seconde exécution, plus fine, de l'algorithme, si le résultat précédent est validé.

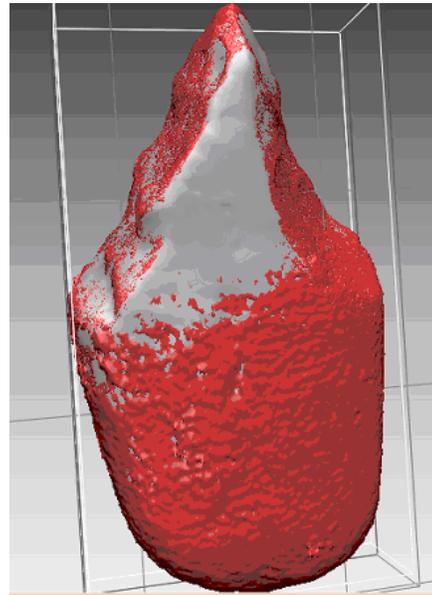


Figure 83 - Résultat du recalage ICP de RapidForm entre les modèles 3D du chopper 644 de Kallisto (gris) et d'Archéovision (rouge).

Comparaison deux à deux

Pour déterminer les distances relatives entre chaque acquisition nous avons utilisé l'application de recalage présentée plus haut. Toutes nos acquisitions ont été converties dans un format supporté par RapidForm, et, deux à deux ont été ajustées et superposées. Ayant un total de 12 acquisitions pertinentes : 5 de Chopper et 7 de Chopping Tool, cela fait 15 recalages pour le Chopper et 28 pour le Chopping Tool. Soit 43 manipulations à exécuter. Pour réduire le nombre de ces opérations, nous n'avons pas comparé les acquisitions Cyberware avec toutes les autres, car ils ne constituent pas un modèle dans son ensemble, mais seulement quelques parties.

Notons qu'il fut nécessaire, pour ne pas fausser les résultats, de supprimer la zone interne des acquisitions scanographique. Nous avons aussi utilisé RapidForm pour faire cela, inversant les normales pour visualiser l'intérieur, supprimer la zone, puis inversant à nouveau les normales pour retrouver le modèle.

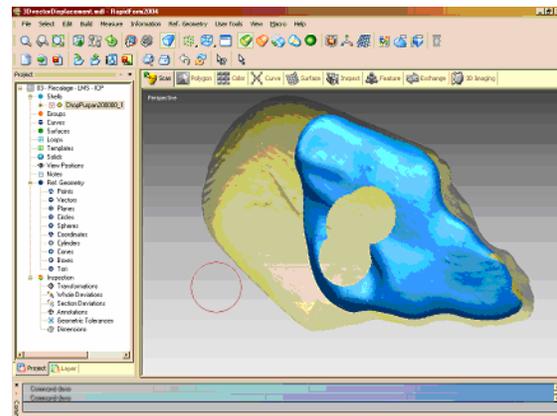


Figure 84 - Suppression de la zone interne des acquisitions scanographiques : inversion des normales pour visualiser l'intérieur, suppression de la zone gênante, puis nouvelle inversion des normales pour retrouver le modèle.

Les résultats sont reportés dans les tableaux qui suivent.

Les abréviations signifient :

ad : distance **mo**yen**ne** d'un modèle à l'autre (en mm), *average variation* ;

SD : écart type d'un point d'un modèle par rapport aux points de l'autre (en mm), *Standard Distance* ;

DV : **Vecteur de déplacement**, *Displacement Vector*, ce qui correspond à une comparaison du type suivant (affichage des vecteurs représentant le déplacement relatif d'un modèle à l'autre) :

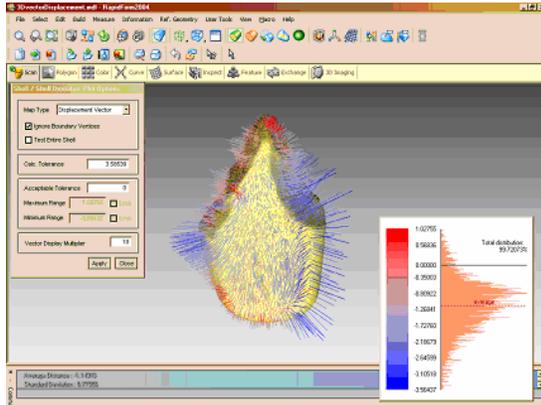


Figure 85 - Exemple d'un affichage en Vecteur de Déplacement. C'est sans doute le mode le plus expressif.

AC : **Couleurs absolues**, *Absolute Colors* (affichage de la distance absolue entre les deux modèles) :

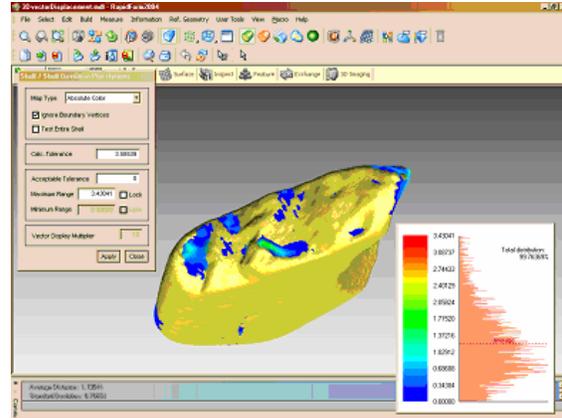


Figure 86 - Affichage en mode Couleurs Absolues.

SC : **Couleurs Relatives**, *Signed Colors* (affichage de la distance relative entre les deux modèles) :

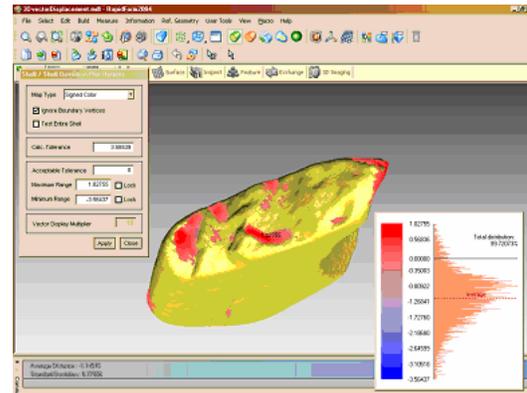


Figure 87 - Affichage en mode Couleurs Relatives.

modèles	Chopping tool Bordeaux	Chopping tool Purpan
scan4.ply de Cyberware	DV : SD = 0.39719 ad = -0.12594 AC : SD = 0.32839 ad = 0.25647 SC : SD = 0.38718 ad = -0.12594	nc
scan5.ply de Cyberware	DV : SD = 0.49753 ad = -0.19351 AC : SD = 0.41171 ad = 0.33981 SC : SD = 0.49753 ad = -0.19351	nc
scan6.ply de Cyberware	DV : SD = 0.44613 ad = -0.10693 AC : SD = 0.36314 ad = 0.28034 SC : SD = 0.44584 ad = -0.10810	nc
scan7.ply de Cyberware	DV : SD = 0.44613 ad = -0.10693 AC :SD= 0.40049 ad = 0.30320 SC : SD = 0.49372 ad = -0.0956	nc
Chopping tool Kallisto	DV : SD= 0.25486 ad= -0.15365 AC : SD = 0.21460 ad= -0.20619 SC : SD = 0.25486 ad= -0.15365	DV : SD = 0.24981 ad= -0.05333 AC : SD= 0.19421 ad= 0.16593 SC : SD= 0.24981 ad = -0.05333
Chopping tool Bordeaux		DV : SD= 0.16690 ad = 0.12815 AC : SD = 0.15057 ad = 0.414699 SC : SD= 0.16690 ad = 0.12815

Figure 88 - Résultats numériques de la comparaison des modèles de chopping tool 1279. ad : distance moyenne
SD : écart type ; DV : Vecteur de déplacement ; AC : Couleurs absolues ; SC : Couleurs Relatives.

modèles	Chopper Kallisto	Chopper Bordeaux
scan2.ply de Cyberware	DV : SD = 0.36819 ad = 0.04505 AC : SD = 0.31172 ad = 0.20105 SC : SD = 0.36894 ad = 0.03843	DV: SD = 0.47714 AC: SD = 0.39581 SC : SD= 0.47714
scan3.ply de Cyberware	DV : SD = 0.68285 ad = -0.41921 AC : SD = 0.51756 ad = 0.61169 SC : SD= 0.68285 ad= -0.41921	DV : SD = 0.81048 AC: SD = 0.63148 SC : SD = 0.81954
Chopper Kallisto		DV : SD = 0.61377 ad= -0,33286 AC: SD = 0.65911 ad = 0,49452 SC : SD= 0.73228 ad = 0,37781
Chopper Purpan	DV : SD = 0.77956 ad = -1.14916 AC: SD= 0.70654 ad = 1.19544 SC: SD = 0.77956 ad= -1.14916	DV: SD= 1.04420 ad= -0.82486 AC: SD = 0.82173 ad= 1.04667 SC: SD = 1.04420 ad = -0.82486

Figure 89 - Résultats numériques de la comparaison des modèles de chopper 644. ad : distance moyenne SD : écart type ; DV : Vecteur de déplacement ; AC : Couleurs absolues ; SC : Couleurs Relatives.

