

Technique de micro-tomographie par rayons X

- **Personnels UAR 2700 2AD**

- **Marta BELLATO** - opératrice et responsable technique (IE MNHN)
- **Patricia WILS** - imagerie 3D et PCR (IR MNHN)

- **2 coordinateurs scientifiques**

- **Sandrine LADEVEZE** et **Helder Gomes Rodrigues** (UMR 7207 CR2P)

- <http://ums2700.mnhn.fr/ast-rx/acces>

- Le plateau technique est rattaché à l'UAR 2700 2AD (dir. Claire Gachon) au sein de la DGD-REVE et fait partie de la Plateforme Analytique du Muséum (PAM).

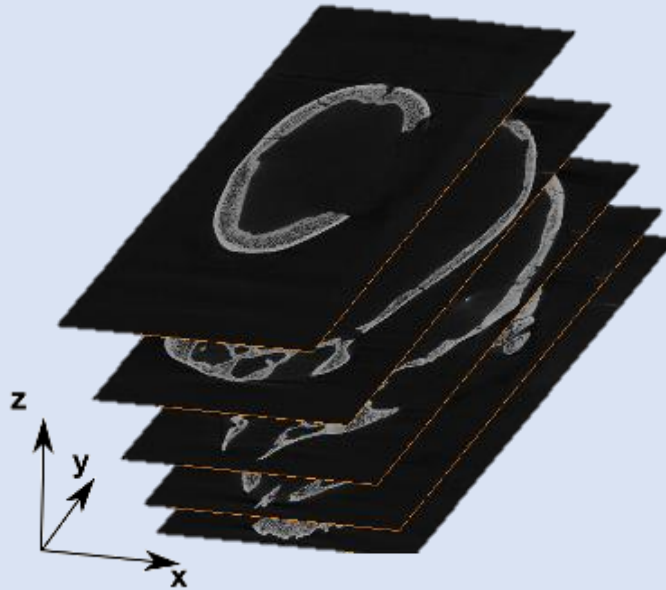
Imagerie non-destructive des structures internes de spécimens d'histoire naturelle

Description d'un objet en coupes virtuelles



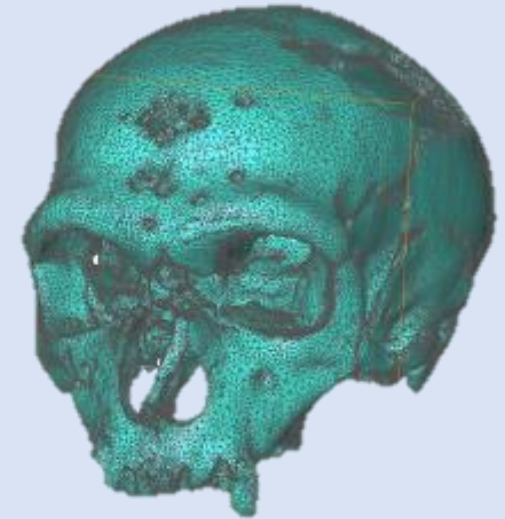
Photographie du spécimen.

MNHN-HA-24493 *Homo Neanderthalensis*
La Chapelle-aux-Saints



Coupes virtuelles du crâne.

