

Du terrain au musée : applications 3D en archéologie



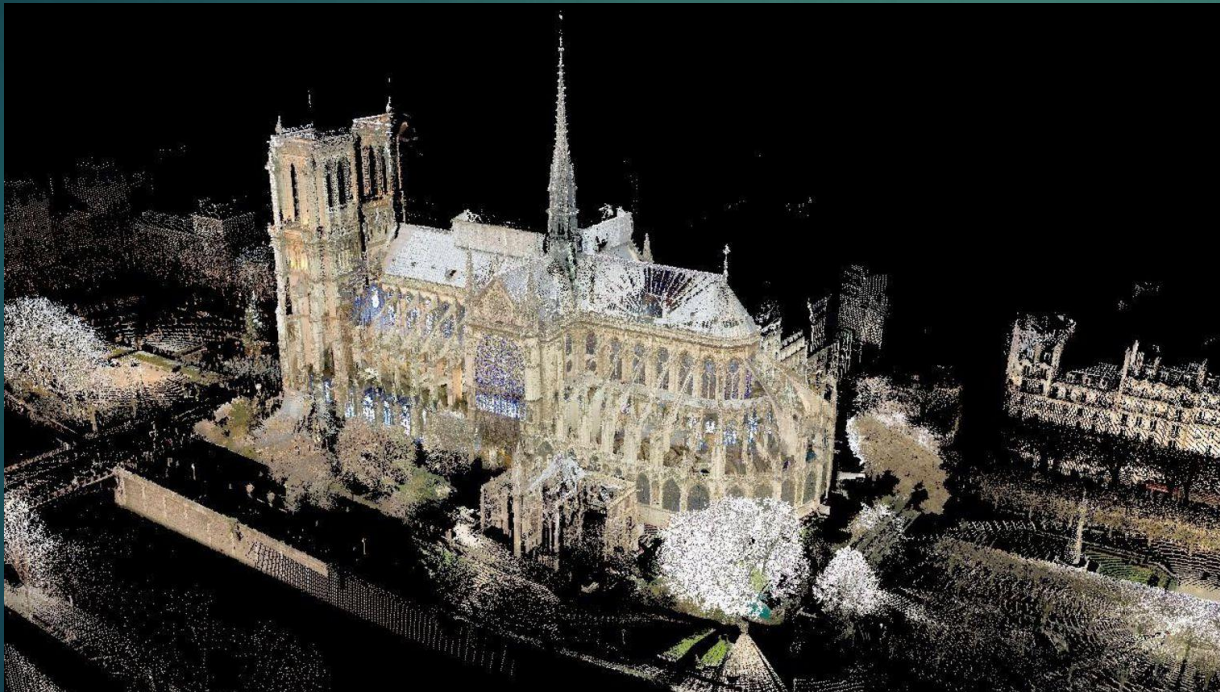
Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Licence d'archéologie (semestre 6 – 3^e année)
ARCHEOMETRIE
F. Giligny v. 5

- ▶ 1. Besoins et objectifs
- ▶ 2. Méthodes et techniques d'acquisition 3D
- ▶ 3. Usages en archéologie
- ▶ 4. Visualiser, reproduire et conserver les données

« L'effet Notre-Dame » et l'urgence de la sauvegarde numérique des données

3

- ▶ Le patrimoine matériel et immobilier est périssable et toute donnée encore inédite et non préservée sous forme numérique risque de disparaître à jamais du jour au lendemain
- ▶ Projet Notre-Dame numérique : <https://www.notre-dame.science>



Modèle d'Andrew TALLON, enseignant-chercheurs en Histoire de l'art comme initiative personnelle 2006-2012

Ce modèle a été utilisé comme base du projet de restauration

D'autres modèles 3D existaient également, mais aucun n'était aussi précis et aucun créé par commande institutionnelle du Ministère de la Culture ou des Monuments Historiques

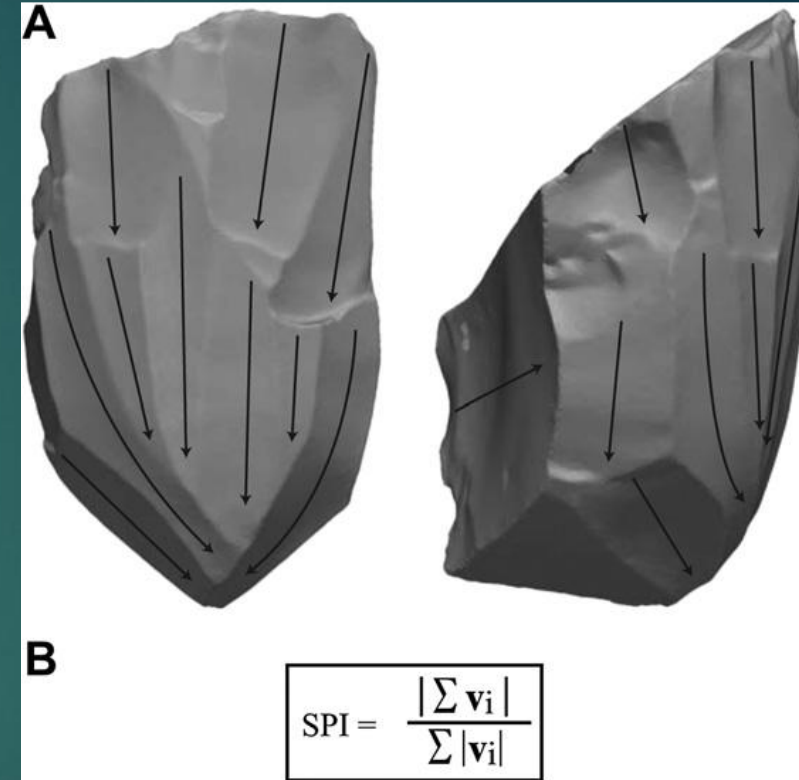
1. Besoins et objectifs

- ▶ Enregistrement & analyse des données
- ▶ Visualisation, manipulation d'objets
- ▶ Communication
- ▶ Conservation, archivage

11. Enregistrement & analyse des données

5

- ▶ Archives de fouille 3D en vue d'analyses et de restitutions, analyse spatiale 3D/4D
- ▶ Prise de mesures, calculs, extraction de volumes (calotte crânienne, dégraissant céramique)
- ▶ Étude architecturale anastylose virtuelle, archéologie du bâti
- ▶ Remontages virtuels (céramiques, lithique, documents d'archives) préliminaires ou non à un remontage physique
- ▶ Analyse technologique : détection des enlèvements sur de l'industrie lithique, tracéologie & étude des macrotraces

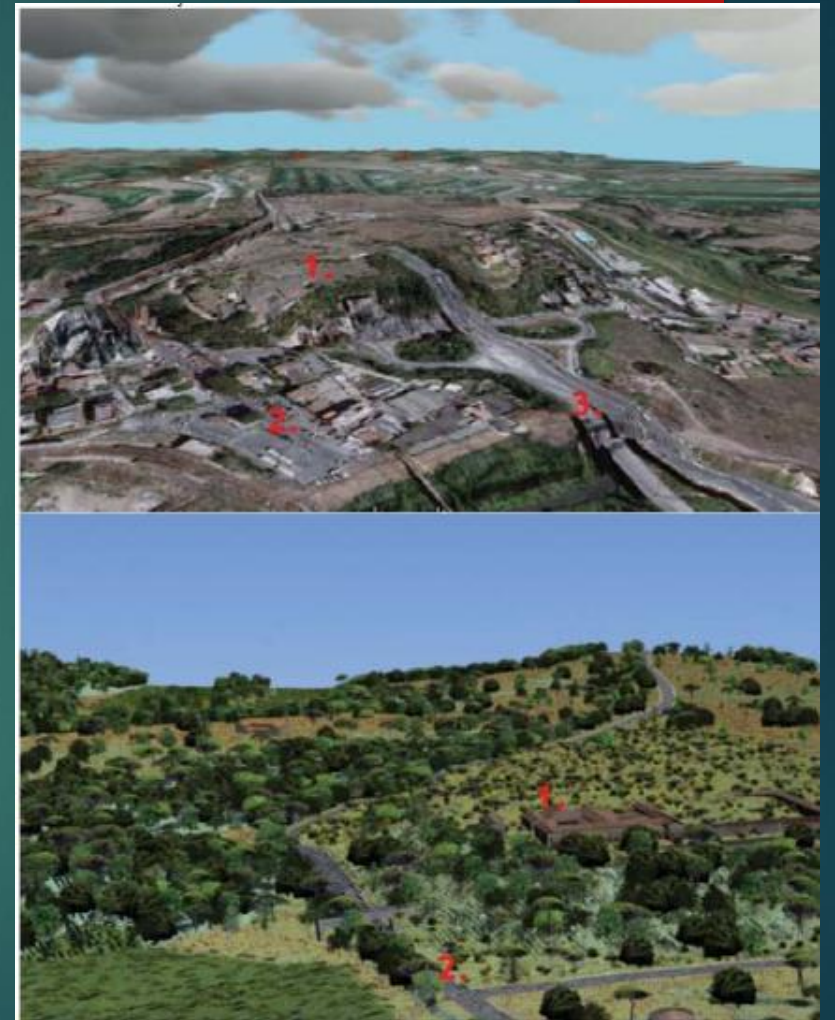


Définition de
vecteurs sur les négatifs
d'enlèvements dans le sens
de la longueur par calcul sur
le modèle 3D

12. Visualisation, manipulation d'objets

6

- ▶ visualiser un paysage (terrestre, marin),
- ▶ gérer des relevés archéologiques archéologiques (créer, vérifier, comparer, générer des vues virtuelles);,
- ▶ naviguer au sein d'un site inaccessible (grottes, citernes, aqueducs),
- ▶ manipuler des objets volumineux, trop fragiles ou inaccessibles (collections de référence dispersées : atlas virtuel),
- ▶ identifier des parties manquantes pour une restitution virtuelle/réelle.



Villa of Livia: the archaeological landscape (top) today and the ancient Roman landscape (Forte 2008)

13. Communication

7

- ▶ Type de communication
 - Présentation des sites archéologiques et des données au public
 - Communication scientifique;
- ▶ Choix de la restitution :
 - Réalité virtuelle;
 - Réalité augmentée ou mixte
 - Impression, affichage

Restitution
des
monuments
dans leur
état initial
ou des
décors et
couleurs en
RA



14. Conservation, archivage

8

Objectif de la conservation/protection du patrimoine :

- ▶ Préserver un double numérique de monuments dégradés ou en cours de dégradation (ex : Lascaux, monuments en zone de conflit ou sismiques)
- ▶ Documenter les états de fouilles ou les sols avant l'intervention (sols de grottes décorés, niveaux archéologiques)
- ▶ Documenter les états de conservation pour la conservation/restauration préventive des artefacts
- ▶ Consultation & visualisation du double numérique (manuscrits, grottes, momies)



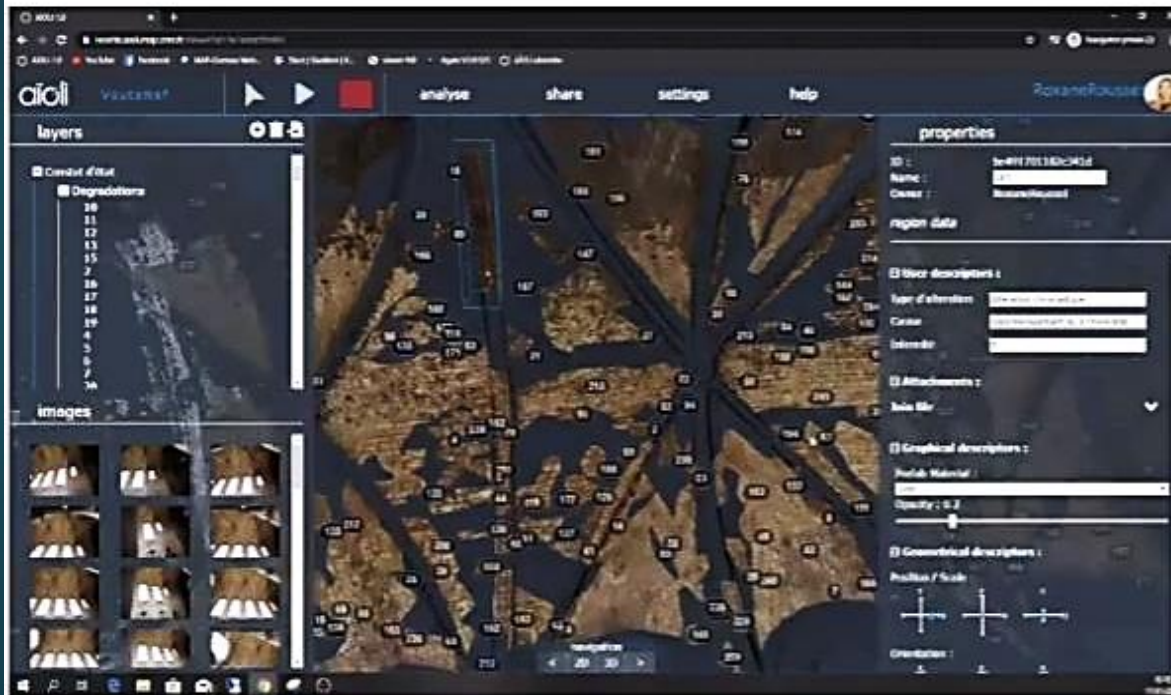
Modèle 3D de Notre-Dame de Paris
(© Andrew TALLON)

La 3D en archéologie

- ▶ numérisation 3D à partir de l'existant,
- ▶ modélisation géométrique 3D,
- ▶ réalité virtuelle, réalité augmentée, réalité mixte,
- ▶ impression 3D.

nDame • écosystème numérique • enrichissement sémantique

Equipe : Thomas Pouyet (CITERES), Denis Hayot (Plemo3D), Violette Abergel (MAP), Sara Tournon (Archéovision), Olivier Malavergne (LRMH), Isabelle Cao (MAP), Miles Rousset (MOM), Joel Marchand (Huma-Num). **Porteurs :** P. Dillmann (IRAMAT), L. De Luca (MAP), D. Sandron (Plemo 3D), X. Rodier (MASA), X. Granier (3DSHS)



Aïoli (MAP)

- Spatialisation 3D de photographies
- Plusieurs calques d'annotation 2D/3D
- Descripteurs qualitatifs configurables
- Calcul de descripteurs géométrico-visuels
- Ajout de ressources complémentaires
- Vocabulaires contrôlés (connexion OpenThés)

- Les projets comme Notre-Dame numérique développé par le groupe de chercheurs y travaillant ont permis le partage en temps réel de toutes les données 2DF et 3D sur la cathédrale, avec des techniques d'annotation des documents (Aïoli)
- Le travail collaboratif est un des aspects innovants des projets impliquant la 3D

2. Méthodes & techniques d'acquisition/numérisation 3D

► **De surface :**

- Lidar,
- photogrammétrie,
- Lasergrammétrie
- Lumière structurée

► **Du volume complet :**

- tomodensitométrie

➤ La technique choisie doit être :
Adaptée à la nature de l'objet, sa taille sa complexité, sa réflectance

➤ L'équipement est choisi en fonction de
Son coût, sa portabilité, son contrôle par l'utilisateur

➤ La qualité du résultat dépend de
La précision du modèle (géométrie et texture),
les outils et algorithmes de traitement

➤ Veiller aux formats d'exportation (ouverts)

La méthode Lidar

12

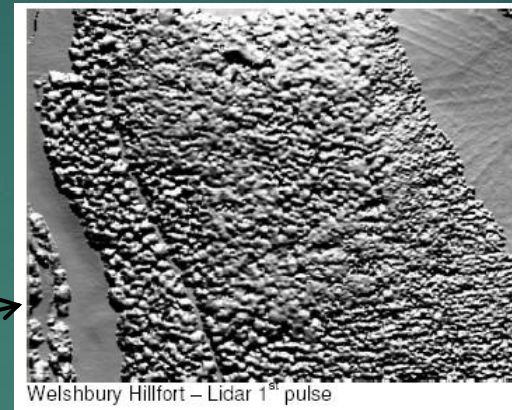
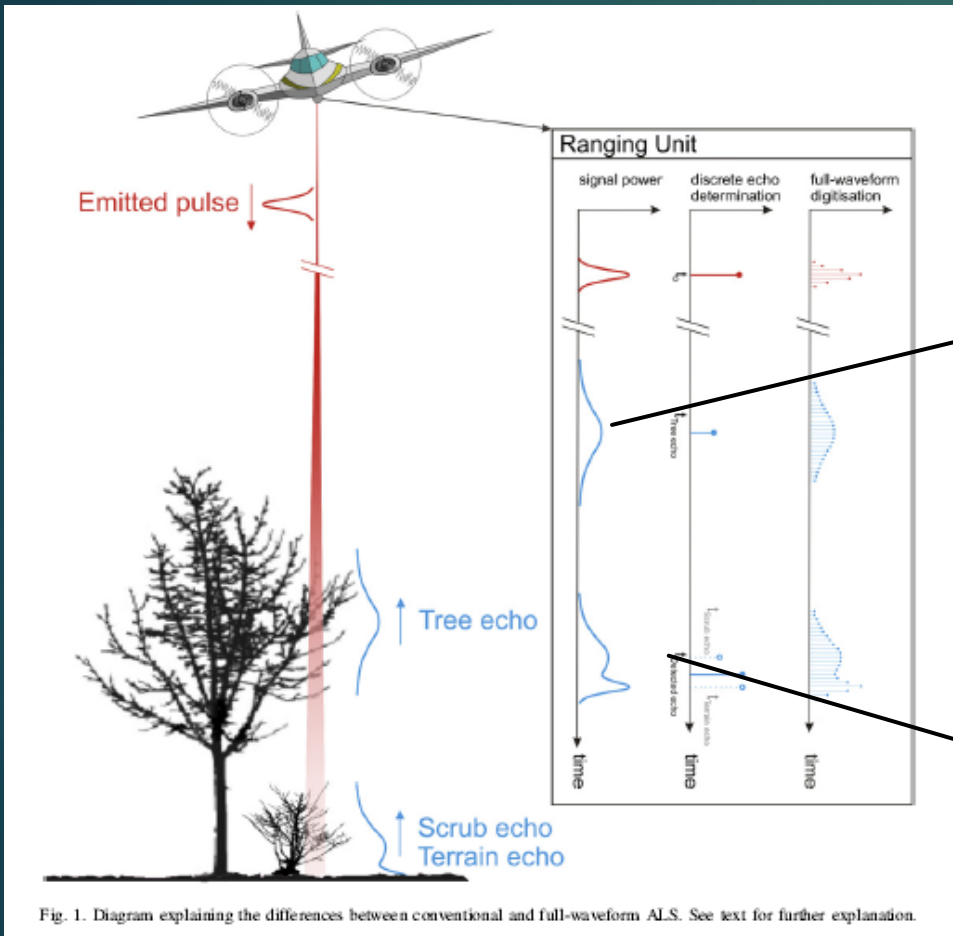
« **L**ight **D**etection **a**nd **R**anging » (LIDAR) ou télédétection par laser aéroporté ou *Airborne Laser scanning* (ALS)