Il est ensuite intéressant de comparer les histogrammes.

Par exemple pour le Chopper, nous disposons des histogrammes de vecteurs de déplacements des figures 90, 91 et 92. Leur étude nous permet de constater des caractéristiques remarquables :

- Il y a un biais très important (1,14916 mm) entre les acquisitions scannographiques (Purpan) et celles effectuées avec un scanner laser en entreprise (Kallisto), ainsi qu'un bruit présent sur tout l'histogramme ;

- Il y a également un biais très important (0,82426 mm) entre l'acquisition faite à l'hôpital de Toulouse et celle faite à Bordeaux, mais le bruit semble s'être estompé, cependant on constate comme des marches d'escalier dans l'histogramme ;

- Entre l'acquisition faite au laboratoire de Bordeaux et celle faite dans l'entreprise de Toulouse, le biais est le moins important (0,37781), mais le bruit est toujours présent.

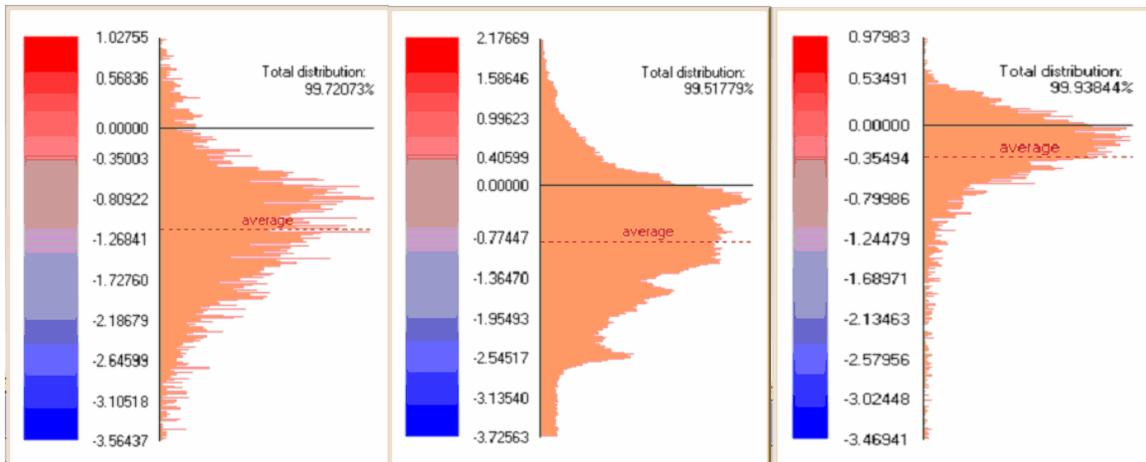


Figure 90 - Purpan - Kallisto.

Figure 91 - Purpan - Bordeaux.

Figure 92 - Kallisto - Bordeaux.

Ces résultats s'expliquent comme suit :

Le biais entre l'acquisition scannographique et les autres est due au choix du seuil de niveau de

gris lors de l'extraction d'isosurfaces par yav++. Les résultats que nous avons ici montrent qu'il aurait fallu choisir un niveau de gris plus faible, pour que le modèle soit plus large.

Le bruit entre le modèle de Bordeaux et les autres s'explique facilement car les acquisitions faites à Bordeaux sont bruitées. Cependant, ce bruit n'apparaît pas dans l'histogramme de comparaison Purpan-Bordeaux. Effectivement, le bruit est masqué par le biais et par les marches d'escalier qui représentent les couches d'acquisition par scanner X médical.

Le bruit apparaissant entre les modèles scanner laser de l'entreprise de Toulouse (Kallisto) et du scanographe (Purpan) sont plus difficiles à interpréter. Il peut venir de la triangulation faible (moins de 5000 facettes) des modèles laser mise en parallèle avec les couches de l'acquisition médicale.

De la même façon nous pouvons analyser tous les histogrammes et les valeurs de déplacements absolus, relatifs, vectoriels à notre disposition.

Création d'un modèle moyen et comparaison

L'autre étude comparée a été effectuée sur une zone plus petite : une face du tranchant du Chopping Tool. Effectivement, c'est sur cet endroit d'un outil que la forme, la courbure est la plus complexe, mais aussi que l'information est la plus importante.

Caractéristiques du tranchant Bordeaux :

58491 vertices,
115223 faces,
longueur : 111.88928
hauteur : 36.98462
profondeur : 44.12654

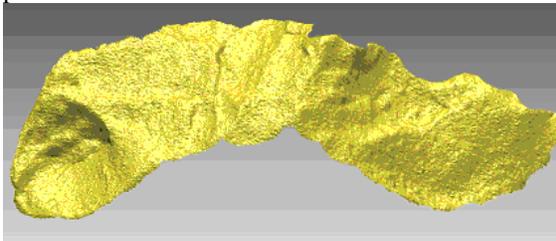


Figure 93 - Le tranchant du modèle de chopping tool 1279 scanné à Bordeaux.

Caractéristiques du tranchant Kallisto :

603 vertices,
1074 faces,
longueur : 117.42200

hauteur : 32.37300
profondeur : 43.05400

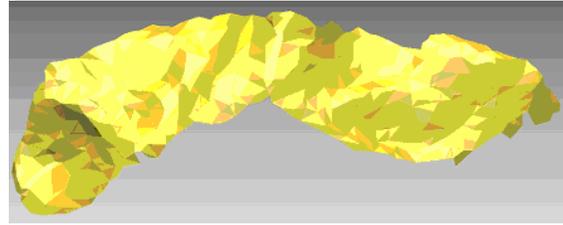


Figure 94 - Figure 94 - Le tranchant du modèle de chopping tool 1279 scanné à Kallisto.

Caractéristiques du tranchant Purpan :

14149 vertices,
27521 faces,
longueur : 110.89410
hauteur : 36.17154
profondeur : 42.51954

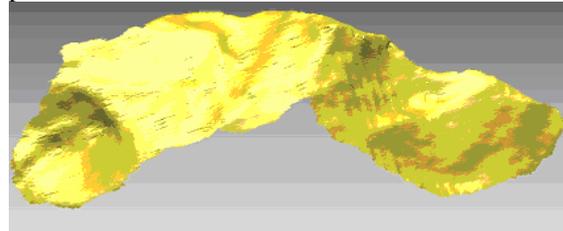


Figure 95 - Figure 94 - Le tranchant du modèle de chopping tool 1279 scanné à Purpan.

RapidForm permet de "merger", c'est à dire de fusionner, différentes acquisitions en un unique modèle. Nous avons ainsi fusionné les trois acquisitions précédentes pour obtenir le modèle moyen suivant :

Caractéristiques du modèle Purpan + Kallisto + Bordeaux :

57357 vertices,
112919 faces,
longueur : 117.6582
hauteur : 36.88731
profondeur : 43.39421

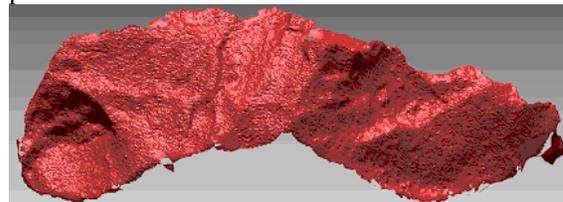


Figure 96 - Figure 94 - Le modèle moyen du tranchant.