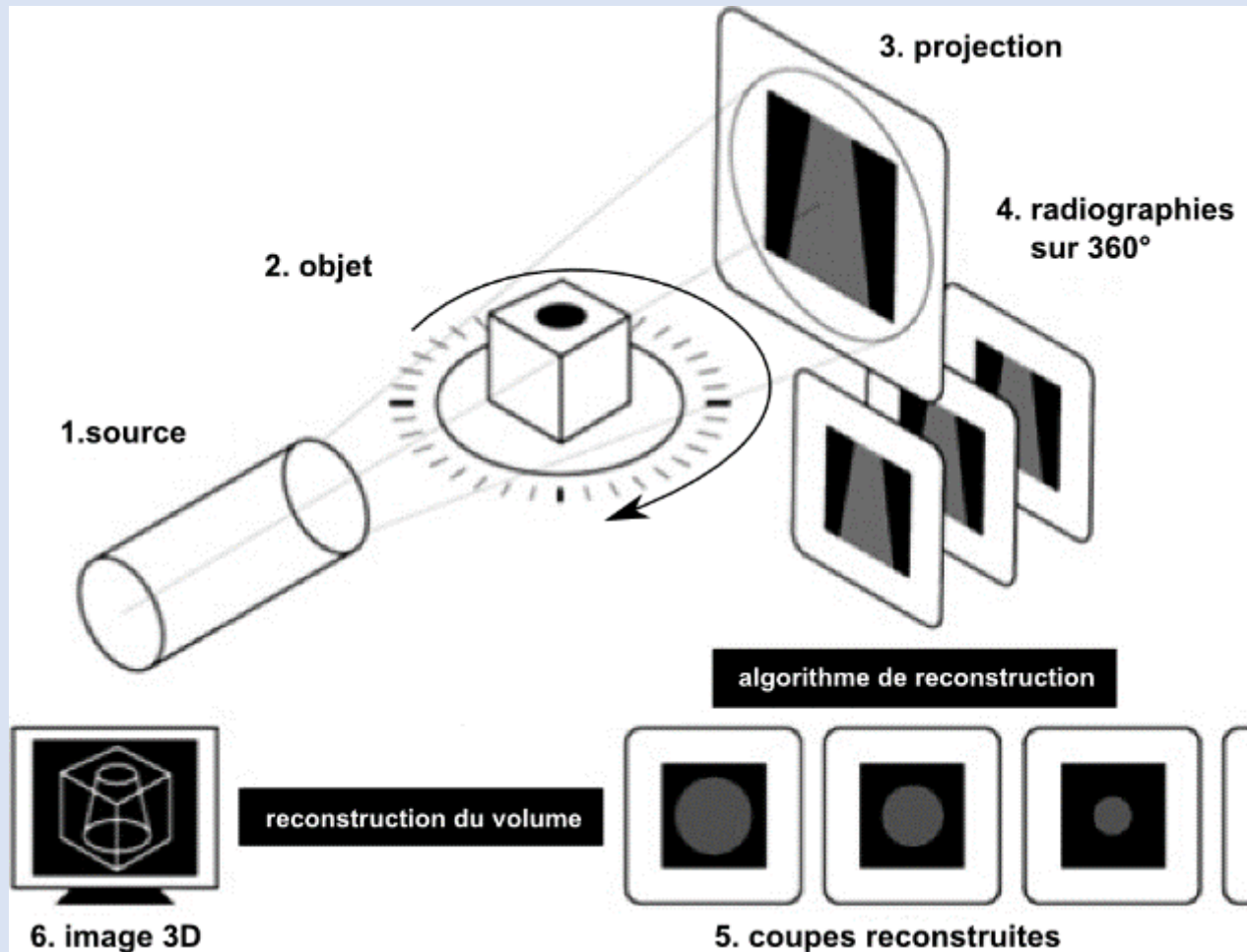
Contraste en niveaux de gris de la densité : du moins dense en noir (ici l'air) au plus dense en blanc (ici l'émail des dents)



Modélisation 3D du crâne à partir de coupes virtuelles.

Cette étape, réalisée par les chercheurs, permet d'isoler les données d'intérêt du scan pour les représenter en 3D.