- ▶ Similaire au fonctionnement du radar utilise un faisceau laser, contrairement au radar qui utilise des ondes radio (faisceau électromagnétique)
- ▶ le lidar couvre plusieurs spectres : visible, ultraviolet et infrarouge
- ▶ Ses premières utilisations datent de 1962 (calcul de la distance terre-lune), mise au point de mesures de précision vers 1995, applications à l'archéologie depuis les années 2000
- ▶ Il sert à élaborer un modèle numérique de terrain après traitement avec une précision allant jusqu'à une centaine de points/m²

La résolution des données pour un MNT à l'échelle mondiale est souvent de 30 à 90 m (1 point tous les 30 à 90 m)

LIDAR (Light Detection and Ranging)

13



Détection de la cîme



Détection au sol

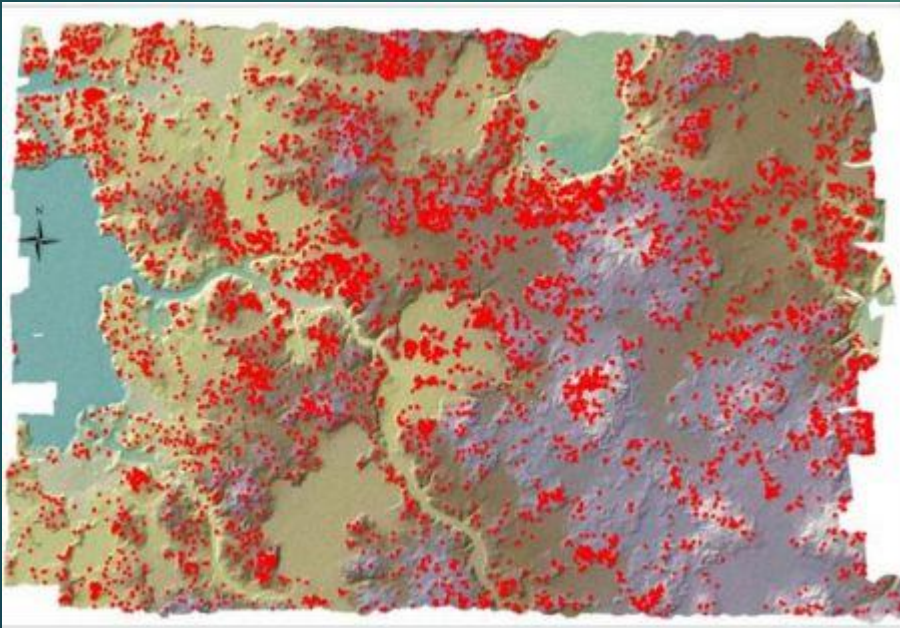
- Échos des strates de végétation et au niveau du sol nécessitant un filtrage des données
- Révèle les structures au sol avec une haute résolution
- Possibilité d'utiliser des drones

Développé en priorité dans les zones forestières, le lidar fonctionne aussi bien de jour comme de nuit.

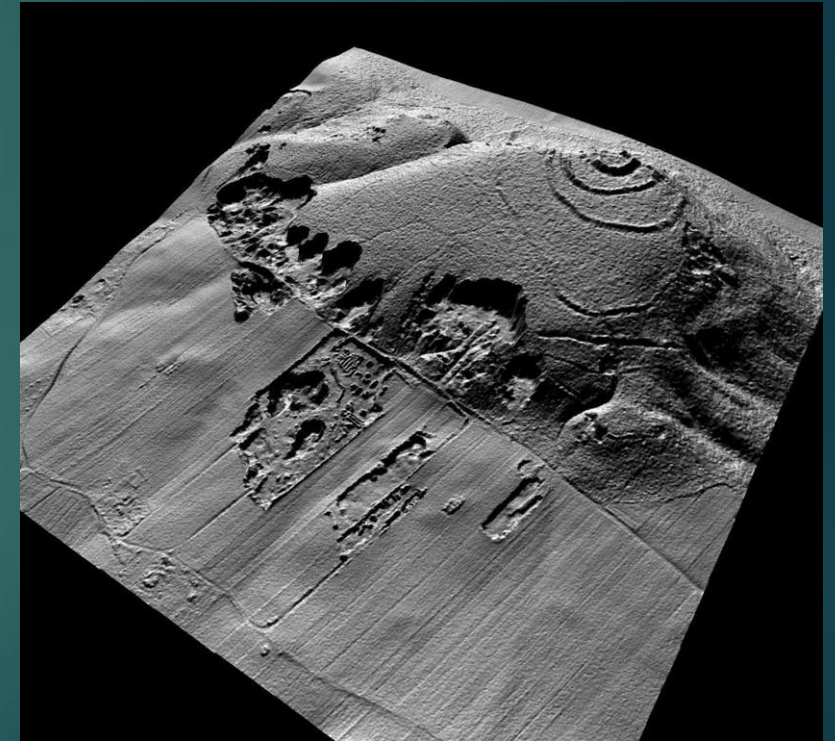
Lidar

14

- ▶ Utilisé en prospection pour couvrir de grandes surfaces, essentiellement en milieu forestier.
- ▶ De nombreuses agences gouvernementales mettent à disposition des données Lidar, comme l'ONF ou les agences de gestion de l'eau
- ▶ Le temps d'acquisition peut aller jusqu'à 1000 km²/jour
- ▶ Des découvertes exceptionnelles en zone tropicale



12000 structures discovered at Naachtun, a Maya city

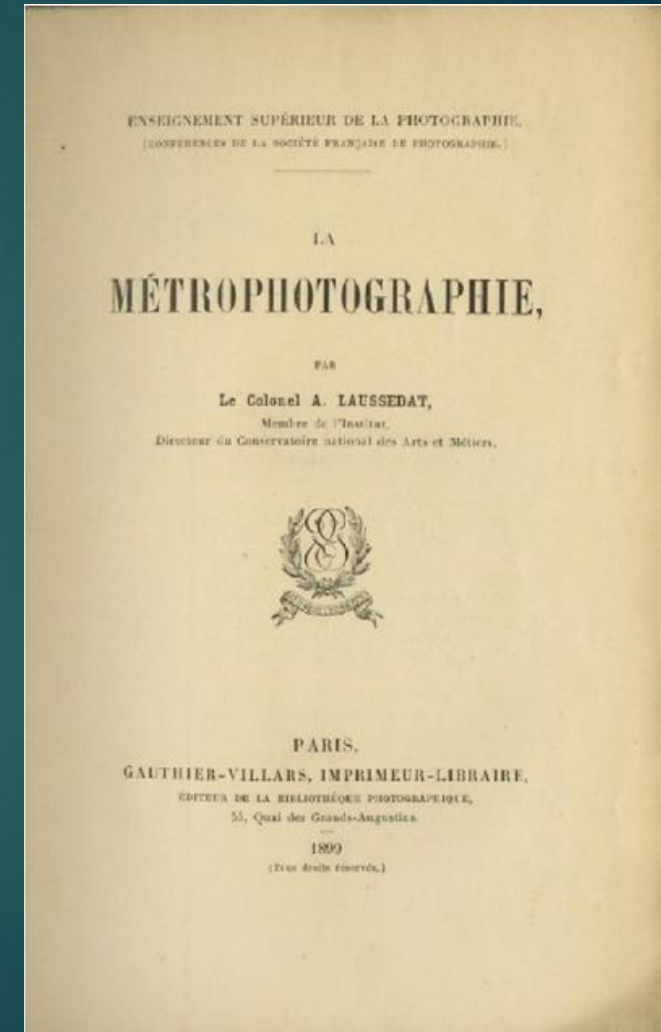


Ex : projet ISOK couverture Lidar de toute la Pologne - Mont Chełmo structures médiévales

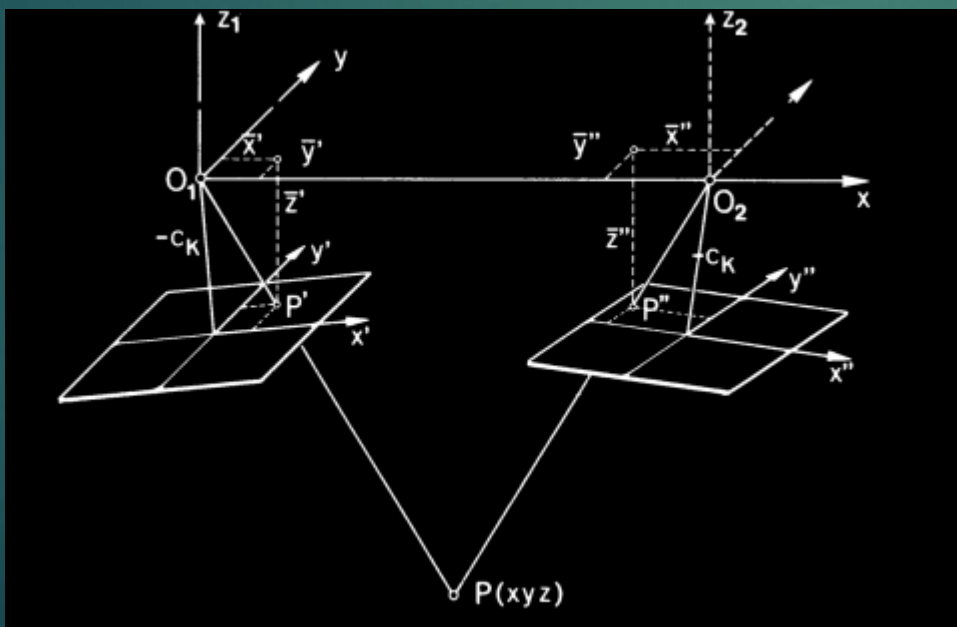
La photogrammétrie

15

- ▶ « Technique permettant de déterminer les dimensions et les volumes des objets à partir de mesures effectuées sur des photographies montrant les perspectives de ces objets » (source : Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales)
- ▶ utilisée en photographie aérienne pour reconstituer les reliefs et en relevé architectural
- ▶ Invention par un militaire et un architecte : métrophotographie de A. Laussedat (1859) , Albrecht Meydenbauer architecte prussien (1867)
- ▶ Principe d'utiliser la parallaxe : le changement de point de vue de l'observateur sur l'objet observé

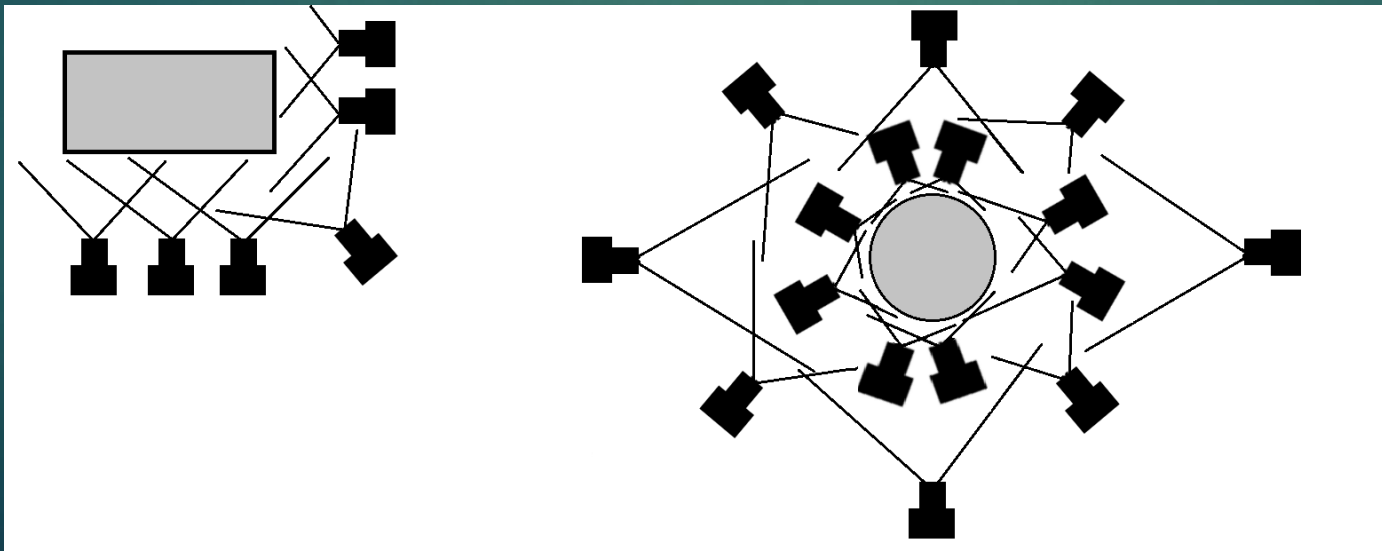


- ▶ A partir de multiples clichés qui se recouvrent partiellement, l'ordinateur calcule la position des points dans l'espace comme le fait le cerveau qui analyse l'espace à partir de ce que l'oeil lui transmet.
- ▶ La qualité du modèle n'augmente pas forcément avec le nombre de clichés (augmente le temps de calcul)
- ▶ Nécessité de « nettoyer » le modèle des clichés ou des points mal positionnés dans l'espace



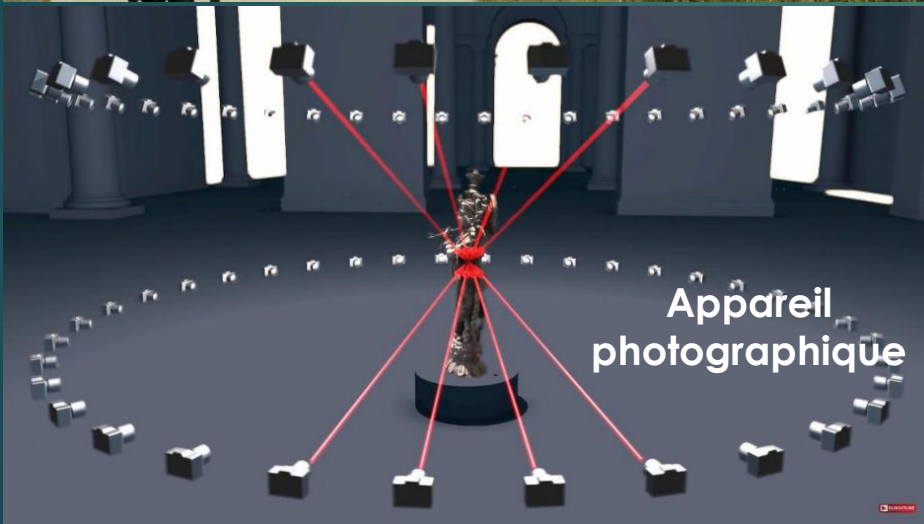
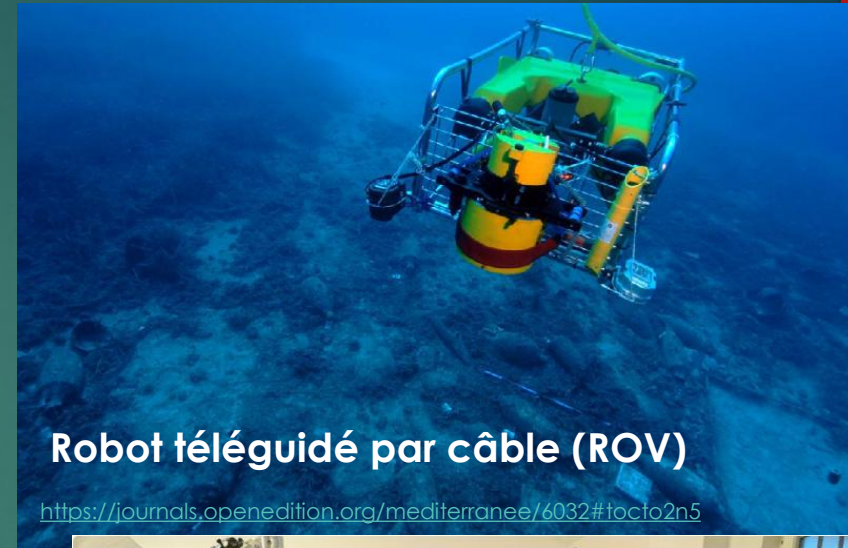
Identification d'un point homologue et positionnement des chambres photographiques dans l'espace selon les règles de la perspective et des lignes de fuite traduites mathématiquement

- ▶ Permet de reconstituer un modèle 3D géométriquement exact à partir de photographies
- ▶ Possibilité de mesurer les distances sur le modèle plutôt que sur l'objet
- ▶ Coût faible et temps de travail également
- ▶ Inconvénients : difficile sur des objets très sombres ou transparents
- ▶ Équipements : appareil photographique et ordinateur