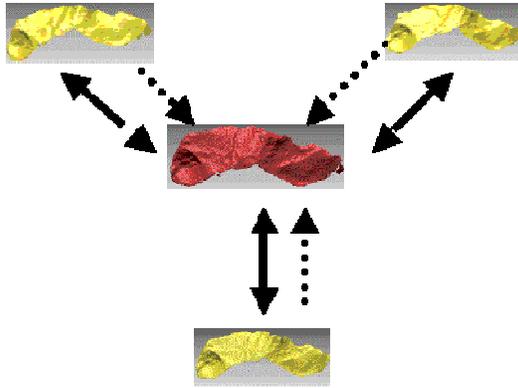


Figure 97 - Schéma de création du modèle moyen et comparaison avec chacun des autres modèles. Flèches pointillée = fusion, Flèche pleine = comparaison.

On constate tout de suite que les caractéristiques de ce modèle sont "tirées" par celles de l'acquisition du laboratoire de Bordeaux : 57357 sommets dans le modèle moyen pour 58491 dans l'acquisition soit une différence de 1134 sommets, alors que le tranchant de Kallisto n'en comporte que 603.

Les résultats des différences quantifiées (distance absolue, distance relative, Vecteur de déplacement) sont reportées dans le tableau suivant. Les abréviations sont les mêmes que précédemment.

modèles	Modèle moyen
Tranchant scanographe médical	DV : SD = 0.10130 ad = -0.01568 AC : SD = 0.07522 ad = 0.06964 SC : SD = 0.10130 ad = -0.01568
Tranchant scanner laser entreprise	DV : SD = 0.14509 ad = -0.02067 AC : SD = 0.10207 ad = 0.10517 SC : SD = 0.14509 ad = -0.02067
Tranchant scanner laser laboratoire de Bordeaux	DV : SD = 0.03037 ad = -0.00083 AC : SD = 0.02804 ad = 0.01170 SC : SD = 0.03037 ad = -0.00083

Figure 98 - Figure 90 - Résultats numériques de la comparaison des modèles de tranchant du chopping tool 1279 avec le modèle moyen.

Visuellement, nous obtenons ces différentes images (nous préférons afficher les images de vecteurs de déplacement relatif car ils montrent de façon plus explicite les divergences locales) :

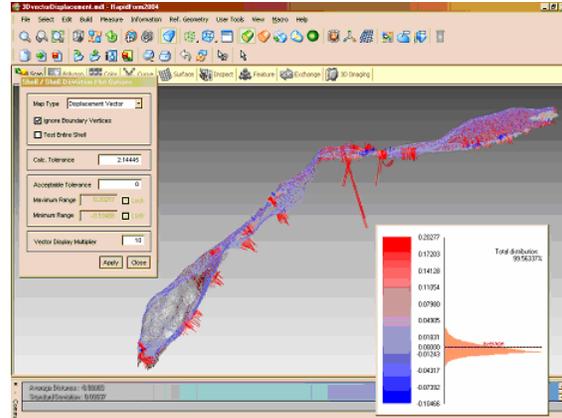


Figure 99 - Bordeaux-Modele

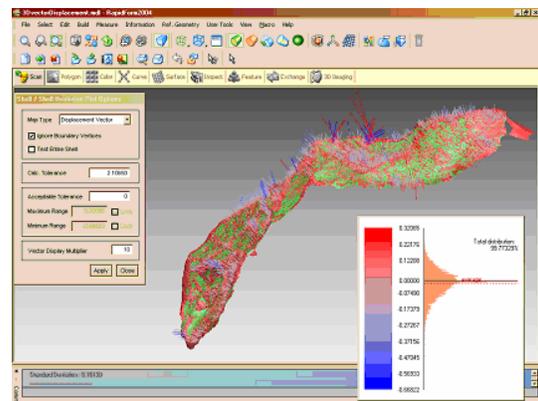


Figure 100 - Purpan-Modele.

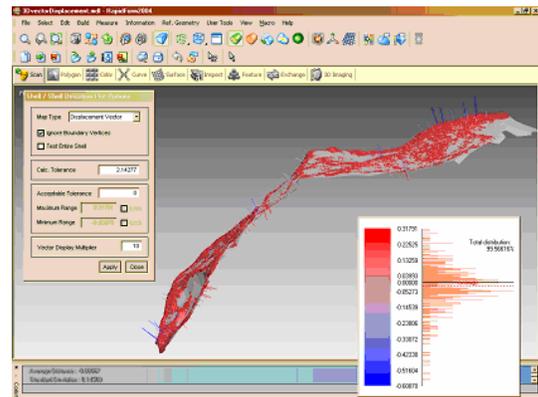


Figure 101 - Kallisto-Modèle.

Il semblerait donc que le tranchant de Bordeaux ne diverge que très peu du modèle commun : une moyenne de 0.00083 mm, (résultat que l'on observe aussi sur l'histogramme correspondant) ceci vient confirmer nos remarques faites plus haut : la présence d'un grand nombre de sommets dans l'acquisition faite au

laboratoire de Bordeaux à considérablement haussé le nombre de sommets du modèle.

Mais si l'on considère la comparaison entre le tranchant de l'acquisition faite à Bordeaux et celui de celle effectuée au scanographe à Toulouse, le biais n'apparaît pas tellement important : une moyenne de 0.01568 mm. Or, le modèle scanographique comprend 14 149 sommets contre les 115 223 de celui de Bordeaux. On peut affirmer ici qu'un modèle de ce tranchant comprenant environ 15 000 sommet apporte suffisamment d'information dans la mesure où il n'est pas bruité ni ne comporte de trou.

Le bruit à marches d'escalier présent sur le troisième histogramme illustre par contre le manque d'information. On peut y mettre en

relation le très faible nombre de sommets : 603 pour le tranchant de l'acquisition en entreprise à Toulouse.

D'un point de vue global, cette comparaison permet de mettre en évidence le rôle du nombre de sommets, mais également de fournir un repère numérique : 15 000 sommets pour ce tranchant. Malheureusement, pour un autre objet, toute cette étude sera nécessairement à refaire.

Des commentaires similaires peuvent être effectués au regard des résultats de déplacement relatif ou absolu.

Les histogrammes sont :

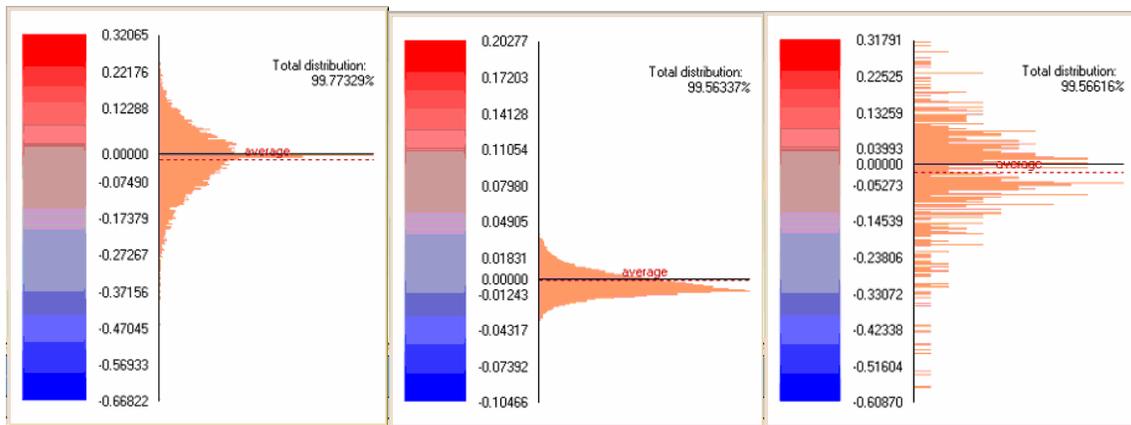


Figure 102 - Bordeaux-Modele.

Figure 103 - Purpan-Modele.

Figure 104 - Kallisto-Modele.

Si l'on concentre notre étude plus localement encore, nous pouvons constater une autre particularité. Pour une zone de forte courbure, on remarque une plus grande divergence entre les modèles (cf. figure 105). L'image suivante montre la comparaison locale entre le tranchant de l'acquisition par scanographe et le modèle commun. Il est flagrant comme les vecteurs de déplacement, aussi bien positifs que négatifs, suivent la courbure du bord d'un éclat. Malgré le détail d'acquisition que possèdent ces deux modèles, il subsiste encore des divergences conséquentes dans de telles zones complexes. Pour acquérir un modèle parfaitement fidèle, il sera donc nécessaire de prendre en compte cette particularité.