- L'acquisition tomographique

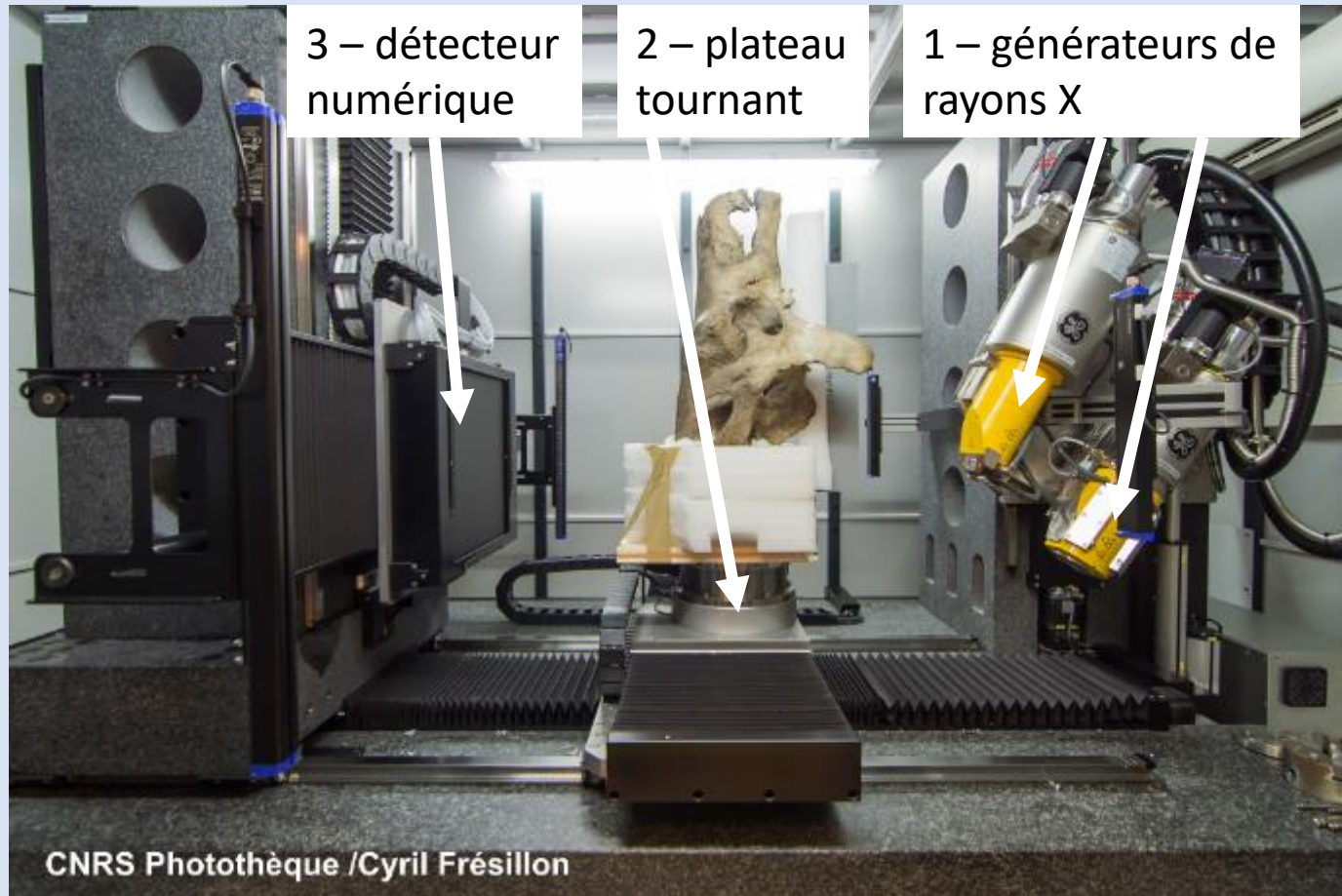


L'acquisition consiste à acquérir une série de **radiographies** lors de la rotation sur 360° de l'objet.

Les radiographies numériques enregistrent **l'atténuation** des rayons X traversant l'objet.

L'algorithme de **reconstruction** utilise l'information contenue dans les radiographies pour l'objet sous la forme d'une série d'images en 3D ou coupes virtuelles représentant la densité de l'objet.