Appareils & dispositifs de prises de vue

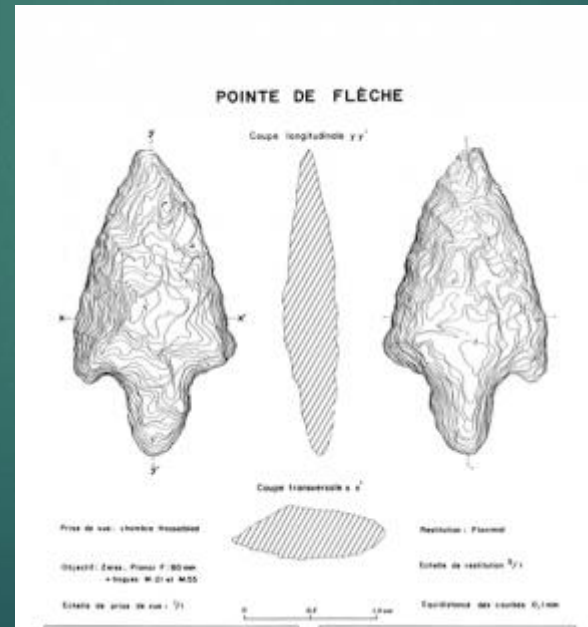
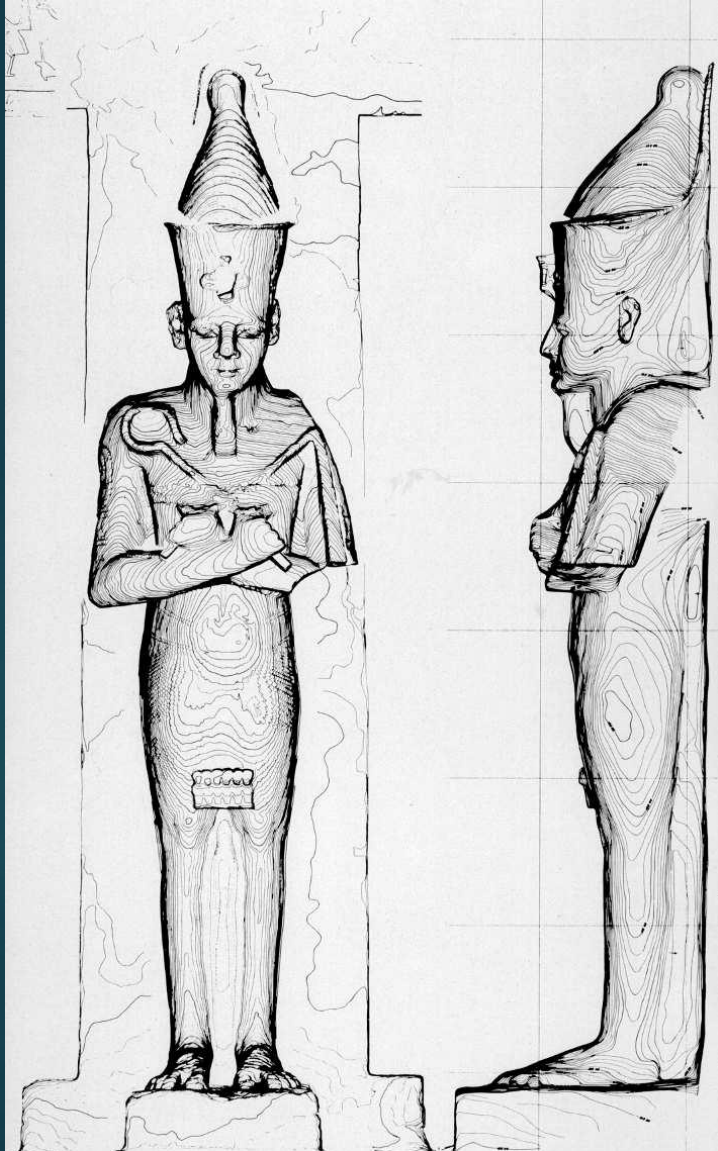
18



Différents types d'appareils peuvent être utilisés pour les photographies, appareils photographiques reflex, smartphones – dont les capteurs permettent de faire des modèles 3D de qualité, avec des dispositifs divers : drones, robots sous-marins, studios à prises multiples simultanées (pour du bodyscan).

Types d'applications

- Cartographie
- Relevés de monuments avant démontage/destruction
- Relevés de sculptures
- Relevé de surfaces de fouille (très utilisé en archéologie sous-marine dès les années 1950)



Les anciens rendus photogrammétriques étaient présentés sous la forme de surfaces 2D avec courbes de niveaux

Temple d'Abou Simbel : Ramsès II,
Campagne de sauvegarde des temples UNESCO 1959-1980

Lasergrammétrie et scanner laser 3D

20

- ▶ Le scanner laser 3D permet la numérisation et l'acquisition d'un volume afin de produire un modèle tridimensionnel
- ▶ Plusieurs types de scanners : types de scanner : manuel ou sur trépied, commande manuelle ou via un logiciel, actif ou passif
- ▶ Nécessité de faire plusieurs passages, cela dépend de l'équipement et du type d'objet
- ▶ Génère un nombre de points très important, nécessité de traiter ensuite les données et de les « nettoyer »
- ▶ Système de référence géométrique relatif ou géoréférencé

Le laser scanner 3D

21

- Scanner à main, boîtier et scanner sur trépied



**Scanner sur trépied
(100-120 m de distance)**



**Scanner à main
(quelques mètres)**



**Scanner en boîtier
(10-80 cm)**

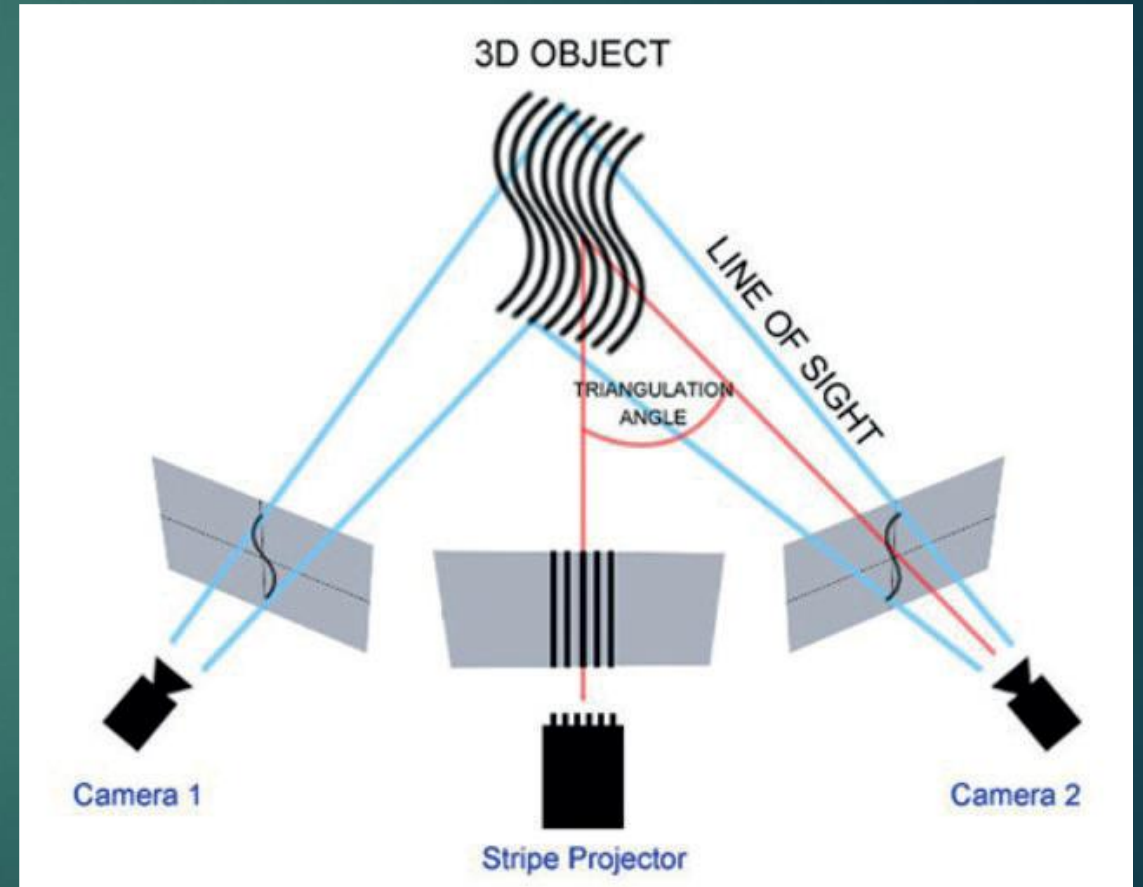
Une autre technologie non laser consiste à projeter des trames lumineuses sur l'objet qui renvoie un signal et permet de construire un nuage de points (scanner à lumière structurée)
Le coût des équipements varie entre plusieurs milliers d'€ à plus d'une centaine de milliers d'€

Fonctionnement du scanner laser: <https://youtu.be/h31tD4zz18w>

Alternative : le scanner à lumière structurée

22

- ▶ scanners à lumière structurée ou scanners à balayage de lumière projetée émettent une trame lumineuse sur l'objet à numériser
- ▶ La mesure de la déformation de la trame à la surface de l'objet permet de mesurer la distance entre le scanner et la surface déformée et donc d'acquérir un nuage de points



Sur le terrain

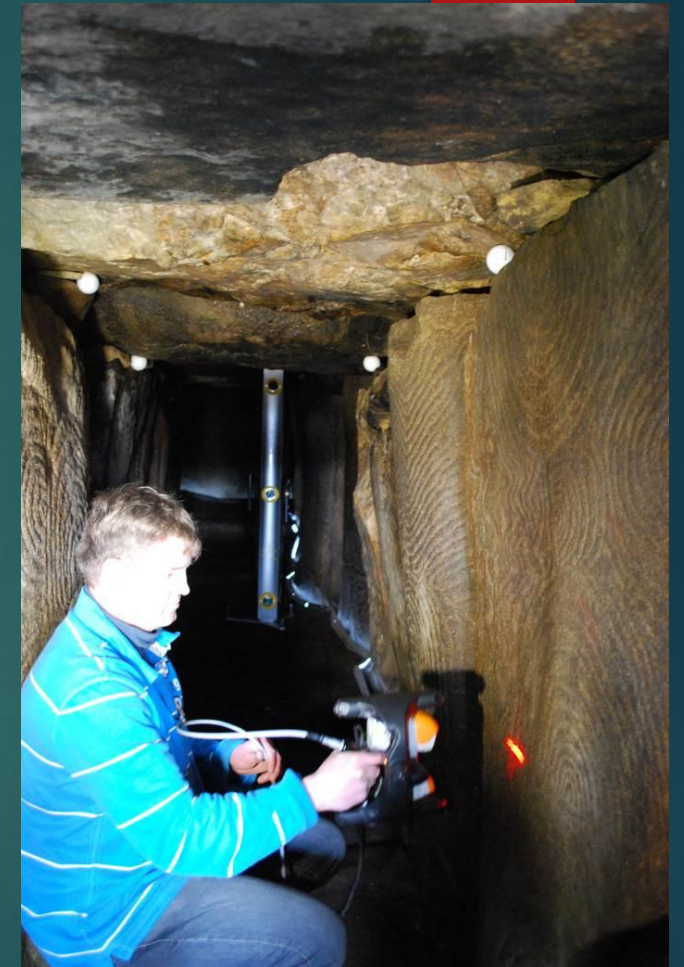
23



Numérisation au scanner laser sur trépied en archéologie du bâti



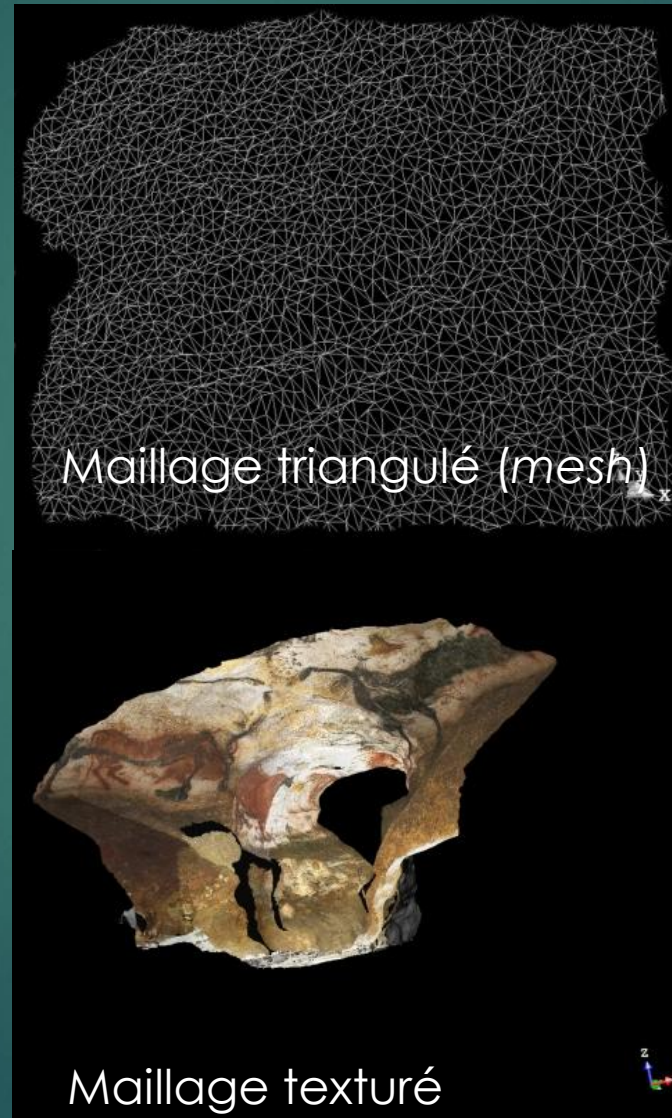
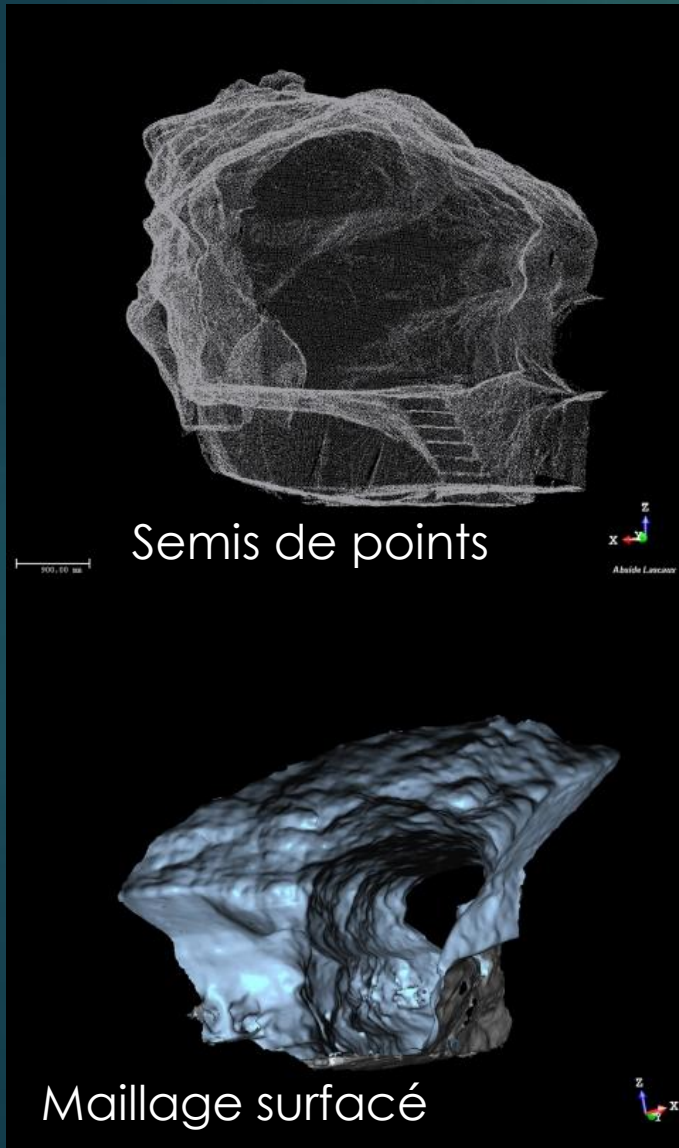
Acquisition avec un scanner à lumière pulsée dans l'abbatiale de Bernay © F. Giligny



Numérisation au laser dans un site mégalithique néolithique (tombe à couloir de Gavrinis) 2011 © Cassen

Procédure : les 4 étapes de la création d'un modèle 3D

24

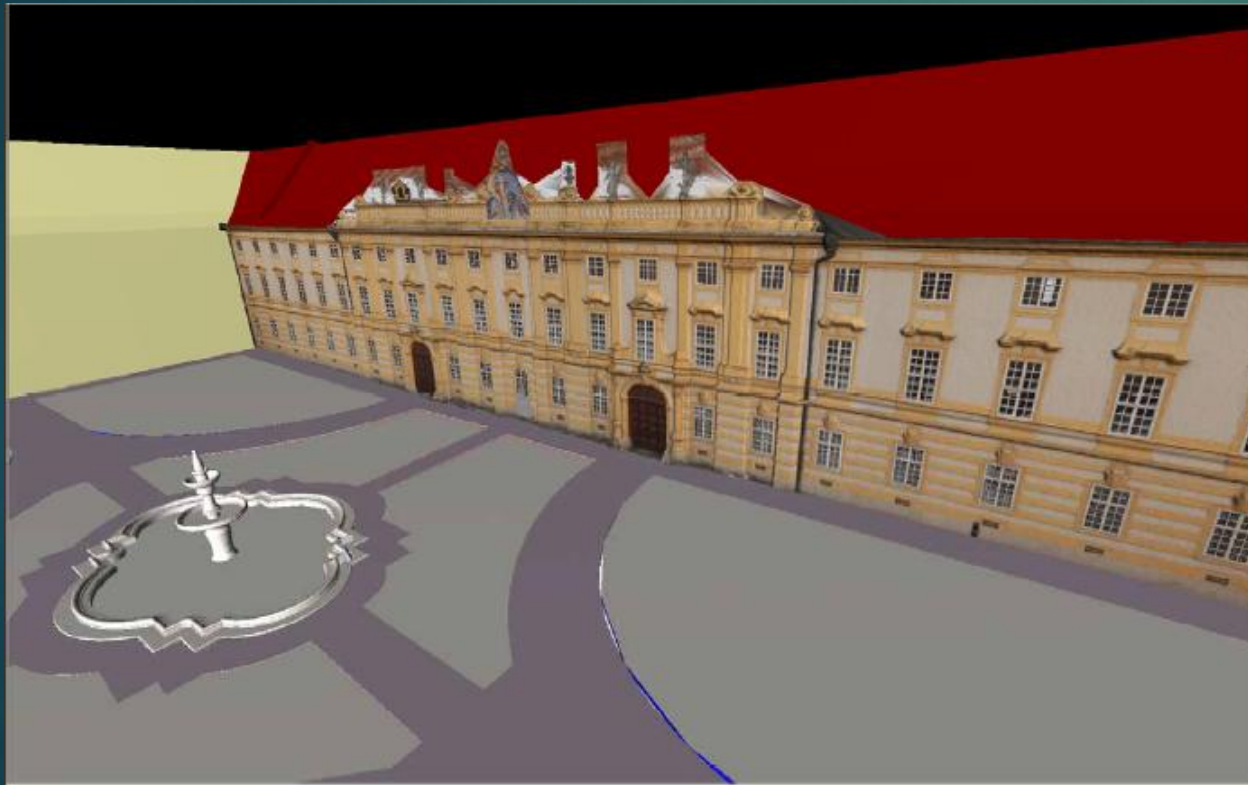


1. Le nuage de point doit être tout d'abord nettoyé des points aberrants
Celui-ci peut être simplifié pour réduire la taille du nuage difficile à manipuler
2. Le maillage ou mesh est construit sur le principe des triangles de Delaunay
3. Une surface est construite et lissée (maillage surfacé)
4. La texture peut être juxtaposée si nécessaire (tous les scanners intègrent des appareils photographiques pour acquérir la texture).