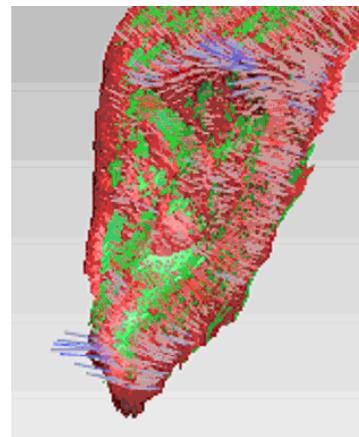


Figure 105 - Vecteurs de déplacements affichés sur une zone détaillée : ils suivent la courbe la plus forte.

4. 5. Bilan

Il est temps désormais de dresser un bilan de tous ses résultats.

D'un point de vue qualitatif, nous pouvons reprendre les différentes conclusions tirées après chaque numérisation :

Stéréovision :

- immobilité requise pour éviter le re- calibrage ;
- acquisition uniquement de la surface ;
- occultation ;
- problèmes de saturation ;
- texture quasi-nulle ;
- peu de reliefs.

- portable et très simple à réaliser ;
- rapidité d'acquisition de 40 secondes ;

Scanographe :

- accès très limité ;
- non-portable ;
- couches dues au scanner ;

- obtention quasi-immédiate de la 3D ;
- nombre d'outils pour manipuler les données ;

- visualisation de l'intérieur des objets ;
- possibilité d'extraire une triangulation comportant un nombre choisi de facettes ;
- non-contact.

Scanner laser non-portable de marque Cyberware :

- non-portabilité ;
- mauvaise triangulation ;
- occultation ;

- non-contact ;
- texture.

Scanner portable de marque Minolta :

- compromis entre bruit et saturation ;
- occultations ;

- portabilité ;
- non-contact ;
- précision ;
- rapidité.

Les différentes caractéristiques des dispositifs et les conclusions tirées sont consignées dans le tableau suivant :

scanner	Précision x	Précision y	Précision z	Temps d'acquisition	Défauts principaux	Avantages remarquables
NOISIV	28 µm	15 µm	nc	40 s	occultation, disparités entières, occultation	transportable, acquisition passive,
Siemens somatom	~ 0,3 mm	~ 0,3 mm	1 mm	nc	"marches d'escalier", pas de texture, dispositif non-portable, difficulté du choix du seuil d'extraction de surface	obtention directe de la 3D, visualisation interne, pas d'occultation, possibilité d'extraction du nombre illimité de faces, non-contact
Cyberware 3030	500 µm à 2 mm	313 µm	100 à 200 µm	30 s	triangulation mauvaise, dispositif non-portable, occultations	texture, non-contact
Minolta vivid 900 par Kallisto	0.17mm	0.17mm	0.047mm	2.5 s	occultations, saturation	transportable, texture, non-contact
Minolta vivid 900 par Archéovision	0.17mm	0.17mm	0.047mm	2.5 s	occultations, bruit	transportable, texture, expertise, non-contact

Figure 106 - Avantages et inconvénients des systèmes testés.

V. Etude de faisabilité

La quatrième et dernière phase de ce stage fut consacrée à une étude de faisabilité en milieu de fouilles archéologique : la grotte préhistorique de La Caune de l'Arago à Tautavel, et au laboratoire du CERPT.

5. 1. *Le Centre de Recherches Préhistoriques de Tautavel*

5.1.1. Description

Le CERPT :

- participe à de nombreuses fouilles et missions en France (la Caune de l'Arago par exemple) comme à l'étranger ;

- assure la conservation et la valorisation d'un riche patrimoine archéologique et paléontologique (réserve archéologique de 1000m²).



Figure 107 - La réserve archéologique du CERPT : plusieurs milliers de tiroirs.

- permet la diffusion et la valorisation de la culture scientifique : création d'expositions temporaires, d'expositions itinérantes, journées portes ouvertes des laboratoires et du chantier de fouilles de la Caune de l'Arago, animations pédagogiques autour d'ateliers d'expérimentation, cycle de conférences chaque été ;

- abrite des ateliers et des laboratoires. Les recherches effectuées sont consacrées à l'étude de l'Homme paléolithique et de ses paléo environnements en Languedoc-Roussillon et en Catalogne et par extension à tout le Bassin méditerranéen.

- accueille tout au long de l'année des chercheurs et des étudiants-chercheurs qui viennent respectivement étudier le matériel archéologique et préparer des mémoires de DEA et de Doctorat en s'appuyant sur les riches collections conservées au CERPT.

5.1.2. Mission

Nous avons donc réalisé, pour la quatrième et dernière phase de ce stage, et sur les conseils de M. Bertrand MAFART et du professeur Henry de Lumley, une mission d'une semaine à Tautavel, du lundi 19 juillet au vendredi 23 juillet 2004.

Les buts principaux de cette mission furent :

- Avoir une bonne compréhension des conditions de fouilles, de leur difficulté et, de cette façon, d'appréhender mieux la possibilité d'effectuer une numérisation *in situ* ;

- Effectuer l'acquisitions de plusieurs éléments.

Les trois jours de **lundi, mardi et mercredi** ont donc été consacrés à la fouille archéologique proprement dite, ainsi qu'aux tamisage, marquage, lavage et tri (cf. paragraphe 5.5.1.). Ainsi nous avons pu prendre conscience des méthodes archéologiques utilisées et de leur exécution en y participant pleinement.

Les deux jours suivants : **jeudi et vendredi** ont été consacrés à la numérisation de différents éléments, à des fins bien précises, qui n'entrent pas pour certaines dans le cadre de ce stage si ce n'est pour le processus de numérisation, mais qui pourront être le sujet d'autres travaux du projet FOVEA.

La numérisation a été effectuée, sous notre supervision, par M. Jérôme BARLET, de la société Kallisto. (cf. paragraphe 3.1.2.).

5. 2. *Choix du système*

L'étude menée précédemment nous a bien sûr permis de conclure sur les avantages et les défauts de chacun des systèmes, mais également de choisir le dispositif le plus apte à réaliser les acquisitions de cette mission. Au regard des résultats du chapitre 2, nous avons décidé de faire l'usage du dispositif laser portable déjà utilisé à Toulouse.

Le caractère portable est évidemment le premier critère de sélection.

Ensuite, la disponibilité du dispositif et de ses propriétaires a été une contrainte obligatoire.

Enfin, la proximité de l'entreprise Kallisto a favorisé les contacts qui ont suivi cette opération (prêt du logiciel RapidForm notamment).

De cette manière, nous n'avons pas pu bénéficier de l'expertise du laboratoire de Bordeaux, mais de la pratique technique et de l'expérience commerciale de l'entreprise Kallisto.

Le nombre insuffisant de sommets des acquisitions des moulages a été résolu en affinant la numérisation.

De plus, nous avons pu profiter du tout dernier modèle de scanner Minolta : le vi-910, commercialisé depuis mi-mai 2004 seulement. (ses spécifications techniques sont en annexes)

5. 3. *Acquisition de moulages de sols*

Les moulages de sols en résine sont conçus dans un but muséographique : présenter au visiteur le sol tel qu'il était lors de sa découverte. Ils sont réalisés directement sur le chantier de fouille, et cela soulève plusieurs problèmes : impossibilité de recherche pendant la prise de la résine et présence ensuite sur la zone d'une couche plus dure qui vient modifier les propriétés du sol. On voit donc l'avantage d'une représentation 3D par acquisition sans contact.

5.3.1. Raisons

Nous avons numérisé :

- le **moulage** de la zone **C15**, couche C7c, comportant la face du crâne Arago 21. Il devrait permettre ensuite à certains informaticiens du projet FOVEA de redresser partiellement le sol environnant en ce basant sur le redressement du crâne préalablement effectué. De plus, nous avons numérisé **cinq artefacts** appartenant à cette zone (cf. paragraphe 5.4.), il sera ainsi envisageable de réintégrer ses objets individuellement dans la modélisation du sol, cela à des fins pédagogiques (fouille virtuelle) ou muséographiques. Mais leurs caractéristiques et dispositions au moment de leur découverte seront également restituées. C'est un exemple de ce que pourrait être une modélisation virtuelle complète d'un sol dans ses trois dimensions.

- le **moulage** de la zone **D18**, couche DJ61M, comportant l'**humérus humain** (Arago 82), (le moulage de cet humérus ayant également été fait). Le même traitement pourra donc y être appliqué à une moindre échelle que celui de la zone C15.