- Le CT (computed tomography) scan



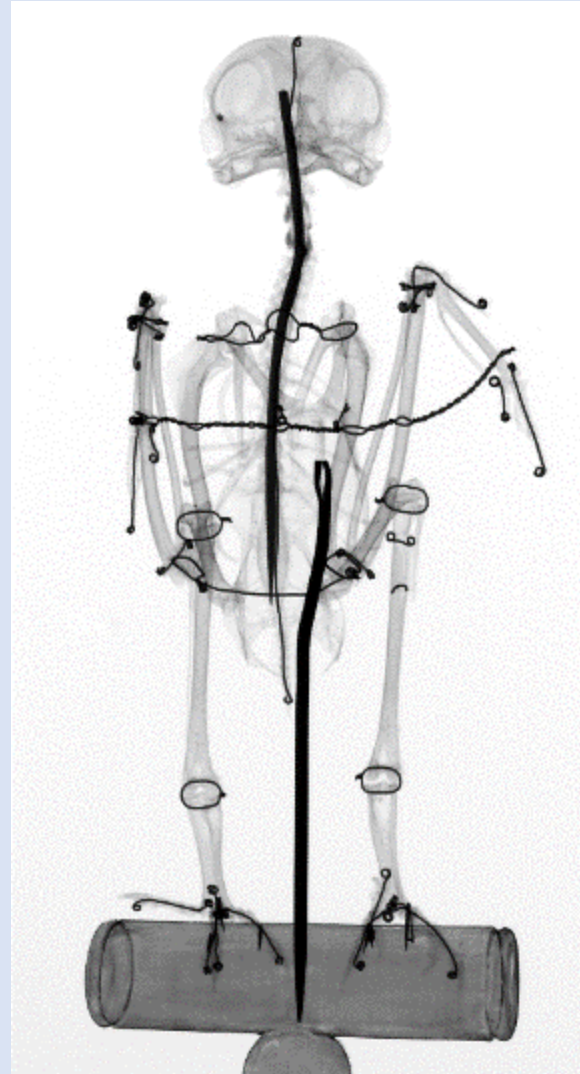
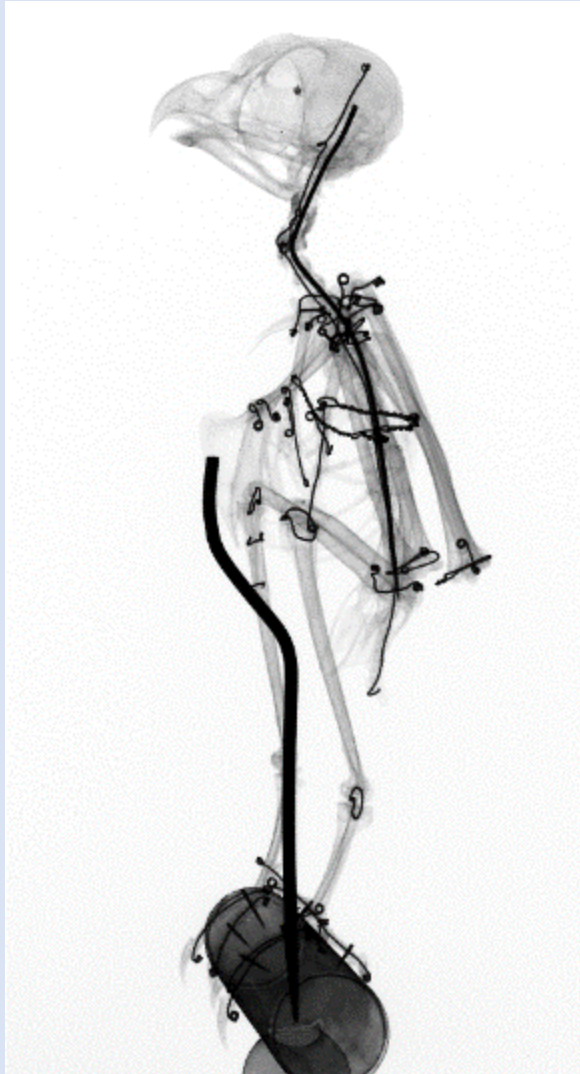
Un **CTscan** se compose d'une source à rayons X (1), d'un plateau tournant où est positionné l'objet (2) et d'un système de détection des rayons X (3).