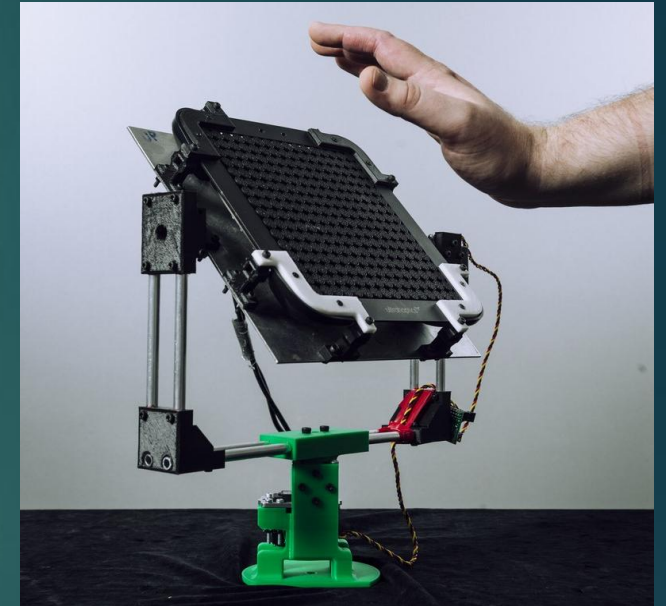
Texture réelle versus texture virtuelle

25

L'ajout de textures peut se faire à partir de photographies ou, comme ici, de textures virtuelles appliquées aux volumes identifiés selon leurs matériaux.



Modèle 3D après un scan TLS texturé

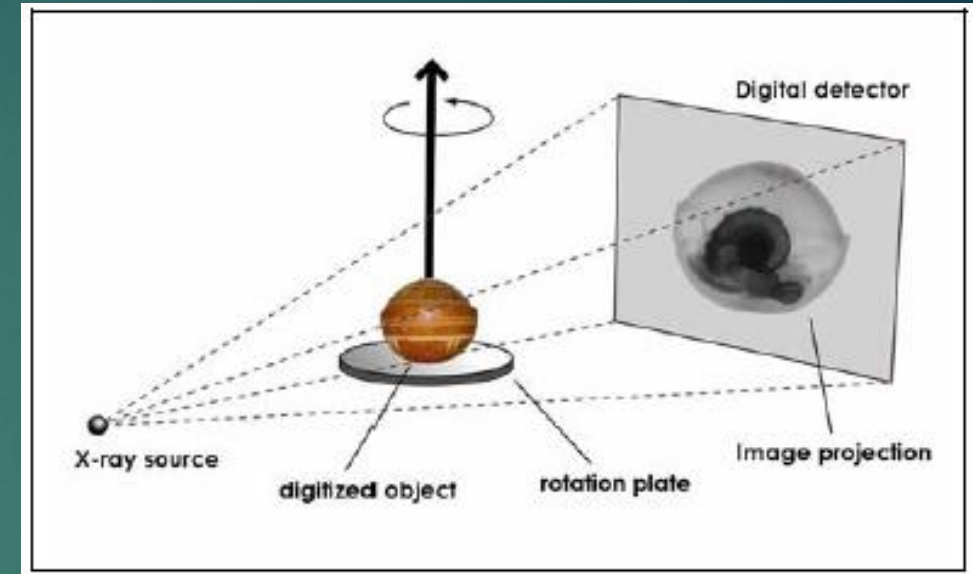
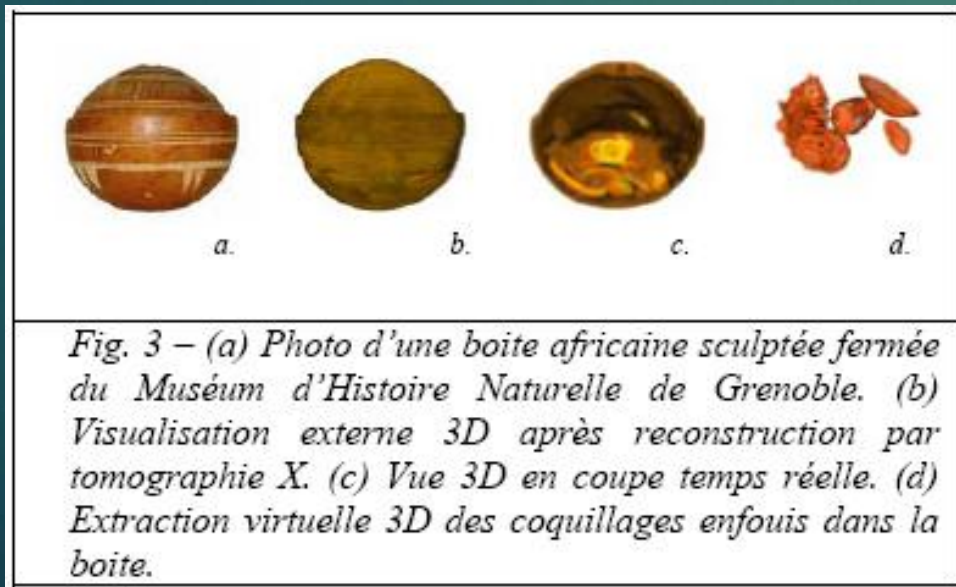


En réalité virtuelle, un système sans contact peut faire ressentir la forme et la texture d'un objet virtuel en focalisant des ultrasons sur la main (<https://www.cnrsinnovation.com/actualite/e-textures-toucher-les-objets-numeriques-grace-a-lhaptique-sans-contact/>)

Tomographie 3D/ tomodensitométrie aux rayons X (CT-scan)

26

- permet la visualisation de la structure interne des objets :
- Image très précise
- 3D
- Visualisation des structures cachées
- Modélisation des surfaces



Mesure de l'absorption des rayons X par un corps puis numérisation et reconstitution d'images 2D ou 3D
Les données obtenues sont ensuite traitées par ordinateur, ce qui permet de recomposer des vues en coupes bidimensionnelles puis des vues 3D (années 1970)

Tomographie 3D

27

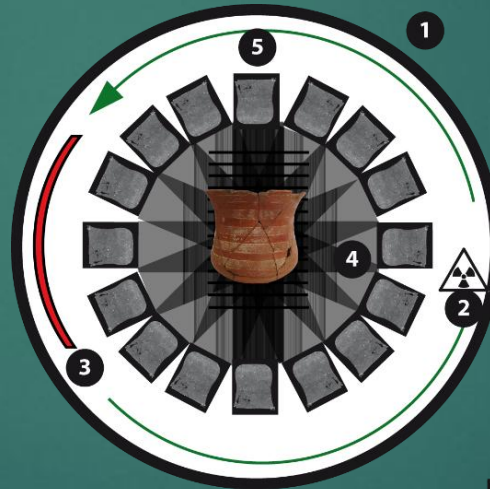
Tomodensitométrie : se compose d'un tube à rayons X couplé à une barrette de détecteurs tournant autour de l'objet.

Obtention d'images en coupe d'un objet à 3 dimensions

Le cumul de ces images en volume permettant la reconstruction 3D

Intérêt principal : **visualiser l'intérieur des échantillons pour reconstruire leur structure interne en 3D.**

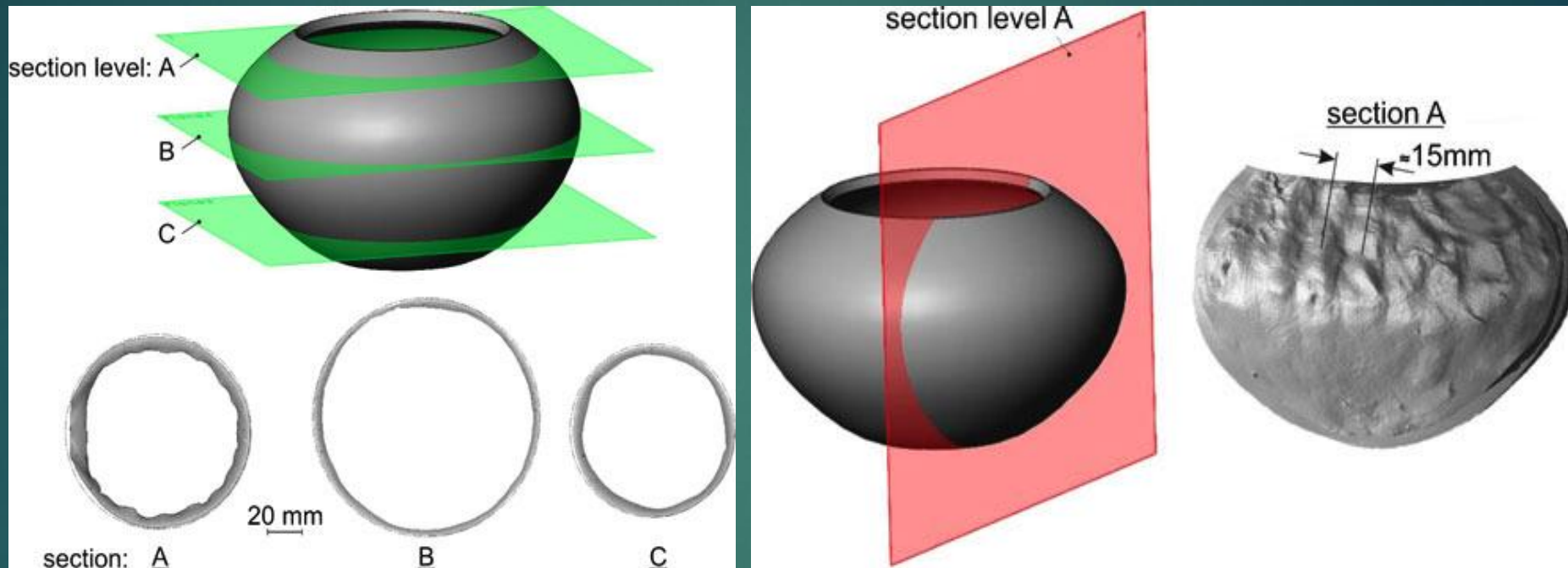
- 1: anneau
- 2: tube émetteur de rayons X
- 3: détecteur
- 4: rayon X
- 5: images en coupe



Le scanner peut analyser de grandes dimensions (limite du diamètre du tube et plusieurs mètres). Certains objets métalliques peuvent causer des diffractions importantes des rayons x, rendant parfois les images ininterprétables. Cela dépend de la composition, de l'épaisseur... Le scanner permet de déterminer la nature des matériaux grâce à leur différence de densité.

Tomographie 3D : rendus

28



Macédoine, oenochoe de l'âge du fer : reconstitution des coupes et des reliefs de surface (Bouzakis et al. 2011)

Permet d'analyser les techniques de fabrication (céramique non tournée ici car trop asymétrique, étirements avec replis sur le haut de la panse, déformations)

Modélisation géométrique

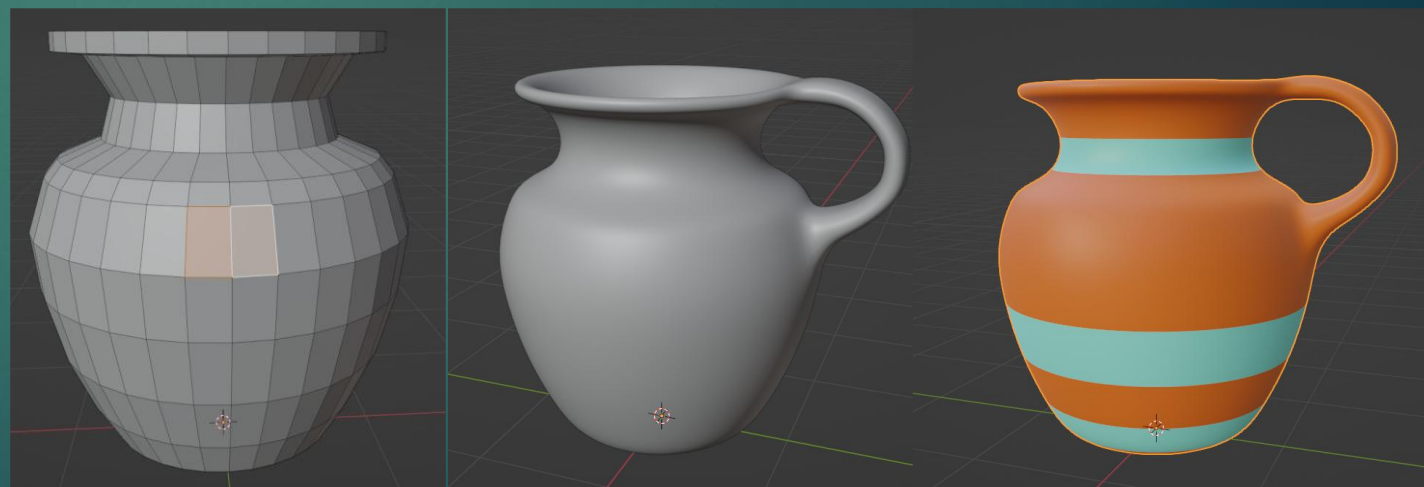
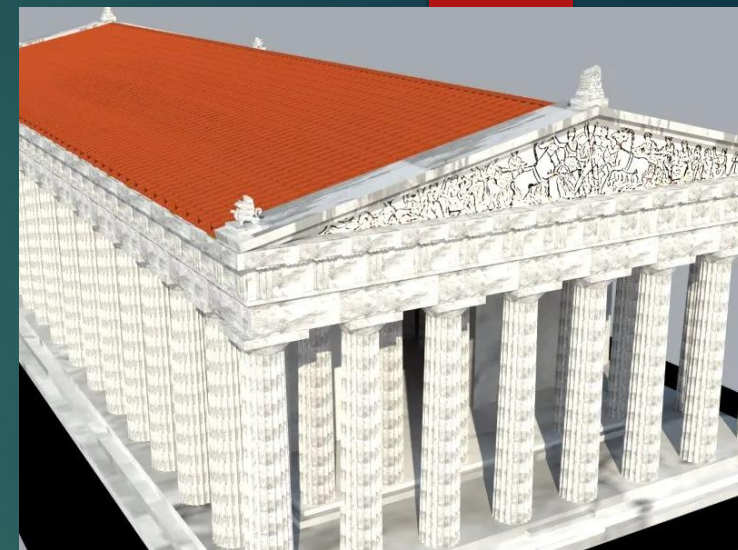
29

La modélisation géométrique consiste à reconstruire à partir des dimensions ou un relevé de l'objet un modèle 3D

Ces techniques sont dites de CAO 3D et on recourt à plusieurs types de logiciels libres ou propriétaires :

- Logiciel libre : Blender, Free CAD
- En architecture : Sketchup, Revit
- Animation : Maya, 3DS MAX

Modélisation
sous Sketchup



Modélisation sous Blender et ajout de texture

3. Usages de la 3D

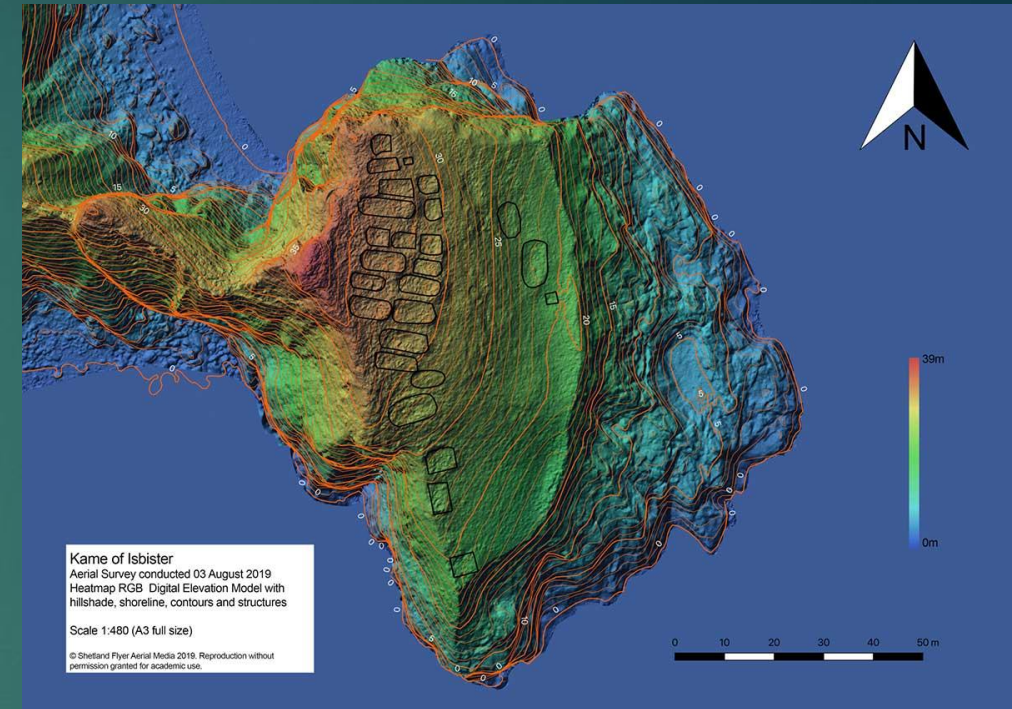
30

- ▶ Prospection et cartographie à partir de clichés aériens (LiDAR , drone & autres dispositifs)
- ▶ Relevé de terrain (scanner laser 3D, photogrammétrie)
- ▶ Etude des artefacts : technologie, tracéologie, conservation préventive (tous moyens d'acquisition)
- ▶ Reconstitution/médiation en réalité virtuelle et augmentée

Prospection et cartographie

31

- ▶ Basées au départ sur des clichés argentiques, la cartographie est désormais facilitée par la photographie numérique ou le laser grâce au Lidar, aux drones ou autres dispositifs aériens
- ▶ La cartographie est basée sur le principe de l'orthophotographie et passe souvent par la réalisation d'un MNT
- ▶ Le MNT est la représentation digitale des changements continus de relief dans l'espace et se visualise dans un SIG 3D
- ▶ permet de produire des contours ainsi que de nombreux autres types d'information tels que la visibilité entre sites, les pentes, les bassins versants, l'aspect d'une surface (concave, convexe, plane) etc.