- une **partie du moulage** de la zone **D17**, sol G, comportant un **pariétal humain**.

5.3.2. Acquisition

La grande taille d'un moulage de sol entraîne un nombre de prises de vues impressionnant :

- 27 pour la zone C15 ;
- 28 pour la zone D18 ;
- 23 pour la zone D17 ;



Figure 108 - Le scanner Minolta vi-910 scannant le moulage du sol de la zone C15 au CERPT.

Il est également indispensable de prévoir une "stratégie" d'acquisition. Ces objets comportent de nombreux creux et zones susceptibles de créer des occultations. Le technicien a donc noté sur une feuille les différents points de vue pris pour s'assurer d'une acquisition totale du moulage de sol.

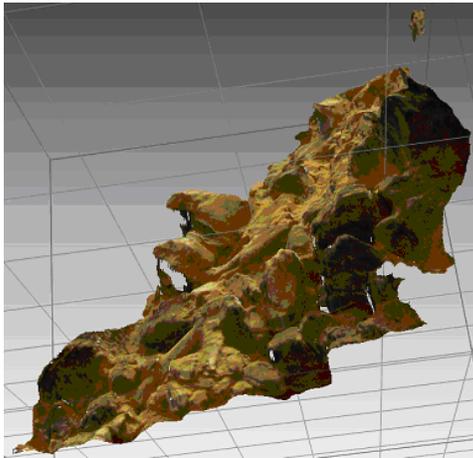


Figure 109 - Visualisation d'une des 27 acquisitions de la zone C15. On distingue en arrière plan l'humérus de cheval.

5. 4. Acquisition d'artefacts

5.4.1. Raisons

Pour les raisons expliquées au paragraphe 5.3.1., nous avons numérisé cinq artefacts de la zone C15 :

- **tibia** gauche de **bizon** : zone C15 couche C7C objet 370 ;
- **éclat** (intérieur du crâne) : zone C15 couche C7C objet 410bis ;
- **racloir** caréné : zone C15 couche C7C objet 425 ;
- **humérus** de **cheval** : zone C15 couche C7C objet 510 ;
- **mandibule** de **lion** : zone C15 couche C7C objet 55.

Ensuite, nous avons complété cette liste afin de posséder un représentant caractéristique (d'un point de vue clarté de forme et de constitution) de chaque type d'artefact. Ainsi nous avons numérisé :

- un **biface** subtriangulaire en silex : zone E17 couche EIL1 objet 4127 ;

- un **rostro-caréné** sur galet quadrangulaire en grès-quartzite : zone C10 couche CBL2 objet 153 ;

- un **éclat** : zone H19 couche HKF15 objet 3482.

Notons que nous avons l'intention de scanner de nombreuses autres pièces intéressantes, mais que le manque de temps (une acquisition peut parfois prendre une heure lorsque l'objet est compliqué) nous en a empêché.

Nous avons également jugé pertinent de faire l'acquisition de :

- **l'enclume** éclatée : zone H16 couche HDT6 objet 2683, pour posséder une donnée "exercice" à d'éventuels travaux de restauration automatisés.

5.4.2. Acquisition

La procédure suivie est identique à celle des moulages de Chopper et de Chopping Tool. Cependant, nous ne disposons pas au CERPT de la table tournante, ce qui entraîne un travail de recalage bien plus gros à fournir ensuite (cf. paragraphe 3.3.4. Résultats).

Selon le type d'objet, nous avons procédé à plus ou moins de prise de vue.

Notons que nous avons dû, pour l'enclume, numériser chacune de ses parties, ce qui représente au total 84 prises de vue.

5. 5. Acquisition in-situ

Comme nous l'avons vu plus haut, la numérisation sur le terrain et pendant la fouille est un travail compliqué mais dont les aboutissants sont extrêmement intéressants.

5.5.1. Les fouilles archéologiques

Des fouilles archéologiques sont pratiquées sur site de Tautavel de Pâques à la fin du mois d'août, tous les jours de la semaine depuis plusieurs dizaines d'années, et pour plusieurs dizaines d'années encore. Ce sont des fouilleurs bénévoles qui oeuvrent, apprenant sur place les techniques de fouille, générales s'ils n'ont aucune expérience, mais propre à cet endroit dans tout les cas.

La fouille proprement dite comprend les opération suivante :

- manipulation des outils : grattoir, pinceau, pelle, niveau ;



Figure 110 - La fouille archéologique et les outils utilisés : pelle plastique et grattoir de métal.

- techniques de relevé de position des artefacts : le terrain est divisé en zones coordonnées d'un mètre sur un mètre ;

Mais aussi les opérations de :

- tamisage : la terre prélevée lors de la fouille est conservée dans un seau puis tamisée dans l'eau avec deux tamis de tailles différentes ;



Figure 111 - Tamisage dans le Verdoble.

- tri : les éléments trouvés lors du tamisage sont triés par catégorie d'objet (os, os déterminé, industrie lithique, etc.) l'information de position de ces objets est malheureusement perdue, si ce n'est la zone de leur provenance.;

- lavage : les objets prélevés pendant la fouille et soigneusement coordonnés sont lavés dans l'eau claire, différemment selon leur nature ;

- marquage : ils sont ensuite marqués : sur une petite zone vernissée, leurs coordonnées, nature et type y sont soigneusement indiqués ;

- restauration : les différents éléments d'un même objet sont ré- associés. C'est le cas de l'enclume du paragraphe 4.4..

C'est donc parmi tout un ensemble d'opérations interdépendantes que nous avons ajouté la numérisation en trois dimensions par scanner.

5.5.2. Raisons

Lors de la fouille, les artefacts coordonnés sont dessinés sur un quadrillage millimétrique décrivant la zone fouillée pour la couche en cours.

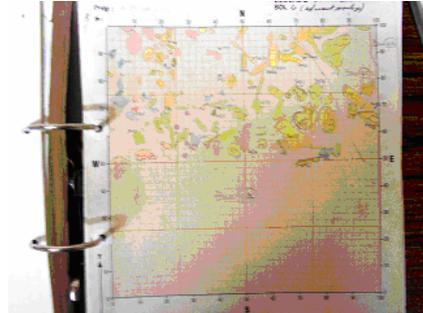


Figure 112 - Zone de fouille représentée sur un quadrillage millimétrique.

Parallèlement à cela, la description de chaque artefact relevé et la position dans laquelle il a été trouvé est reportée dans un carnet : le "carnet de fouille".

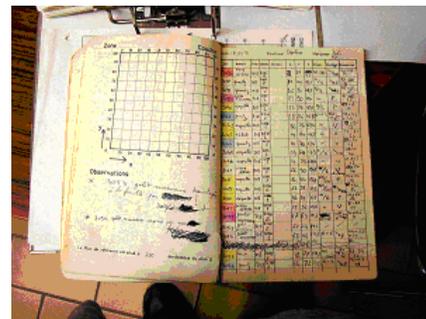


Figure 113 - Carnet de fouille décrivant les artefacts trouvés.

Compte tenu de la variété de positions, orientations, inclinaison, pendages, chevauchements possibles d'un objet par rapport à d'autres dans un espace à trois dimensions, il est impossible de retranscrire fidèlement ces informations néanmoins essentielles. Ceci sans prendre en compte la relative inexpérience de la majorité des fouilleurs bénévoles. On observe donc parfois des carnets de fouilles vierges !

Comme l'utilité de la représentation 3D s'est faite ressentir pour une présentation des artefacts (cf. paragraphe 2.2.) et pour remplacer les moulages de sols (cf. paragraphe 5.3.), un modèle 3D d'une zone de fouille pendant la fouille devient presque un document indispensable : il se

substitue à la fois au carnet de fouille et au quadrillage millimétrique.

5.5.3. Déroulement

Pour cette expérience, nous avons choisi de numériser la zone fouillée par Mme Florence TOSCA, qui présente de nombreux caractères intéressants :

- un emplacement compliqué : contre une paroi et au pendage important, ce qui contribue à un acquisition dans des conditions "extrêmes" ;
- la technique de fouille de Mme Florence TOSCA est précise et rapide, car elle possède de nombreuses années d'expérience. Nous aurons donc entre nos deux acquisitions une progression significative ;
- la couche de cette zone appartient encore au sol G, c'est à dire qu'elle contient de nombreux artefacts : une densité d'objet similaire à celle des trois moulages précédemment scannés.