L'ensemble est placé sur un marbre afin de s'affranchir des vibrations de l'environnement.

Cet équipement est complété par un ordinateur permettant le calcul et la visualisation des images.

Les rayons X étant des rayonnements électromagnétiques de très forte énergie (au-delà du visible) et ionisants, le système est entouré d'une cabine de **radioprotection** dont les parois sont renforcées par des plaques de plomb. L'acquisition est réalisée depuis l'extérieur de la cabine.

- L'acquisition de radiographies



Radiographies d'un squelette d'oiseau monté

Les radiographies numériques enregistrent l'**atténuation** des rayons X traversant l'objet.

L'opérateur du CTscan règle les paramètres de l'acquisition des radiographies en réalisant des compromis entre la **qualité** de l'image, le **temps d'acquisition** et la **résolution**.

Pour garantir une bonne qualité de l'image reconstruite, plus d'un millier de radiographies sont acquises lors de la rotation de l'objet positionné sur le plateau tournant.

Il est possible de réaliser une acquisition d'une zone d'intérêt dans l'objet.

- La reconstruction tomographique

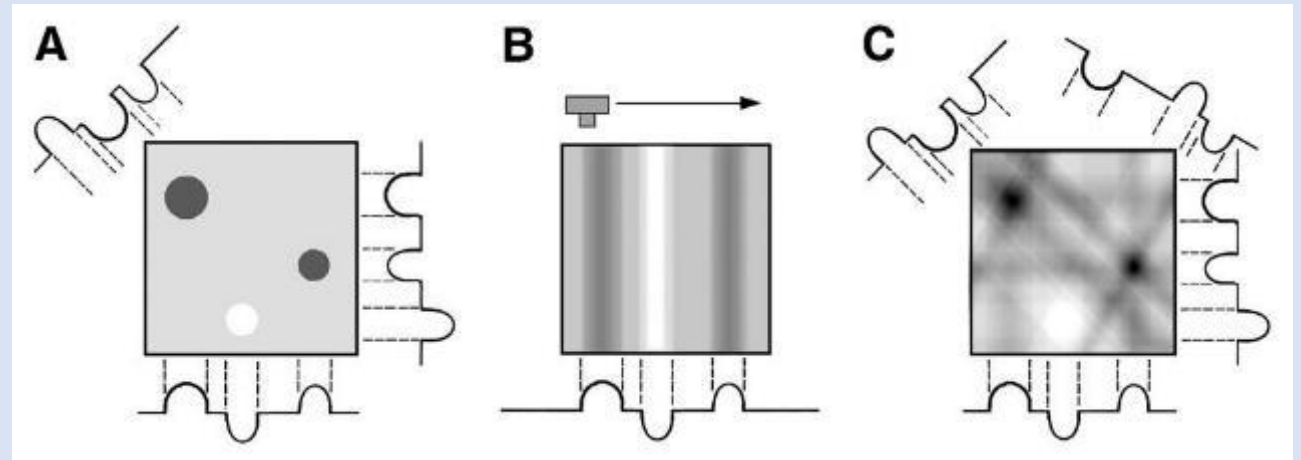
L'étape de **reconstruction tomographique**, la rétroprojection filtrée, permet d'obtenir une description de l'objet à partir des radiographies à l'aide d'un logiciel dédié. Ce calcul dure quelques minutes.

Schéma de principe en 2D de la rétroprojection filtrée :

A) Les radiographies sont collectées autour de l'objet.

B) La rétroprojection consiste à propager les valeurs d'atténuation des images suivant le trajet reliant chaque pixel à la source.

C) Les contributions de chaque radiographie sont sommées.