3D model: The heatmap of the Kame of Isbister shows elevations and the archaeological site. (Image: Emlid)

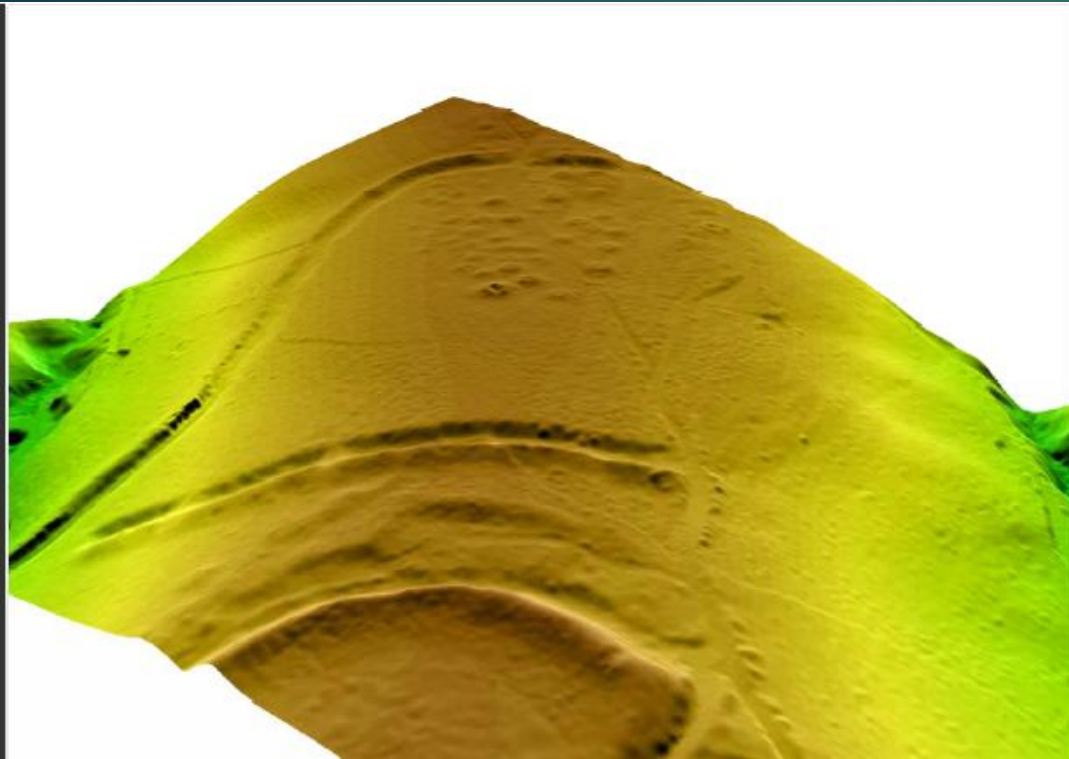
Lidar

32

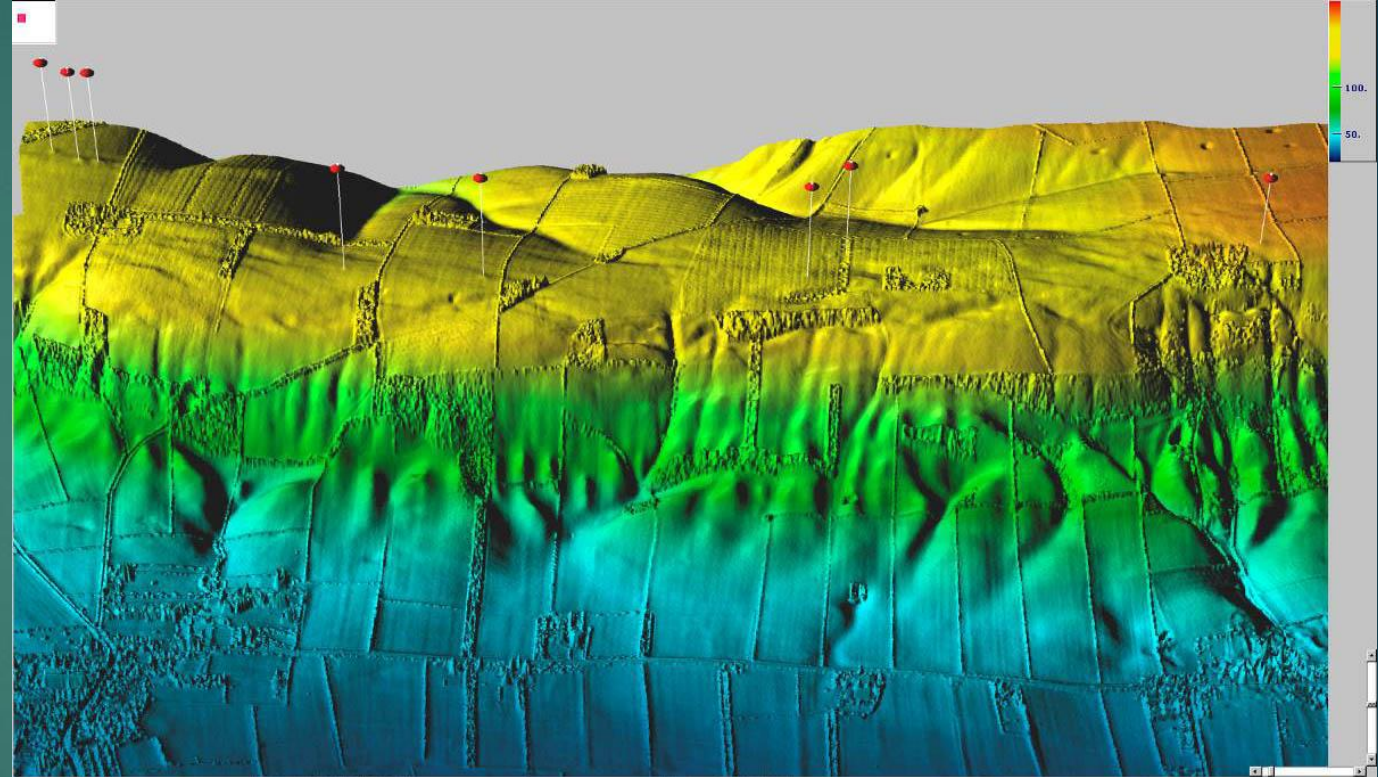
- ▶ Utilisé en prospection pour couvrir de grandes surfaces, essentiellement en milieu forestier.
- ▶ De nombreuses agences gouvernementales mettent à disposition des données Lidar, comme l'ONF ou les agences de gestion de l'eau
- ▶ Le temps d'acquisition peut aller jusqu'à 1000 km²/jour

Rendu 3D

33



A partir de points de calage et de mesures au sol, les données lidar permettent de générer des MNT en 3D
Source : Doneus & Briese, région des montagnes de Leitha (Autriche)



Yorkshire with Neolithic and Bronze Age Barrows identified using side lighting and marked with red topped pins,
© **Dominic Powlesland, The Landscape Research Centre, Yorkshire, England.**

Sur le terrain : relevés & topographie de surface

34



A DEM of the site in advance of excavation surveyed by DGPS.



The Mensi GS scanner set up among the masonry remains of the tower.

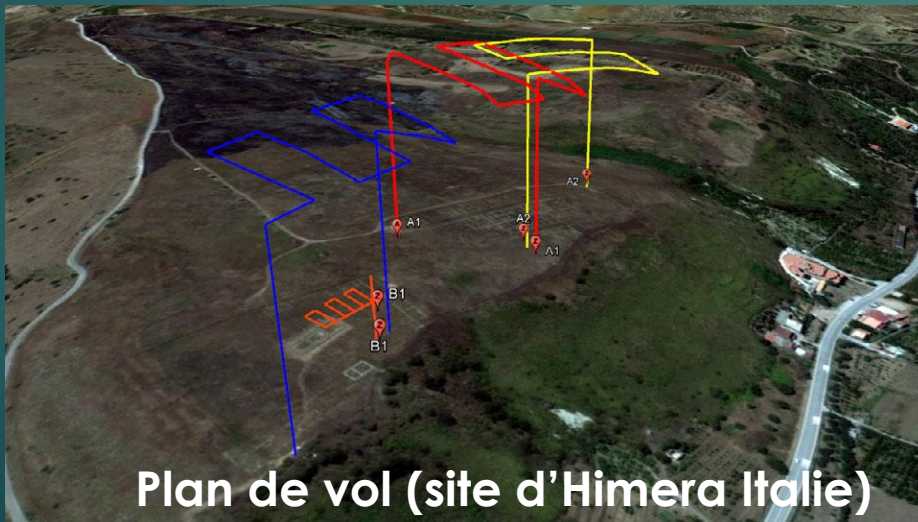
Le Modèle numérique de terrain (DEM/MNT) : ce modèle est souvent la première acquisition 3D du terrain et peut être acquis soit par un théodolithe laser et consiste à obtenir un maillage de points x/y/z couvrant toute la surface de la fouille permettant ensuite de restituer des plans et coupes virtuelles éventuellement texturés grâce à des photographies

La géolocalisation par satellite (GNSS ou global navigation satellite systems) permet de positionner précisément les surfaces de fouille.

Les drones/UAV

35

- Drone : un véhicule ou robot terrestre, de surface ou sous-marin, doté d'autonomie
- UAV (Unmanned Aerial Vehicle) : robot aérien
- Utilisé pour acquérir des données photogrammétriques
- Acquisition rapide (30 ha en 10 mn pour une densité de 100 pts/m² pour une aîle volante)
- Soumis à des règles d'utilisation (Européenne et française) selon le poids et les scénarios d'usage (à vue ou pas)



Drones

36



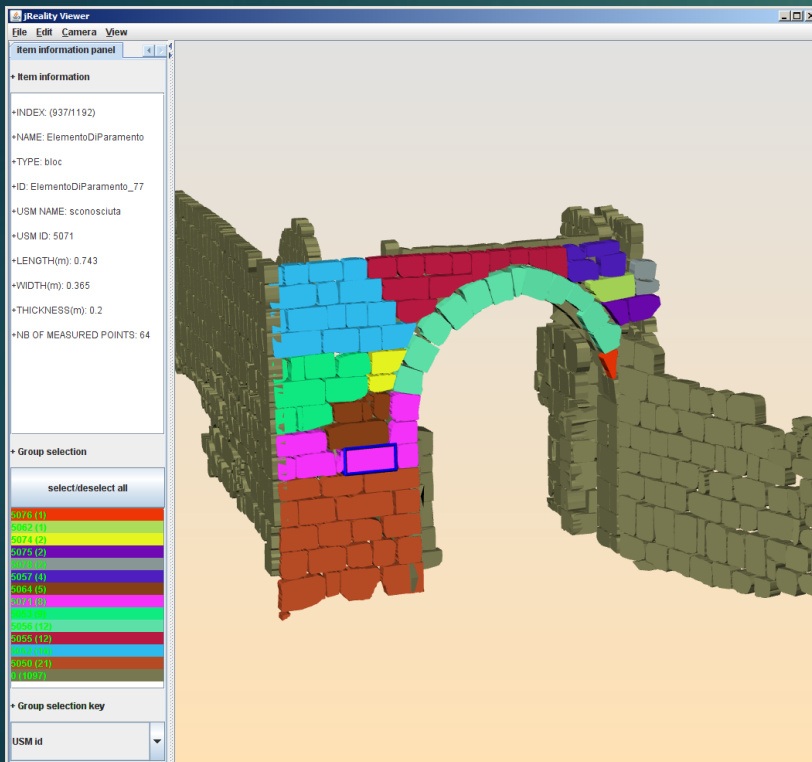
La réglementation est stricte pour l'usage de drones professionnels de plus de 800 gr. (certification similaire à celle d'un pilote d'avion) Un plan de vol doit être déposé auprès des autorités Les villes et terrains sensibles (militaires et autres) sont interdits de survol.

1. hélicoptère, 2. drone quadricoptère, 3. parapente, 4. cerf volant, 5. drone hexacoptère

Archéologie du bâti

37

En archéologie du bâti, la documentation 3D est croisée avec l'analyse stratigraphique selon le principe des EC (entités construites).
Il est possible de calculer également les surfaces et les volumes (blocs, mortiers, remplissage etc.).
Ce système d'information 3D peut ensuite servir à la restitution du bâti et l'anastylose virtuelle.



Projet Shawbak (Syrie) : système d'information 3D
Permettant la visualisation des US construites
(M. Nucciotti , E. Pruno, P. Drap, *Actes des JIAP 2010*)

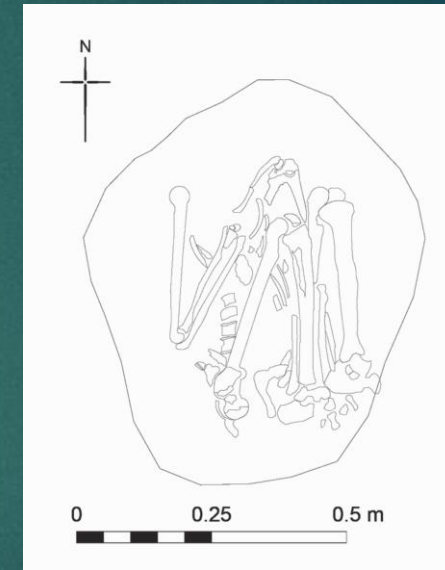
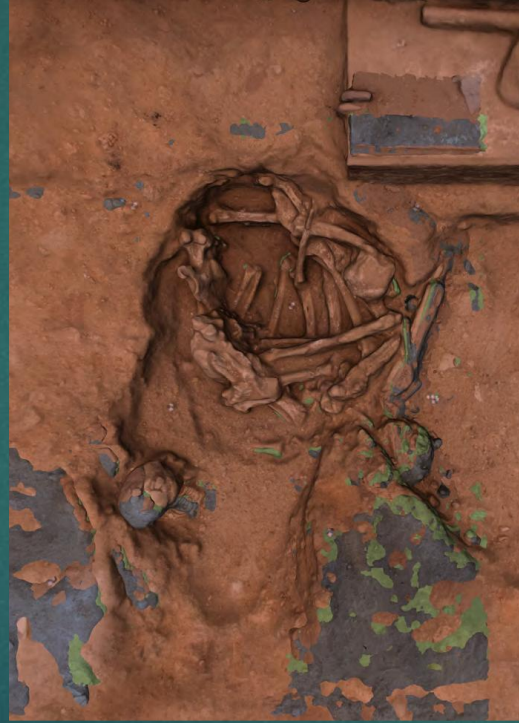
coloration du ciment pour
mettre en évidence les joints et
calculer leur surface

Relevé de sépultures

38

La fouille des sépultures est une démarche en 3 dimensions.

L'analyse des connexions anatomiques et des relations stratigraphiques est facilitée par l'usage d'un modèle 3D qui apporte à la fois gain de temps et gain sur la technicité des fouilleurs en termes de relevé

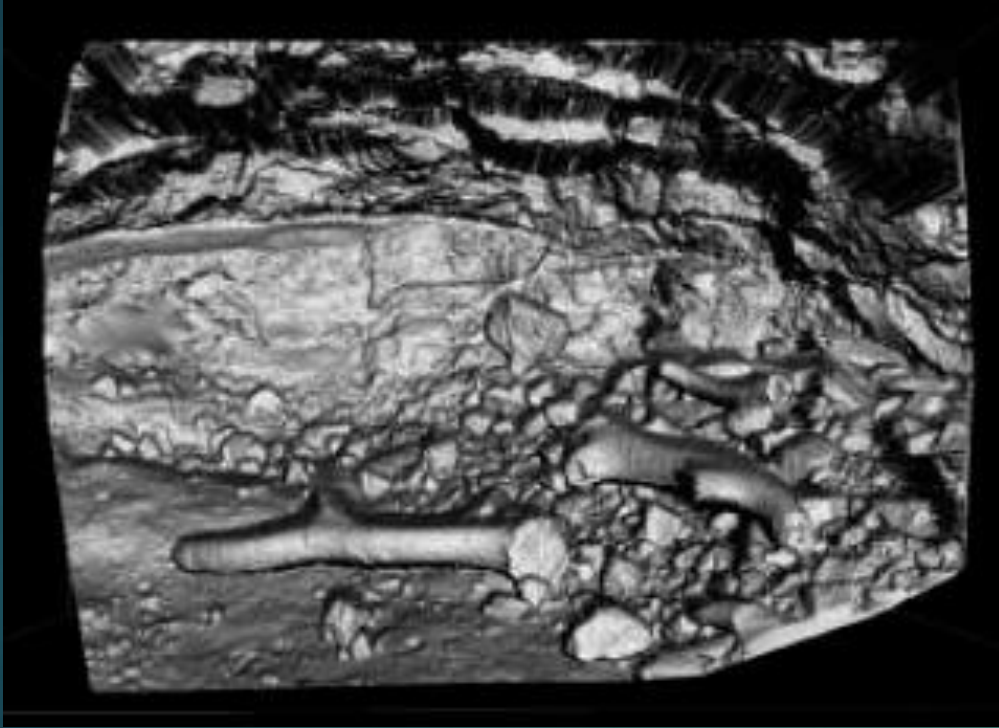


Relevé de sépultures à Çatal Höyük :

Kneusel CJ, Haddow SD, Sadvari JW, Dell'Unto N. 2013. Bioarchaeology in 3D: 3D modeling of human burials at Neolithic Catal hoyuk. Poster presented at: American Association of Physical Anthropologists (AAPA) Annual Meeting; Knoxville, USA; April 12, 2013