Il y eu une acquisition le matin, alors que la journée de fouille débutait, et en plein après midi. Au total, il y a eu :

- 13 prises de vues le matin ;
- 16 prises de vues le soir ;

5. 6. Recalage

Le problème du recalage des prise de vues de scanner laser est l'un des centre de recherche des laboratoires d'informatique en vision 3D. Il est en effet très compliqué de recalculer automatiquement (simultanément ou non) un nombre important de modèles en trois dimensions.

Citons juste les travaux de recherche menés par l'équipe du *Digital Michelangelo Project* dirigé par Marc LEVOY et les travaux de C. SCHUTZ [SCH 98] ainsi que les méthodes suivantes :

- Création d'une métavue que les autres viennent peut à peu compléter. Cela présente un problème de diffusion des erreurs ;
- Recalages deux à deux, qui nécessite plus de mémoire ;
- Calcul des transformations séparément puis application simultanée (utilisé par Scanalyze) ;

Dans notre travail, selon l'objet considéré, nous avons fait l'usage d'une métavue ou d'un recalage deux à deux.

La procédure à suivre est la même que celle du recalage des modèles de Chopper et de Chopping

Tool (cf. paragraphe 4.4.): sélection de points de contrôle puis deux recalages successifs.

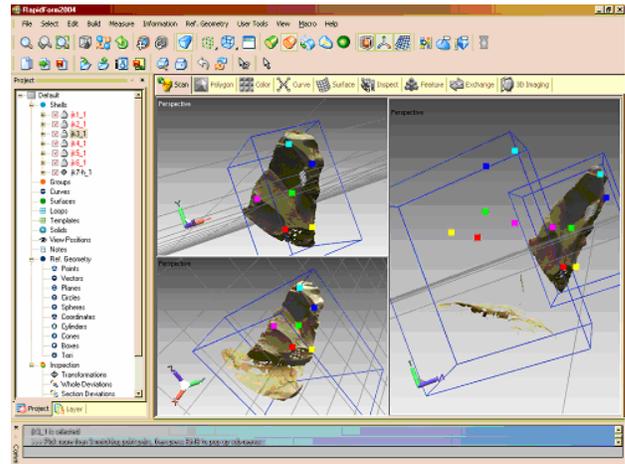


Figure 114 - Recalage par RapidForm d'un biface.

Ensuite, toutes les prises de vues de l'objets ayant été recalées les unes par rapport aux autres de façon précise, elles sont assemblées par un algorithme de fusion, *merge* en anglais. Cette opération consiste à supprimer des sommets et à reformer la triangulation.

La dernière étape est la suppression des trous. Les trous, issus d'occultations non prévues lors de la stratégie d'acquisition ou dus au surfaces trop diffuses, rebouchés ne posséderons pas de texture propre, mais une texture issue de celle des son voisinage.

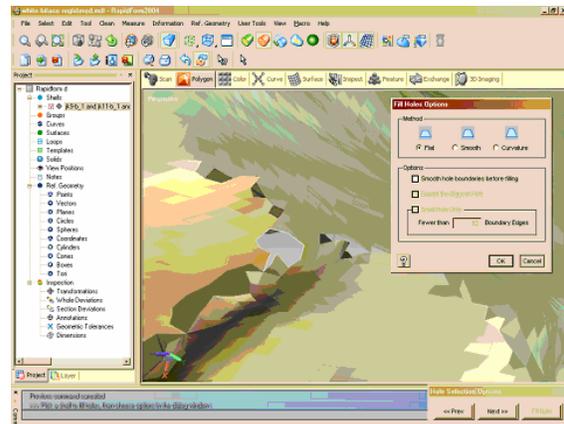


Figure 115 - Complétion d'un modèle 3D en rebouchant les trous causés par les occultations.

Le modèle en trois dimension de l'objet est maintenant terminé, et il apparaît comme un seul et unique modèle.

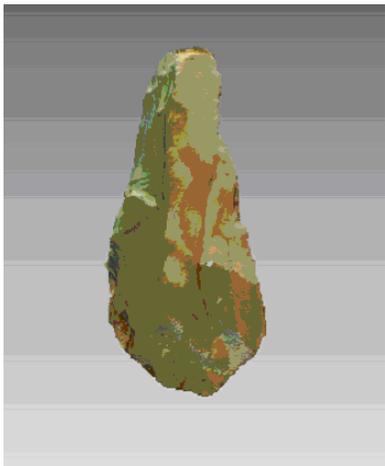


Figure 116 - Modèle numérique en 3D avec texture du biface subtriangulare en silex : zone E17 couche EIL1 objet 4127.

5.7. Bilan

Si les travaux de recalage, de part le nombre conséquent de prises de vues (1,175 Mo de données) n'ont pas tous été achevés, c'est qu'ils illustrent bien les améliorations qu'il est souhaitable de réaliser dans ce domaine.

Cette mission et cette étude de faisabilité, par contre, ont démontré de façon explicite tous les avantages qu'une numérisation en trois dimensions apporte à l'archéologie, à différentes étapes du processus de fouille et à différents degrés pédagogique, scientifiques et muséographiques.

De plus, sans se contenter de montrer une utilité dont on se doutait déjà, nous avons montré que l'opération de numérisation en trois dimensions était parfaitement généralisable, autant au sein même d'un site, pour ce qui est des zones de fouille, que dans son environnement immédiat, pour ce qui est des artefacts lavés et marqués. La relative simplicité d'utilisation du scanner laser (en dépit de son coût), parallèlement à l'expansion phénoménale d'une culture informatique aux jeunes générations, laisse à penser que ce point de vue ne se réduit pas à une utopique supposition.

VI. Conclusion

Organisation

Tout au long de notre travail, nous avons dû sans cesse réorganiser notre emploi du temps, en fonction des rendez-vous, des travaux urgents ou du lieu de travail.

Initialement, comme introduit au paragraphe 1.4., notre stage devait se décomposer en quatre phases, la première pendant deux à trois semaines, la seconde pendant les deux mois suivants, la troisième pendant le quatrième mois et la cinquième à la fin s'il restait du temps à lui consacrer.

Ce qui abouti à un emploi du temps tel que celui-ci :

mars		Bibliographie
avril		Acquisition
mai		
juin	Conversion-Comparaison	
juillet	Conversion-Comparaison	
août	Validation	

Mais ce qui s'est finalement passé est plus analogue à cela :

mars		Bibliographie
avril	Acquisition- Conversion- Comparaison- Bibliographie	
mai		
juin		
juillet	Valid.	
août		

C'est-à-dire que, comme l'on pouvait s'y attendre, les phases 2 et 3 ont été entremêlées, et la recherche bibliographique s'est poursuivie tout

au long du stage, jusque pendant la rédaction du présent rapport. La phase de validation n'a également pas été faite, comme il était prévu, en fin de stage, mais pendant le mois de juillet. Nous avons en effet jugé préférable de conserver un temps précieux après cette phase pour pouvoir finaliser notre travail. Ce qui s'est révélé judicieux.

Le statut particulier du projet FOVEA a également suscité de nombreuses contraintes quant au lieu de travail, que les déplacements pour numériser ont amplifiées, et quant aux interlocuteurs de travail.

Ainsi, les différents endroits où nous avons travaillé sont :

- l'ESINSA lors de la phase de recherche bibliographique sur Internet au commencement de notre travail ;
- la bibliothèque de l'INRIA (trois jours durant) pour compléter la recherche bibliographique ;
- notre domicile de Sophia Antipolis pour la lecture des articles récupérés et leur classification ;
- l'IRIT (pendant quatre mois) surtout pour utiliser les machines puissantes mises à notre disposition et l'accès à Internet pour la recherche de contact et la communication avec les différents membres du projet ;
- notre domicile de Toulouse pour la programmation informatique des scripts de conversion et la rédaction de ce rapport ;
- et encore :
- l'hôpital de Purpan (deux jours) pour extraire en format DICOM et récupérer les données scannées par M. Pierre PAYOUX ;
- l'entreprise Kallisto, l'ENSEEIH, le laboratoire Archéovision de Bordeaux (en compagnie de M. Gérard SUBSOL) pour assister à la numérisation 3D des moulages ;
- le CERPT (une semaine) en compagnie des fouilleurs pour réaliser toute la quatrième phase de notre travail.

Les interlocuteurs principaux avec lesquels nous avons travaillé ont été :

- G. SUBSOL continuellement par mail et plusieurs fois par téléphone. Si nous ne l'avons vu que moins de 12 heures, nous avons interagi avec lui pendant cinq mois ;

- Bertrand MAFART, également par mail et au téléphone ;

- Jean-Pierre JESSEL à l'IRIT ;

- Véronique POIS du CERPT ;

- etc.

Nous avons donc dû accepter toute la responsabilité que sous entendait cette situation, que ce soit en supervisant les contacts et rendez-vous, pour parfois des sommes de plusieurs milliers d'euros, ou en résolvant seul les nombreux problèmes rencontrés.

Malgré tout, cette situation offrait également une grande autonomie, profitable à cette charge de responsabilité. Nous n'aurions pas pu assumer un tel travail en étant soumis à des contraintes ou des horaires trop stricts. C'est donc finalement un "climat de confiance" que nous avons instauré pour pouvoir réaliser notre tâche.

Cela s'est d'ailleurs très bien passé car nous avons pu achever notre étude dans les temps impartis

Résultats

L'étude comparative que nous avons menée nous a finalement permis de constater les avantages et les défauts de cinq dispositifs de numérisation en trois dimensions appliqués à des outils paléolithique. Cependant, nos résultats sont généralisables à tous les objets archéologiques ne nécessitant pas de visualisation interne. En effet, même si nous avons utilisé un scanographe médical qui offre cette possibilité, cet appareil ne peut être intégré facilement dans un processus de fouille archéologique de part son prix (à l'achat et à l'entretien) et son volume. Des acquisitions de ce type resteront exceptionnelles.

Les caractères de l'appareil type que nous avons fait ressortir sont les suivants :

- **portable et transportable** (à mettre en opposition avec le système de stéréovision de l'ENSEEIHIT qui est portable mais doit rester immobile une fois le calibrage réalisé) pour pouvoir entreprendre des opérations dans des milieux parfois hostiles (hautes ou basses températures, et, pourquoi pas, sous-marins);

- **acquisition de plusieurs centaines de milliers** de points au moins afin d'obtenir un

niveau de précision pertinent, combiné avec la possibilité d'ajouter de nouveaux détails sur des zones particulières (le tranchant des outils dans notre cas) ;

- **durée de numérisation ne dépassant pas la minute**, compte tenu de la quantité d'objets extraits d'une fouille archéologique en une journée ;

- **sans contact**, pour préserver les objets, témoins du passé ;

- **utilisation extrêmement simplifiée**, pour pouvoir être manipulé par un large éventail de personnes aux qualifications diverses, comme c'est le cas sur un chantier de fouilles ;

Un problème majeur reste néanmoins : le travail post-numérisation.

L'état actuel des recherches informatiques en matière de recalage des nombreuses vues issues d'acquisitions 3D (*range data* en anglais) et la complexité des différents logiciels d'analyse et de développement 3D témoignent de la difficulté d'une telle tâche. Le programme que nous avons utilisé offre une interface simple et pratique, mais le travail n'en est pas moins très important !

Poursuites

Ce stage offre de nombreuses possibilités de poursuites, en recherche informatique, mais également en paléoanthropologie.

Les nombreuses acquisitions que nous avons faites peuvent en effet être le support de travaux tels que la reconnaissance de formes, profitable à l'indexation et à la typologie, ou la restauration automatique d'éclats d'outils paléolithique, comme le projet de *lithic refitting* du 3D Knowledge. C'est une étape indispensable dans la compréhension des méthodes de taille. L'étude géométrique des outils en pierre peut aussi profiter de ces données pour être entreprise "virtuellement". Le problème de recalage de *range data* reste encore, et malheureusement, un thème de recherche vaste (cf. paragraphe 5.6.).

Les applications pédagogiques et scientifiques de reconstruction du sous sol sont aussi très nombreuses : la reconstitution de la zone C15 en y intégrant les artefacts scannés séparément par exemple, ou le redressement géologique de la couche de cette zone ainsi que celle de la zone D18.

Perspectives personnelles

C'est dans un but ambitieux et à long terme :- appliquer professionnellement à l'archéologie les compétences scientifiques de l'électronique, du traitement informatique de l'image et de la vision - que nous avons cherché et décidé de participer au projet FOVEA.

Notre stage de fin d'études nous permet ainsi de réaliser la liaison interdisciplinaire entre l'informatique et l'archéologie et de bénéficier d'appuis pour envisager un cursus universitaire exclusivement archéologique tout en conservant nos compétences précédemment acquises.

L'expérience remarquable que nous avons acquise au cours de ce stage ne se résume pas au seul domaine de la visualisation en trois dimensions.

Nous avons également porté une grande responsabilité, conséquence des importantes contraintes de travail, tout en évoluant au carrefour de nombreux domaines : paléanthropologie, archéologie, informatique, vision et numérisation. Ce sont plusieurs logiciels de visualisation et de traitement d'images, dispositifs d'acquisition, formats de fichiers que nous avons manipulés. Notre mission de fouilles à la Caune de l'Arago et nos recherches de

caractéristiques géométriques pour les outils paléolithiques nous ont amené à discuter avec de nombreux spécialistes, et à travailler avec de nombreux fouilleurs.

Les différentes acquisitions nous ont permis de rencontrer des spécialistes et experts dans le domaine de la numérisation 3D (M. Jérôme BARLET dispense des stages de formation dans toute la France) et plus particulièrement en archéologie virtuelle (Archéovision participe à de nombreux projets européens et internationaux).

C'est autant de compétences et d'enrichissements personnels dont nous avons finalement bénéficié.

La future participation au neuvième colloque international "*Archeology & Computer*" de Vienne ainsi que la prochaine publication d'un article dans les actes du même colloque vont nous permettre de voir l'aboutissement concret de notre travail et, nous le souhaitons, d'envisager de nouvelles perspectives.

Enfin, comme nous le souhaitons, ce stage vient parfaitement s'inscrire dans notre volonté professionnelle, consolidant les bases d'une future formation bidisciplinaire. Nous espérons seulement pouvoir continuer à faire progresser de tels travaux en y participant au maximum.

Bibliographie :

Introduction :

Le projet FOVEA :

[FOVEA, 2004]

<http://foveaproject.free.fr>

[DEL 02]

H. Delingette. "Bridging the gap between archeological datasets and digital representations. *XIV International Congress of Prehistoric and Protohistoric Science*, Liège (Belgium), September 2001. Abstract page 23 in preprints, full text in: **B. Mafart and H. Delingette** with the collaboration of **G. Subsol** (eds.) *Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology*, British Archaeological Reports International Series 1049, 89-92, 2002.

[DEL 01]

H. Delingette, E. Bardinnet, D. Rey, J.D. Lemarchal, J. Montagnat, S. Ourselin, A. Roche, D. Dormont, J. Yelnik, N. Ayache. "YAV++: a software platform for medical image processing and visualization". *IEEE International Workshop on Model-Based 3D Image Analysis (IMVIA'01)*, Utrecht (the Netherlands), October 18, 2001.

[Guipert et al., 2003]

G. Guipert, G. Subsol, J.P. Jessel, H. Delingette, B. Mafart. "The FOVEA Project: a New Look at Human Past". *9th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, Montreal (Canada), October 2003.

[Guipert 2003]

G. Guipert. "Application de la modélisation 3D à la reconstruction de fossiles humains". Master's Thesis, D.E.S.S. Compétence Complémentaire en Informatique, Université d'Aix-Marseille II, September 2003

[JES 99]

J.P. Jessel, C. Chaillou, A. Luciani, A. Habibi. "State of the art: image synthesis and virtual reality". G. Subsol (ed.), *International Scientific Workshop on Virtual Reality and Prototyping*, Laval (France), 69-76. June 1999.

[MAI 04]

C. MAIZA. "Etude de techniques d'appariement entre formes modèles et fragments de poteries sigillées". D.E.A. Informatique de l'Image et du Langage, Université Paul Sabatier de Toulouse, July 2004.

[THOM 04]

J.C. Thomas. "Environnements virtuels pour l'interaction avec de grands ensembles de données". Master's Thesis, D.E.A. Informatique de l'Image et du Langage, Université Paul Sabatier de Toulouse, July 2004.

L'Institut de Recherche Informatique de Toulouse :

[TOR 99]

P. Torguet, O. Balet, E. Gobbetti, J.P. Jessel, J. Duchon, E. Bouvier. "CAVALCADE: a System for Collaborative Prototyping". G. Subsol (ed.), *International Scientific Workshop on Virtual Reality and Prototyping*, Laval (France). June 1999.