Relevé de parois

39

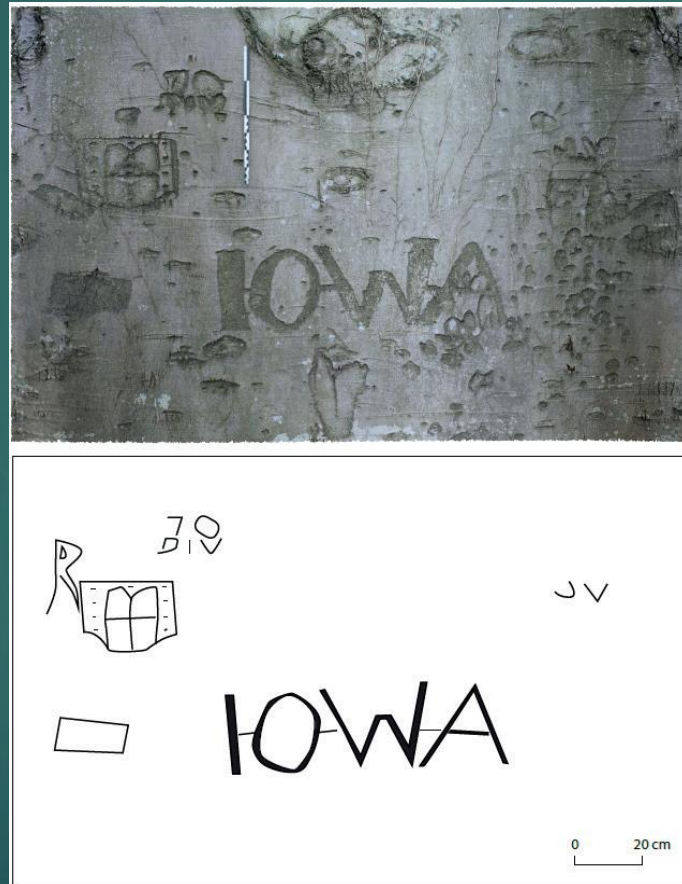


Modélisation des grottes : mine de Grime Graves (Norfolk) English Heritage,
Grotte de Lascaux (Ministère de la Culture)

<https://archeologie.culture.gouv.fr/lascaux/fr/visiter-grotte-lascaux#salle-taureaux>

Relevé de volumes circulaires

40

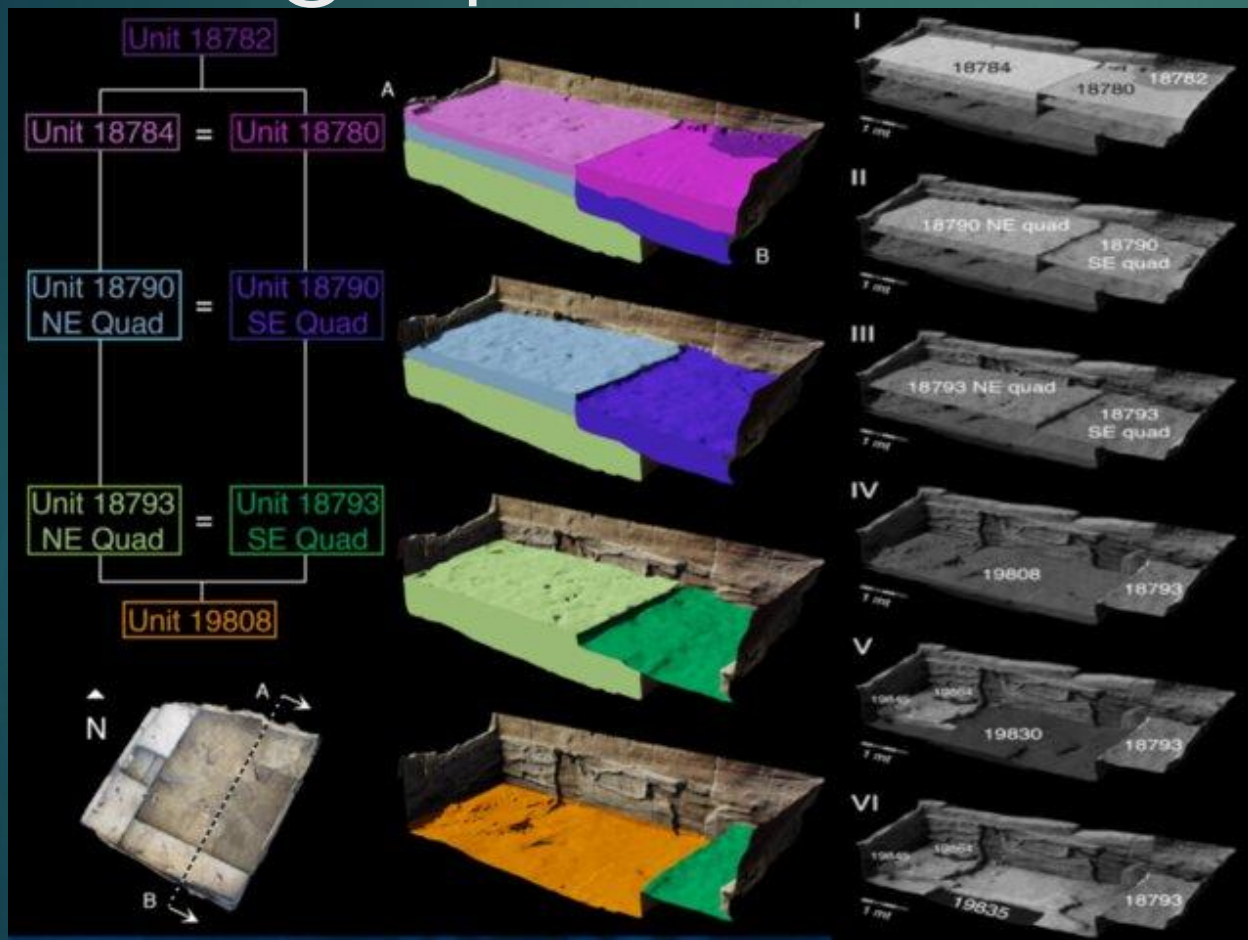


- ▶ Arborglyphes de la 1^{ère} et 2^{ème} guerre mondiale autour des camps logistiques de Normandie
- ▶ Travaux C. Billard, DRAC Normandie

Modèle, relevé et déroulé à plat S. Delamare 2024

Reconstitution et visualisation de stratigraphies

41



Site de Catal Hüyük, Forte, Dell'Unto, Lercari 2021

Etude des artefacts

42

- base de données zooarchéologique

« Virtual Zooarchaeology of the Arctic Project »

<http://vzap.iri.isu.edu/ViewPage.aspx?id=230>

<http://bones.iri.isu.edu/>

- Base artefacts de l'université de Lund

https://models.darklab.lu.se/dynmcoll/Dynamic_Collections/single_viewer.html?obj=DC137_LUHMno_inv

- Digital Lab University of Duke

<https://diglab.duke.edu/>

Conservation & restoration

43

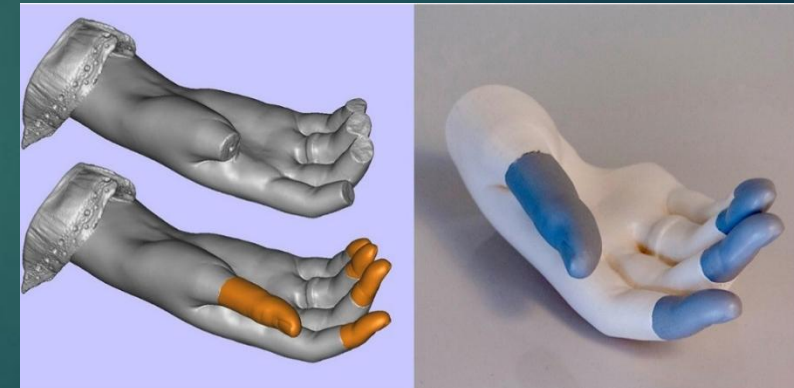
Usage de la 3D comme élément de conservation préventive/restauration :

Faire des constats d'états

- identifier les altérations, mesurer l'objet
- Faire du comblement virtuel et simuler des restaurations
- Faire du remontage virtuel
- Créer un renfort interne ou un support
- Imprimer des parties manquantes, comblement, soclage



Source : English Heritage, 2007



Doigts d'une statue funéraire en marbre, chapelle Borromeo d'Adda Chapel à Arcore (Mattia Marcante)

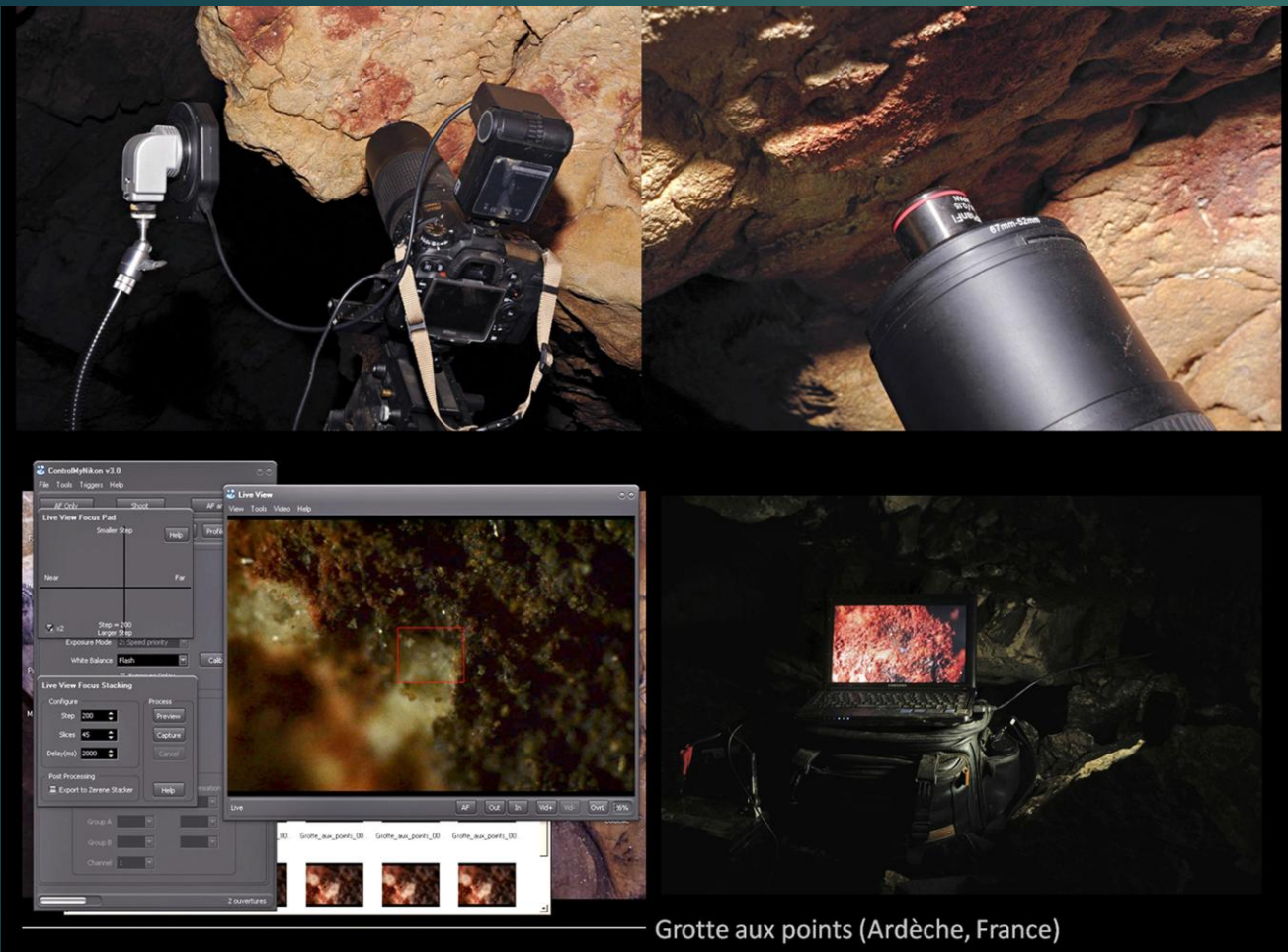
[Source](#)

Source : 3D Laser Scanning for Heritage .Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture , English Heritage, 2007

Tracéologie

44

La modélisation 3D fonctionne aussi sur de très petites surfaces en vue d'une analyse tracéologique, que ce soit par photogrammétrie ou lasergrammétrie

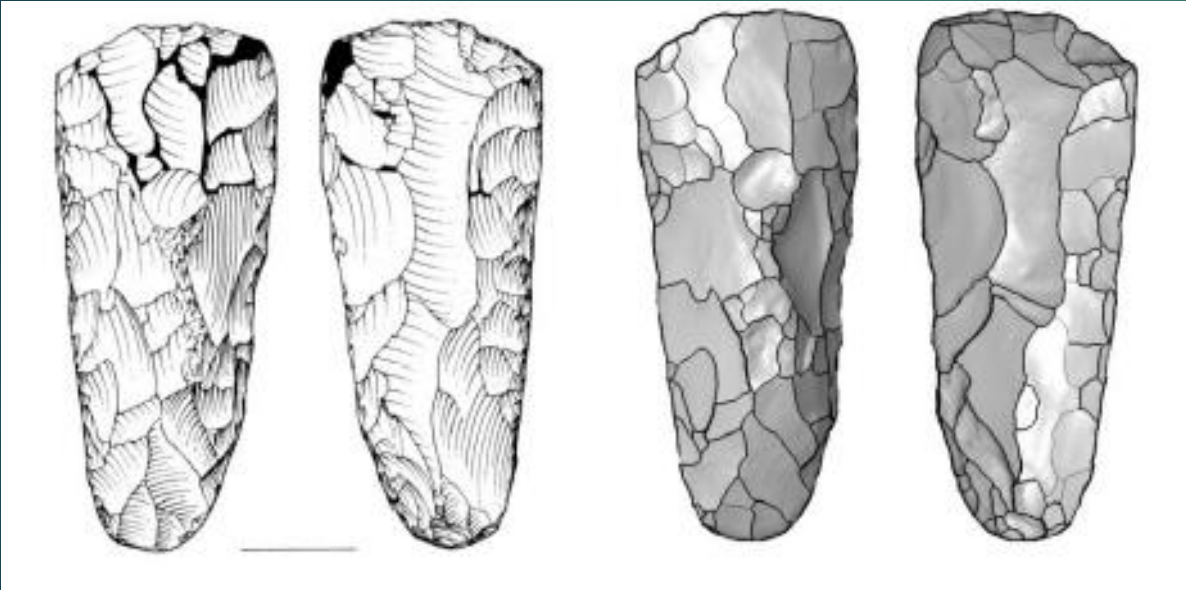


Étude de pétroglyphes Pétroglyphe de Krasnoyarsk (Russie), modèle fait à partir de 65 clichés de 12 MP
6,6 M de vertices (Plisson & Zodkina 2015)

Etude technologique

45

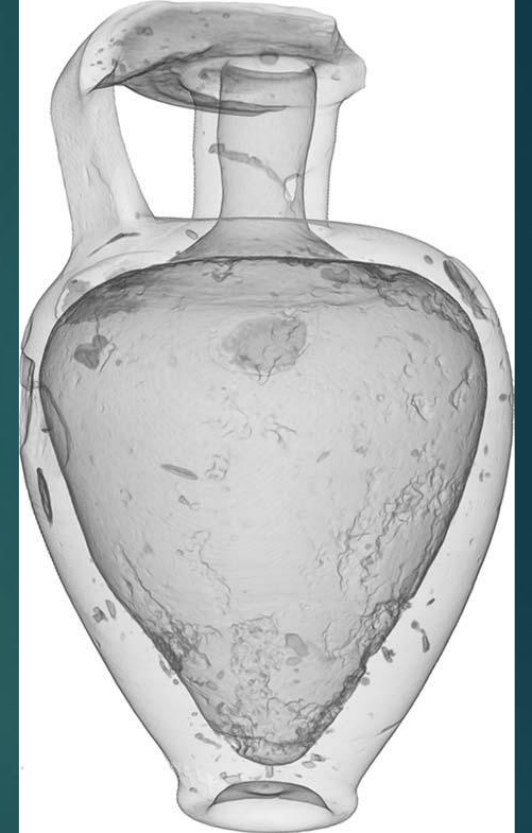
La modélisation 3D peut mettre en évidence les traces et stigmates de fabrication et d'usage, les traces d'outils et faire l'objet d'une analyse de formes



analyse technologique Analyse par algorithme

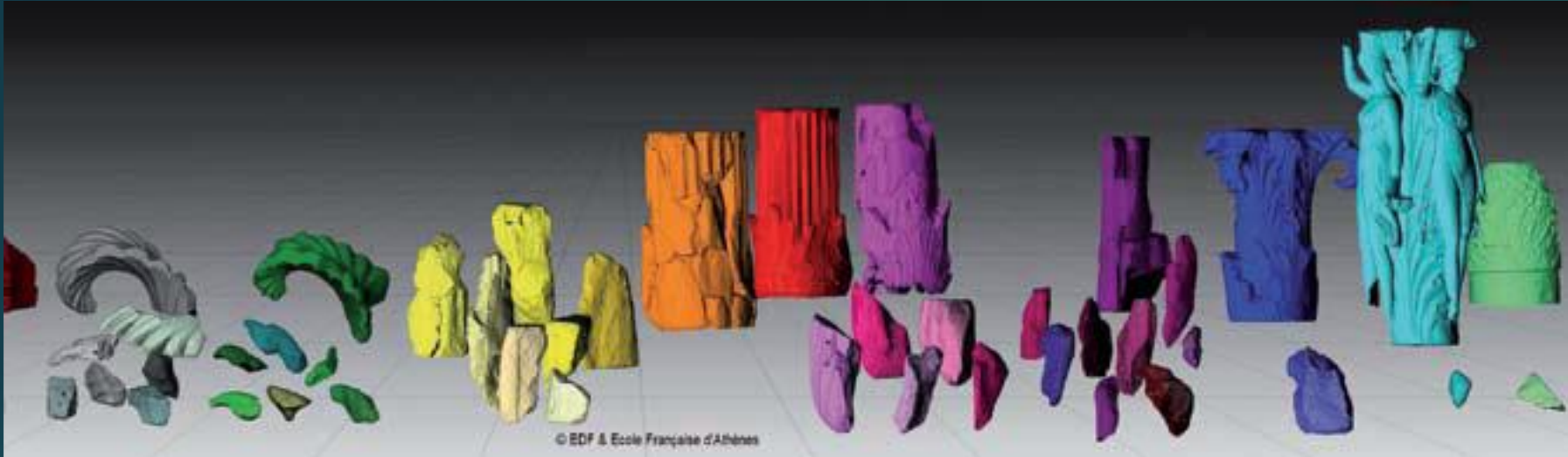
Algorithmes de recherche des enlèvements
lithiques pour une détection automatique

Source : E.Richardson, L.Grosman, U. Smilansky and M.Werman



identification du tournage comme technique
de façonnage d'une céramique (aryballe
protocorinthienne 7-6 e s. BC par
tomodensitométrie (structure hélicoïdale et
symétrie))

Remontage virtuel



la colonne des danseuses de Delphes – découverte en 1894, en 260 fragments, 14 mètres de haut reconstitués, test en 3D de l'hypothèse selon laquelle la colonne était surmontée d'un omphalos, pierre qui marquait le centre du monde

Thibault G., J.-L. Martinez, 2007. *La reconstitution de la colonne des danseuses de Delphes*, in : Vergniew R. et Delevoie C., éd. (2008), *Actes du Colloque Virtual Retrospect 2007*, *Archéovision 3*, Editions Ausonius, Bordeaux

Musée de Delphes



Reconstitution 3D



Exemple de collage virtuel sous le logiciel Blender (Théa Poullain et Pauline Vandenbrouck)

Présentation d'œuvres

48

Une copie numérique permet d'accéder à toutes les parties d'un objet et de le manipuler virtuellement ou le faire fonctionner (outil ou machine)



Casque d'or du roi d'Ur Meskalamdug, (tombe 755), *National Museum of Iraq*

Source : Moscati P., 2007. Virtual Museums and Archaeology, ARCHEOLOGIA E CALCOLATORI
Supplemento 1, *All'Insegna del Giglio*

La réalité virtuelle

49

- Technologie permettant une simulation interactive et en temps réel de la réalité. Technique de communication homme-machine consistant à immerger à l'aide de dispositifs d'entrée/sortie particuliers, une personne dans un univers sensoriel de synthèse recalculé en temps réel (images, son, sensations tactiles...). Elle est réalisée à l'aide d'images de synthèse, d'un environnement virtuel en 3D dans lequel on peut évoluer, donnant l'impression d'une immersion dans un monde réel. »
<http://www.futura-sciences.com>

- Émergence dans les années 1980 de la réalité virtuelle
- Image réelle versus image virtuelle
- Concepts d'immersion et d'interaction

Réalité augmentée (incruster de façon réaliste des objets virtuels dans une séquence d'images réelle) versus réalité virtuelle (reconstitution)





Abbaye de Cluny : image virtuelle, la même avant-nef est présentée en « réalité augmentée »

<http://cluny-numerique.fr/gunzo/restitution-archeologique/cluny-iii/27-maior-ecclesia-2004>

Réalité augmentée et mixte

52



- Château restitué au XIIe s.
- sur tablette sous IOS
 - rotation à 180 degrés
 - réalisation avec 1 moteur de jeux (Unity)
 - version à venir sous Android



Principe d'immersion

53



Visiocasque

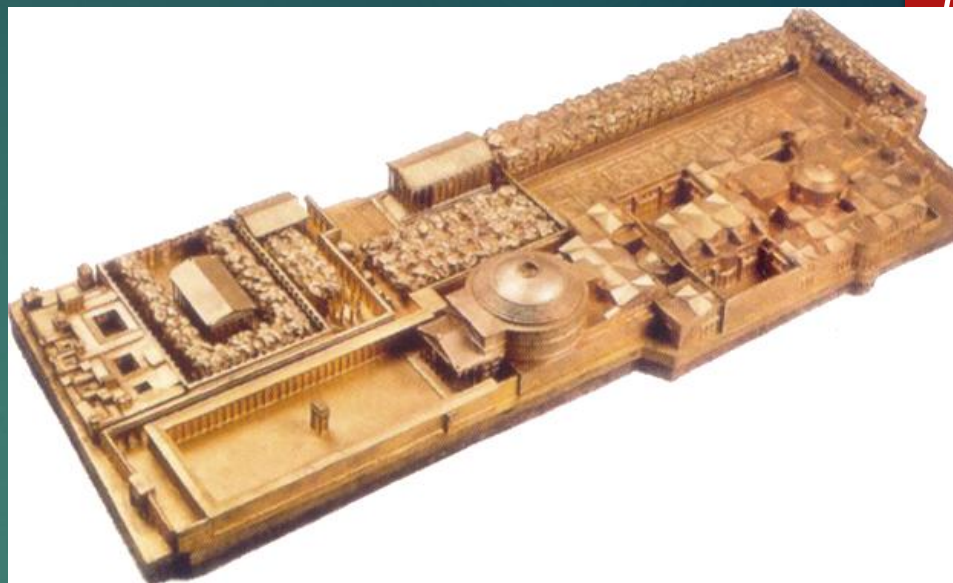


Immersion (INRIA Rennes):
9,60 mètres de long. 3 mètres de
profondeur. 3 mètres de haut

Plan de Rome au IV^e s. AD

- ▶ Valorisation du plan relief de la Rome du IV^e siècle après J.-C. réalisé par l'architecte Paul Bigot au début du XX^e siècle (un exemplaire à l'université de Caen, un à l'Institut d'art et d'archéologie, un à Bruxelles) réalisée au 1/400, entre 1900 et 1940,
- ▶ Restitutions anciennes - tradition des architectes ayant obtenu le « Grand Prix de Rome » - et anastylose
- ▶ centre de réalité virtuelle CIREVE et Équipe de recherche technologique éducation « Sources anciennes, multimédias et publics pluriels »

<http://www.unicaen.fr/cireve> ; <http://www.unicaen.fr/ersam>
<http://www.unicaen.fr/rome>



Reconstitution de Rome au CIREVE de Caen

56

- ▶ Objectifs : représenter Rome telle qu'elle sera redécouverte à la Renaissance
- ▶ Méthode : Associer les sources qui ont permis de le reconstituer (métadonnées)
- ▶ Avantages : maquette évolutive, possibilité de modifier les monuments en fonction des nouvelles données et des nouvelles technologies, moyen de tester des hypothèses et de juger de leur faisabilité (mécanique etc.)
- ▶ Médiation : visites Nocturnes du Plan de Rome (présentations mensuelles d'une partie de la maquette virtuelle en stéréoscopie)



Rue donnant sur le
théâtre de Pompée



Arc de Constantin



Ara Pacis



Accès public des reconstitutions virtuelles

58



Musée virtuel de Certosa, visualisation des changements dans l'occupation urbaine depuis la nécropole Etrusque

<http://3d.cineca.it/OLD/3d/progettiincorso.html>



Cathédrale d'Amiens en Couleurs
Application téléchargeable

<http://www.amiens-cathedrale.fr/>

Modélisation des épaves

59

- Reconstitution du chargement de l'épave du *Grand Ribaud F*, navire étrusque découvert en 1999 à Hyères



Fig. 2 Amphorae lying on the sea bed, with a buoys for a reference to vertical and a rule for scaling.

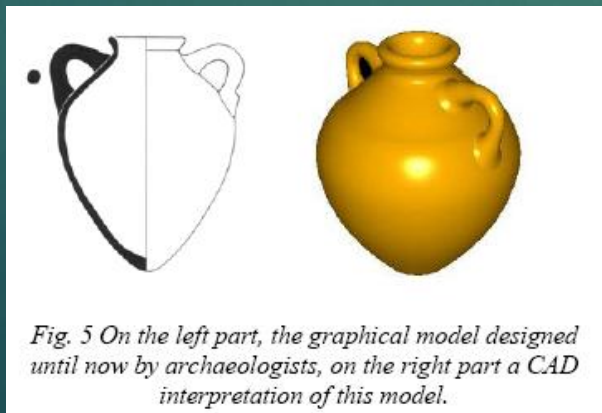


Fig. 5 On the left part, the graphical model designed until now by archaeologists, on the right part a CAD interpretation of this model.



Fig. 11 A large view of the site, sea bed, excavation and amphorae as discovered. Visualized with MicroStation™.

La médiation

60

Une nouvelle forme de visite : l'e-tourisme

Répertoires :

France musées : <https://visites-en-ligne-musees.culture.gouv.fr/fr>

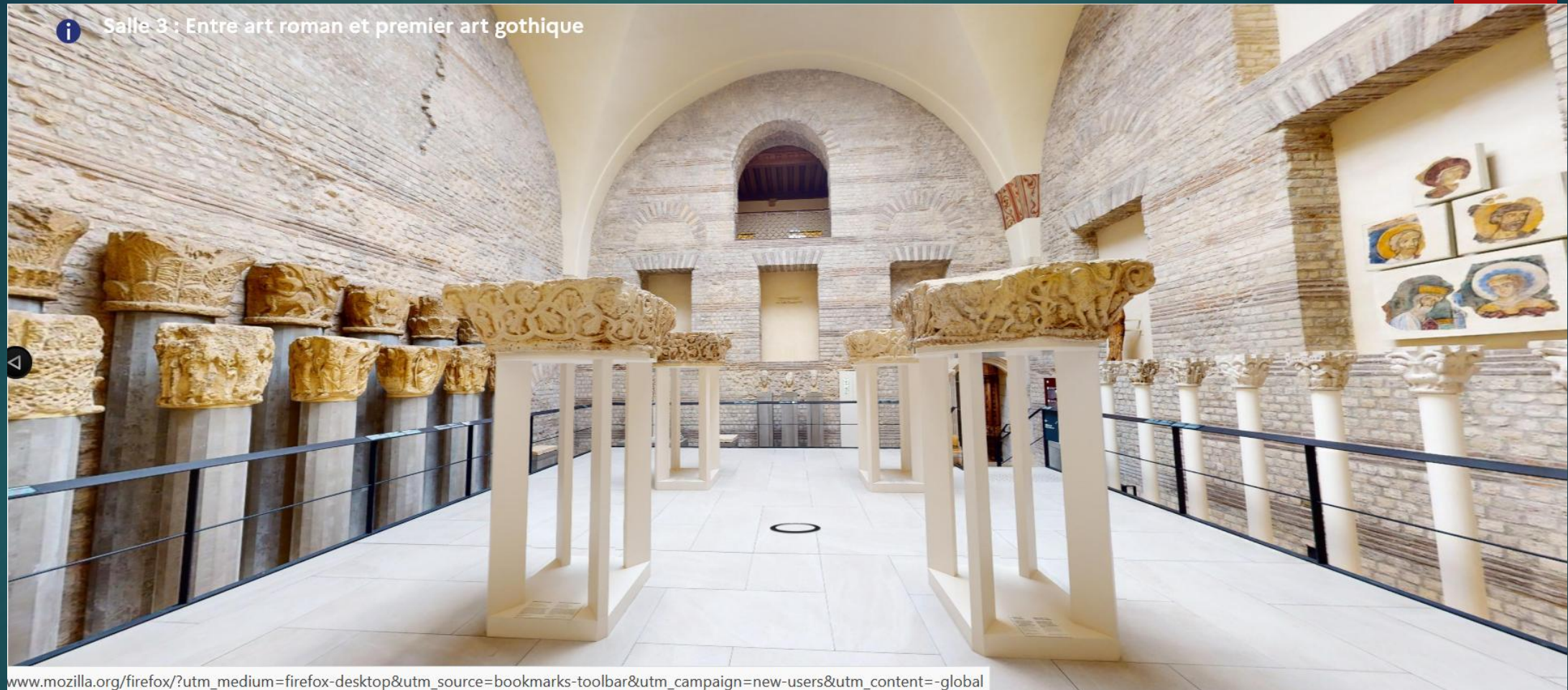
Google art project : <https://artsandculture.google.com/>

Exemples

- ▶ Musée des Augustins, Toulouse: <http://www.augustins.org/-/l-application-mobile-du-musee?redirect=%2F-%2Fles-aides-a-la-visite-pour-les-adultes%3Fredirect%3D%252Fvenir-au-musee%252Faides-a-la-visite>
- ▶ Théâtre et musée d'Orange: <http://theatreantique.com/fr/preparer-sa-visite/les-aides-a-la-visite>
- ▶ Musée virtuel de Saint-Denis : <http://www.saint-denis.culture.fr/fr/index.html>

Musée virtuel

61

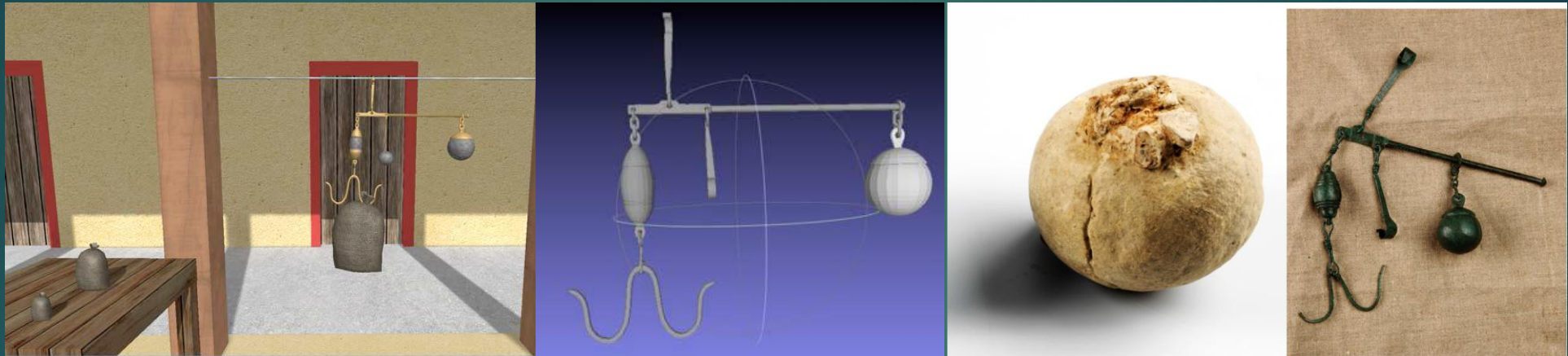


Musée de Cluny

► <https://www.musee-moyenage.fr/visiter/preparer-sa-visite/le-musee-en-realite-virtuelle.html>

Animation d'un objet en réalité virtuelle

62



- ▶ Scannérise d'une balance romaine utilisée en réalité virtuelle
- ▶ Contexte : fouille préventive d'Ossé, site romain, balance en bronze
- ▶ Objectif : Réalité virtuelle immersive de la villa romaine de villa Bourg-Saint-Père. La balance est fixée entre deux poteaux, les sacs à peser sont sur la table
- ▶ Méthode : moteur de jeu Unity, utilisation d'une impression 3D du poids comme interface

Applications téléchargeables : Versailles 3D

63

La galerie de l'histoire du Château présente des maquettes 3D téléchargeables sur mobile/tablette :

- maquette complète du domaine sur Google Earth,
 - 4 reconstitutions 3D : le premier château de Louis XIII, le château des fêtes et des plaisirs, le palais du soleil, Versailles à la mort de Louis XIV
 - jeu interactif en ligne « Pagaille à Versailles »
 - *promenade onirique et sensible dans les jardins et le château*
- www.chaostoperfection.com
- application Smartphone

► <http://www.versailles3d.com/fr/>



4. Visualiser, reproduire et conserver les données

Diffuser les modèles et les visualiser

65

- ▶ La visualisation des modèles peut se faire dans des formats libres ou d'échange, comme avec les visualiseurs 3D sous Windows (format .obj ou format .ply)
- ▶ Des solutions d'hébergement existent, comme avec l'hébergeur privé sketchfab :

<https://sketchfab.com/>

<https://sketchfab.com/Sorbonne-university-Paris1/models>

Sur des pages web, Un lien url renvoie souvent à une plateforme de dépôt, à défaut d'utiliser un visualiseur 3D

Des institutions de recherche ont développé des plates-formes de dépôt et de consultation des modèles 3D

Publications numériques interactives avec de la 3D

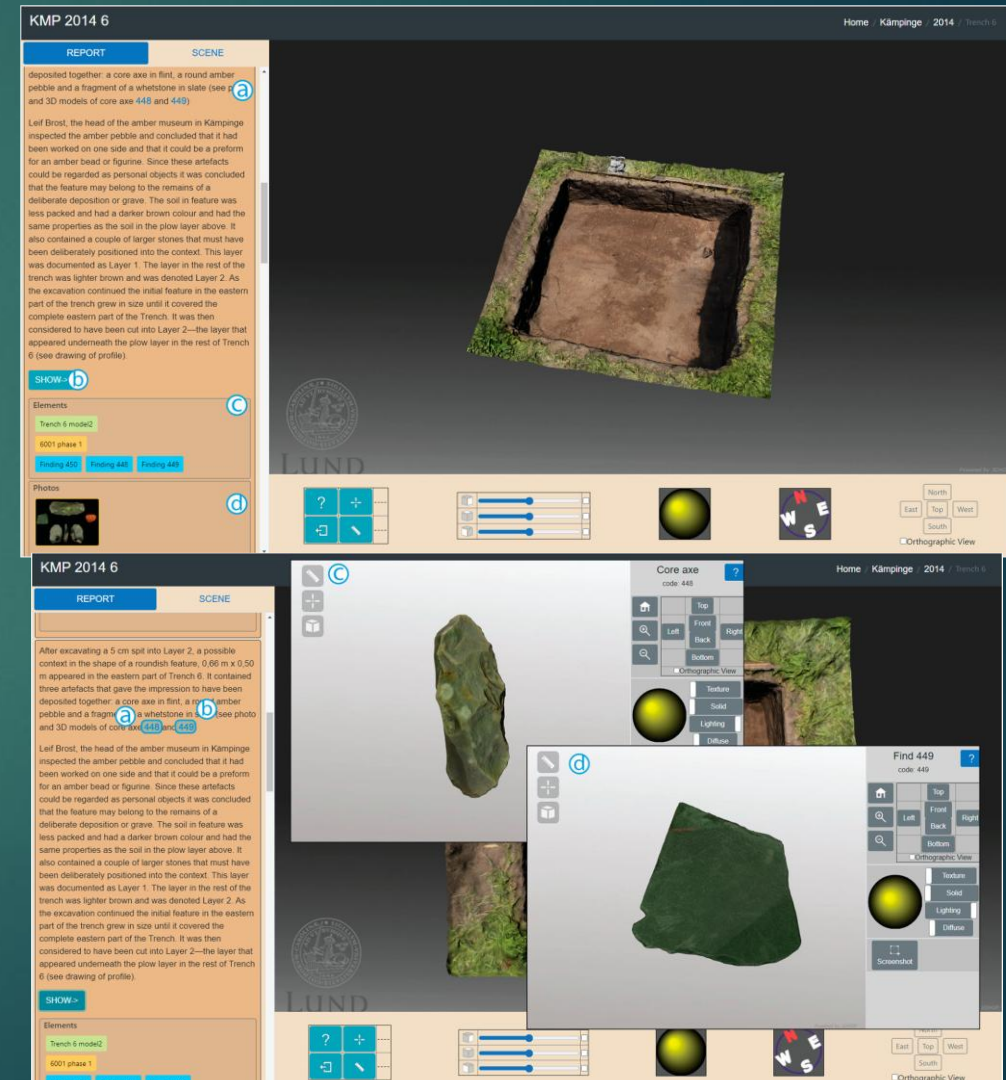
66

L' Université de Lund a créé un site interactif pour les rapports de fouilles et publications avec accès aux modèles 3D <https://www.darklab.lu.se/digital-collections/dynamic-excavation/kampinge/>