Archeologie Virtuelle :

[Forte et al., 1996]

Maurizio FORTE, J. Leclant, D.-A. Canal. "Archéologie virtuelle, le passé retrouvé." Arthaud, Paris, **1996**.

[PAG 88]

Heinz PAGELS, The Dreams of Reason, **1988**

Jean-Marie PESEZ, "L'archéologie, Mutations, Missions, Méthodes." Nathan, Paris, **1997**.

John PFEIFFER, The Creative Explosion, **1982**

Numérisation 3D :

[BER 03]

Prof. A. BERNARD. "3D digitizing: key concepts and issues for industrial applications." IRCCyN UMR CNRS 6597, 2003.

[DA 01]

Helena Cristina DA GAMA LEITAO & Jorge STOLFI. "Digitization and Reconstruction of Archeological Artifacts." Proc. of the XIV Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, **2001**.

[DEL 01]

H. DELINGETTE et G. SUBSOL "Application des méthodes informatiques tridimensionnelles à la paléontologie humaine et à l'archéologie préhistorique. Colloque de l'université de Liège. **2001**.

<http://bertrand.mafart.free.fr/Full%20text/articleBAR.pdf>

[KAM 03]

Martin Kampbel, Robert Sablatnig, "An automated pottery archival and reconstruction system." The Journal of Visualization and Computer Animation, **2003**; 14: p 111-120.

[SCHUR]

Utsav Schurmans, Anshuman Razdan, "Avances in Geometric Modeling and Feature Extraction on Pots, Rocks and Bones for Representation and Query via the Internet." Arizona State University.

[SCHA 03]

M. Schaich, "les nouvelles techniques de numérisation 3D lors de fouilles." Abstract de la conférence de la société « ArcTron GmbH », Vienne, avril **2003**.

<http://www.archaeologie-wien.at/caa2003/papers/139.htm>

[TOS 01]

Srdan Tosovic, Robert Sablatnig. "3D modeling of archeological vessels using shape from silhouette." (Vienna University), Proc. of the Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, **2001**.

abstracts des conférences « Enter the Past » **2003** de la Wiener Stadtarchaeologie :

<http://www.archaeologie-wien.at/caa2003/topics/16.htm>

Abstracts des conférences regroupées sous le titre : « 3D modelling of artefacts » :

<http://www.archaeologie-wien.at/caa2003/workshops/wo233.htm>

Description du travail de Martin Kampel de l'université de technologie de Vienne :

<http://www.prip.tuwien.ac.at/Research/3DVision/struct.html>

Paleolithic archeology and 3D visualisation technologies, article de Julien Riel-Salvatore du PRISM :

<http://3dk.asu.edu/archives/publication/surface/Palaeolithic%20archaeologyand3Dvisualisationtechnology.pdf>

Yav++ :

[GUI 04]

Gaspard GUIPERT, "Manuel d'utilisation de yav++", université de Marseille, France, **2004**.

[GUI 03]

Gaspard GUIPERT, "Modélisation tridimensionnelle et exploitation de données crâniennes scannographiques. Utilisation de Yav++", rapport de stage DESS, IRIT, France, **2003**.

Stéréovision :

[CHA 98]

V.CHARVILLAT, B.THIESSE, "Estimation de paramètres en vision par ordinateur : après des méthodes robustes encore des méthodes robustes", Congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA'98), Clermont Ferrand, France, **1998**.

[CHA 97]

Vincent CHARVILLAT, "Stéréovision Incrémentale appliquée à la modélisation tridimensionnelle d'obets", Thèse, France, **ENSEEIH**T, **1997**.

[CHA 94]

Vincent CHARVILLAT, "Vers un algorithme d'optimisation combinatoire dédié à l'appariement d'un couple d'image stéréoscopiques", Rapport de fin d'études, France **ENSEEIH**T, **1994**.

[MAR 93]

Fernando MARTINEZ-RODRIGUEZ, "MMT Un système de stéréovision anthropomorphe pour le calcul de cartes denses de profondeurs", Thèse, France, **ENSEEIH**T, **1993**.

[MART 03]

Ph. MARTHON, "Vision par ordinateur", INP-ENSEEIHT, **2003**.

[RAG 89]

Camille RAGI, "N.O.I.S.I.V. : un système pour l'expérimentation en vision passive tridimensionnelle par ordinateur", Thèse, France, **ENSEEIH**T, **1989**.

[THI 03]

Bernard THIESSE, "TP de vision par ordinateur", Enoncé de Travaux Pratiques, France, **ENSEEIH**T, **2003** ;

[THI 99]

B. THIESSE, V. CHARVILLAT, "L'autocalibrage de caméras par ajustements de faisceaux revisité. Usage d'une mire plane", Rapport Technique LIMA, **1999**.

Scanographe médical :

Site internet : www.radiologie.hcuge.ch, département de radiologie des hôpitaux de Genève.

[BACH et al.]

Site internet : www.esce-metz.fr/metz/eleves/themes/imagerie/scannerX.htm de Ghislain BACH, Pascal COULOMB et Christophe LEPRINCE

Scanner laser :

[MUL]

Muellerr C. "homemade 3d scanner - the working principle, further details."

Iterated Closest Point et recallage de prises de vues :

[BESL 92]

P. J. Besl and N. D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2):239-256, February **1992**.

[BLA 95]

Blais, G. and Levine, M. "Registering Multiview Range Data to Create 3D Computer Objects," Trans. PAMI, Vol. 17, No. 8, **1995**.

[CHE 92]

Y. Chen and G. Medioni. Object modelling by registration of multiple range images. Image and Vision Computing, 10(3):145-155, April **1992**.

[CHE 91]

Chen, Y. and Medioni, G. "Object Modeling by Registration of Multiple Range Images," Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, **1991**.

[EGG 98]

D.W. Eggert, A.W. Fitzgibbon, and R.B. Fisher. "Simultaneous Registration of Multiple Range Views for use in Reverse Engineering of CAD Models". Computer Vision and Image Understanding, 69(3):253-272, March **1998**.

[FAU 86]

O. D. Faugeras and M. Hebert. The representation, recognition, and locating of 3-d objects. International Journal of Robotic Research, 5(3):27-52. Fall **1986**.

[GOD 94]

Godin, G., Rioux, M., and Baribeau, R. "Three-dimensional Registration Using Range and Intensity Information," Proc. SPIE:Videometrics III, Vol. 2350, **1994**.

[HOR 87]

Horn, Berthold K. P., "Closed-Form Solution of Absolute Orientation Using Unit Quaternions," Journal of the Optical Society of America. A, Vol. 4, No. 4 (April **1987**), pp. 629–642.

[LEV 00]

Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Ginzton, M., Anderson, S., Davis, J., Ginsberg, J., Shade, J., and Fulk, D. "The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues," Proc. SIGGRAPH, **2000**. pp 131-144.

[NEU 97]

Neugebauer, P. "Geometrical Cloning of 3D Objects via Simultaneous Registration of Multiple Range Images," Proc. SMA, **1997**.

[PUL 97]

K. Pulli. Surface reconstruction and display from range and color data. PhD thesis, Dept. of Computer Science and Engineering, Univ. of Washington, December **1997**.

[RUS 01]

S. Rusinkiewicz and M. Levoy. Efficient variants of the ICP algorithm. Proc. 3DIM, **2001**.

[SCH 98]

C. Schütz, T. Jost, and H. Hügli. "Semi-Automatic 3D Object Digitizing System Using Range Images". Proceedings of Asian Conference on Computer. Vision, Jan. **1998**. I:531-536. 13-15 June 2000

[SHA 00]

G. C. Sharp et al. ICP Registration using Invariant Features. Dept. of Media Technology, Univ. of Seoul, September 21, **2000**.

[STA 00]

I. Stamos and P. Allen. "3D Model Construction Using Range and Image Data". Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition **2000**.

[TUR 94]

G. Turk and M. Levoy. "Zippered Polygon Meshes from Range Images". Proc. of SIGGRAPH '94 (Orlando, Florida, July 24-29, 1994). In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, **1994**. ACM SIGGRAPH, pp. 311-318.

[WEI 97]

S. Weik. Registration of 3-d partial surface models using luminance and depth information. In proc. Int. Conf. on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, pp 93-00, May **1997**.

[ZHA 94]

Z. Zhang. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. International Journal of Computer Vision, 13(2):119-152, **1994**.