Visualiseur pour les artefacts:

https://models.darklab.lu.se/dynmcoll/Dynamic_Collections/single_viewer.html?obj=DC137_LUHMno_inv

On peut visualiser les structures archéologiques , les objets en 3D et les medias attachés (images & fichiers PDF)



Reproduction par robot tailleur de pierre

Un robot peut tailler des blocs de pierre et reconstituer une sculpture à partir d'un modèle 3D à échelle ou en modèle réduit



Prototypage du Sphinx des Naxiens du sanctuaire de Delphes taillé en marbre de Carrare à l'aide d'un robot tailleur de pierre (modèle 3D Archéovision et Archéotransfert – 2005)

Prototyping of the Sphinx of the Naxiens of the Sanctuary of Delphi carved in Carrara marble using a robot stone cutter : <https://humanum.hypotheses.org/1422>

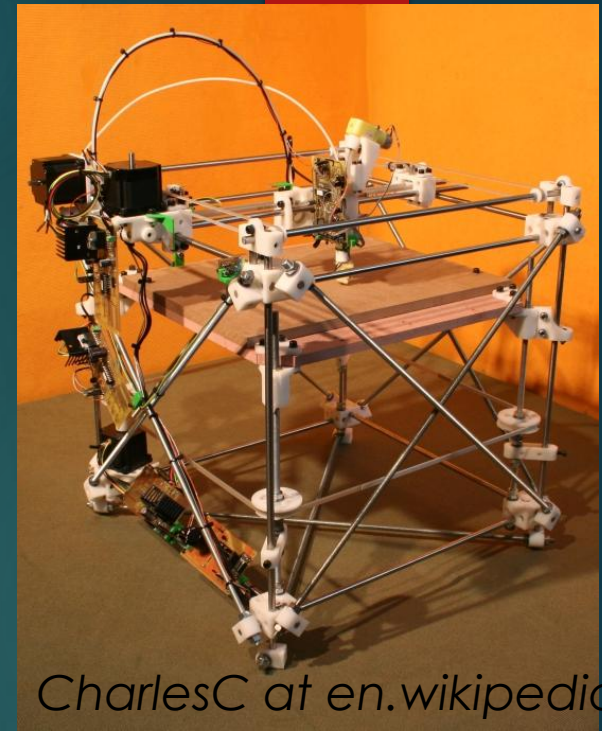
L'impression 3D

L'impression 3D est une technologie qui permet à l'aide d'une machine appelée imprimante 3D de fabriquer un objet physique, à partir d'un modèle numérique. Cette technologie est issue de l'industrie.

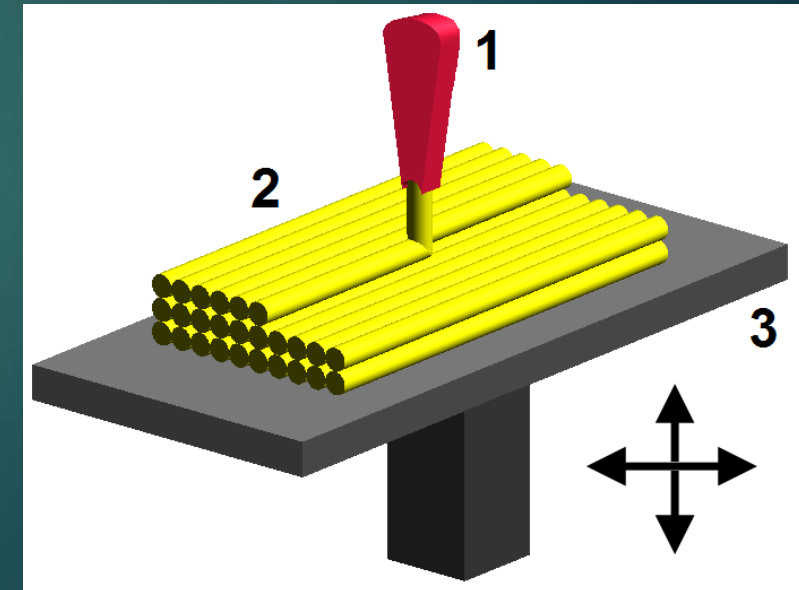
Principe : Impression par dépôts successifs de matière

Impressions à partir de

- Fil : thermoplastique ramolli par chauffage
- Poudre : fusion ou frittage de couches de poudre par laser
- Liquide : polymérisation
- Solide : collage de film (papier, plastique, céramique, aluminium)



CharlesC at en.wikipedia



Préserver les données : l'archivage

69

- L'archivage des données 3D est indispensable à leur préservation. Des modèles anciens, sous des formats propriétaires ou des systèmes d'exploitation périmés sont en effet désormais inconsultables
- La description des métadonnées (données sur les données) doit être rigoureuse et normalisée
- En France la structure du CNRS HumaNum a créé un conservatoire des données 3D

Conservatoire national de modèles 3D HumaNum

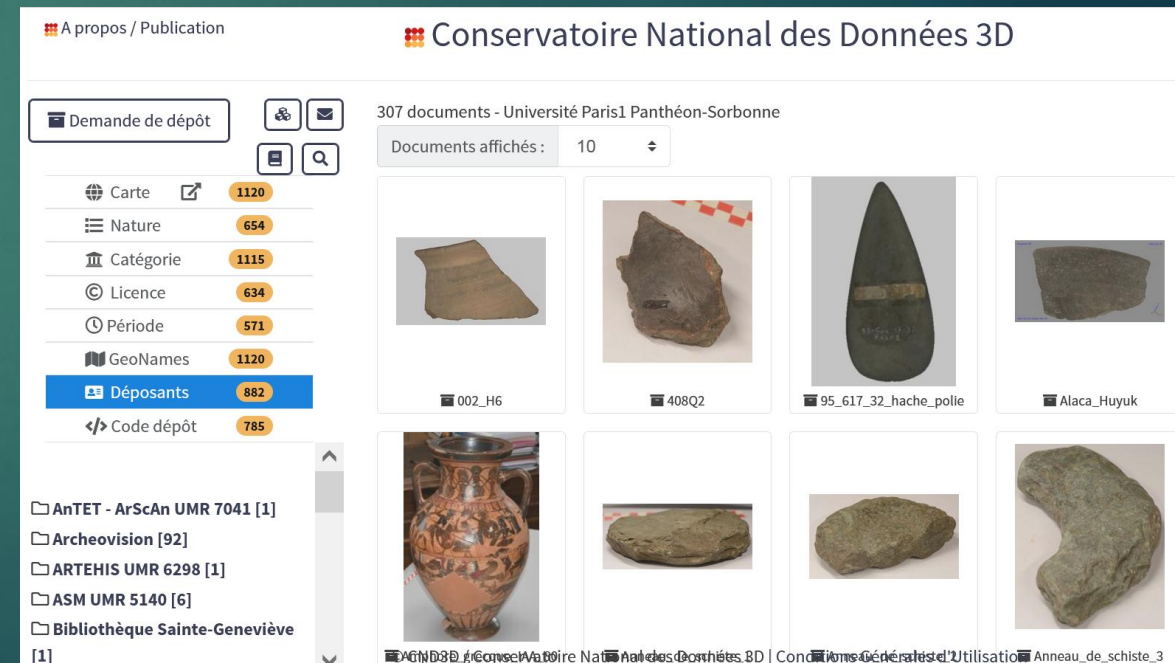
<https://3d.humanities.science/>

<https://3d.humanities.science/CND3D/913615.d.2021>

Hébergeur privé sketchfab :

<https://sketchfab.com/>

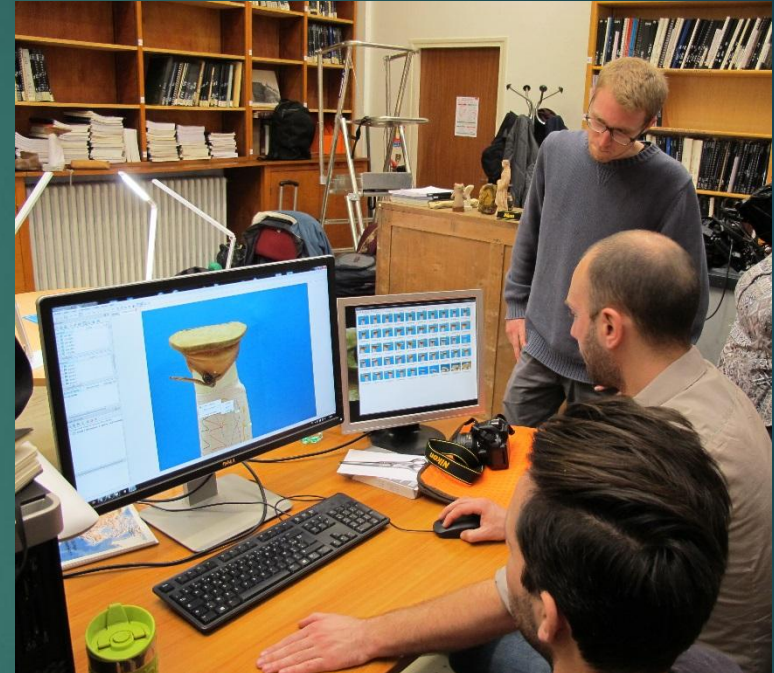
<https://sketchfab.com/Sorbonne-university-Paris1/models>



Paris 1 – EHAAS : Pôle image et technologies numériques

70

- ▶ **Ingénieur** : Cyrille Galinand
- ▶ **Plate-forme technique acquisition** :
 - 7 appareils numériques Nikon D5200, D750, D850, Canon
 - 1 scanner laser fixe Nextengine
 - 1 Scanner laser dotproduct 8 couplé à une tablette
 - 1 Drone quadricoptère DJI f550 homologué
 - 2 Scanners à main ARTEC LEO (128 cœurs) et SPIDER
- ▶ **Dispositifs de sortie**
 - 4 Casques de réalité virtuelle HTC vive
 - 3 Imprimantes 3D
- ▶ **Machines**
 - 3 stations de travail Dell 4 cœurs/8 coeurs
 - Logiciels : Photoscan/Meshroom, Meshlab, Blender, Reality Capture



<https://histoire-de-l-art-archeologie.panthonsorbonne.fr/nous-connaître/nos-ressources/pole-image-et-technologies-numeriques>

Logiciels 3D

71

Modélisation

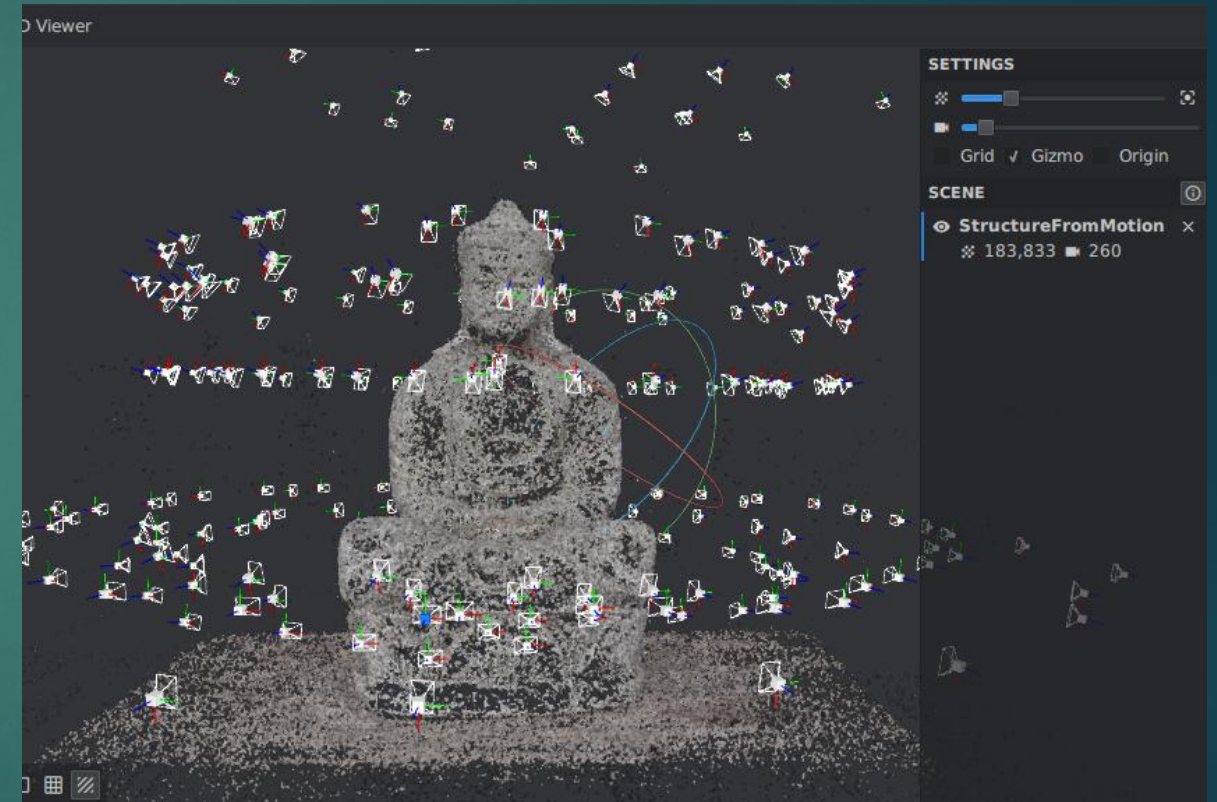
Sur smartphone : MagiScan, Polycam , PIX4Dcatch, Reality scan etc.

Logiciels sur PC/Mac

- ▶ Alice vision/Meshroom : <https://alicevision.org/>
- ▶ Metashape (Agisoft) <http://www.agisoft.com/>
- ▶ Imagine Photogrammetry www.geosystems.fr
- ▶ PhotoModeler <http://www.photomodeler.com/index.htm>
- ▶ Blender
<https://www.blender.org>

Intégration des données RV/RA

- ▶ Reality Capture
<https://www.capturingreality.com/>
- ▶ Unreal Engine
<https://www.unrealengine.com/fr/unreal-engine-5>



BARCELO, J. A. et FORTE, Maurizio et SAUNDERS, D. H. (eds.), 2000. *Virtual reality in archaeology*, Conference on computer applications and quantitative methods in archaeology, Barcelone, 1998. Oxford : Archeopress.

DYLLA, K., B. FRISCHER et al., 2010. "Rome Reborn 2.0: A Case Study of Virtual City Reconstruction Using Procedural Modeling Techniques," in CAA 2009. *Making History Interactive. 37th Proceedings of the CAA Conference March 22-26, 2009, Williamsburg, Virginia* (Archeopress: Oxford, 2010) 62-66. [View Document \(.pdf\)](#)

FORTE, M. 2010. *Cyber-archaeology*. British archaeological reports international series 2177, Oxford, Archaeopress, 155 p.

FORTE, M. et SILIOTTI, A. 1997. *Virtual Archaeology: re-creating ancient worlds*. Harry N. Abrams Inc., 294 p.

FRISCHER B. 2006. New directions for cultural virtual reality: a global strategy for archiving, serving, and exhibiting 3D computer model of cultural heritage sites. *Proceedings of the Conference, Virtual Retrospect 2005*. pp. 168-175. [en ligne]
http://archeovision.cnrs.fr/pdf/vr05_pdf/05_frischer.pdf

FRISCHER, B. et DAKOURI-HILD A., (ed.), 2008. *Beyond illustration: 2D and 3D digital technologies as tools for discovery in archaeology*. British archaeological reports international series 1805. Oxford, Archaeopress, REILLY, P., 1991. "Towards a virtual archaeology". In *Computer Applications in Archaeology 1990*, edited by K. Lockyear and S. P. Q. Rahtz, Oxford, International Series 565, p. 133-139.

NICCOLUCCI, F., 2002. *Virtual archaeology : proceedings of the VAST Euroconference, Arezzo, november 2000*. Oxford : Archeopress. 236 p.

NIVEN, L., STEELE, T. E., KINKE, H., GERNAT, Tim et HUBLIN, Jean-Jacques. Virtual skeletons : using a structured light scanner to create a 3D faunal comparative collection. *Journal of archaeological science*, vol. 36, issue 9, septembre 2009. p. 2018-2023.

PIMENTEL, K. & K. TEXEIRA. 1994. *La réalité virtuelle. De l'autre côté du miroir*. Paris, Addison-Wesley (édition originale : *Virtual Reality, Beyond the New Looking Glass*, 1993).

REMONDINO F. *Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D sensing. Remote sensing*, 2011. [en ligne]
<http://www.mdpi.com/2072-4292/3/6/1104>

VERGNIEUX Robert. *Sauvegarder les données numériques 3D du patrimoine*. *Virtual Retrospect 2009*. pp. 181-184. [en ligne]
http://archeovision.cnrs.fr/pdf/vr09_pdf/09_Vergnieux.pdf

VERGNIEUX R., GILIGNY F. (eds.) Dossier : La 3D en archéologie, *Les Nouvelles de l'archéologie*, 146, 2017.

Bibliographie

73

Colloques :

Virtual Retrospect : <http://archeovision.cnrs.fr/spip.php?rubrique41>

JIAF : http://www.progettocaere.rm.cnr.it/databasegestione/open_block_pages_sup.asp?IDyear=2012-01-01

http://www.progettocaere.rm.cnr.it/databasegestione/open_block_pages_sup.asp?IDyear=2014-01-01

Archeologia e Calcolatori : http://www.progettocaere.rm.cnr.it/databasegestione/google_year_list.htm

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences

<http://www.isprs.org/publications/archives.aspx>

Musées virtuels : <http://www.insecula.com/>

<https://visites-en-ligne-musees.culture.gouv.fr/fr>

<https://artsandculture.google.com/>

Projet 3D Monuments et e-cathedr@le<https://visites-en-ligne-musees.culture.gouv.fr/fr>

<http://www.gamsau.map.cnrs.fr/3D-monuments/>

<https://home.mis.u-picardie.fr/~ecathedrale/>

Exploitation des relevés 3D pré et post incendie de Notre-Dame de Paris

<https://www.youtube.com/watch?v=3kX-Dtobaz4>