Lee W. Goldman. Principles of CT and CT technology. *J. Nucl. Med. Technol*, 35:115–128, 2007

Afin que le calcul de la reconstruction tomographique fonctionne bien, il est essentiel que l'objet soit positionné de façon identique sur la première et la dernière image (après la rotation à 360°). L'objet doit donc être **stable** pendant la durée de l'acquisition.

- La reconstruction tomographique

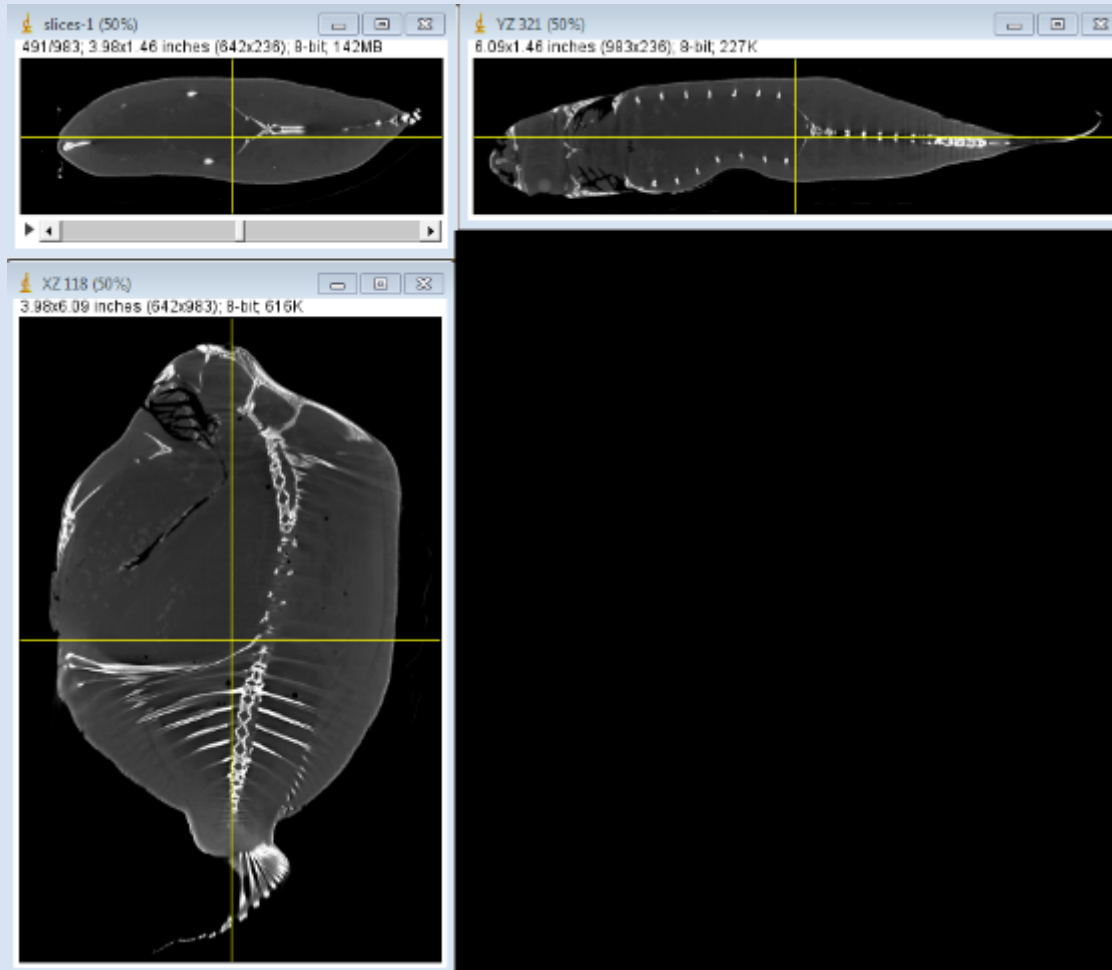


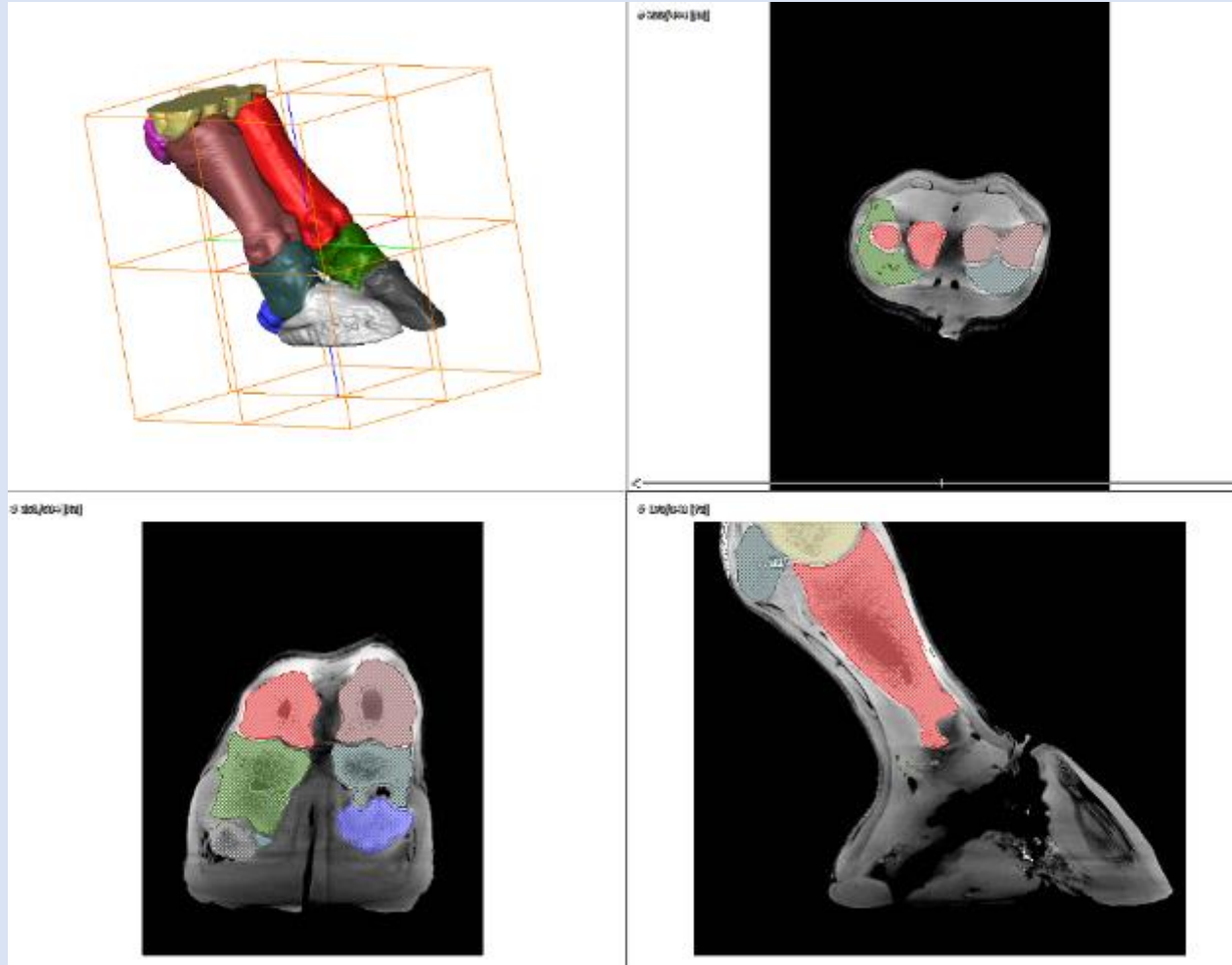
Image 3D reconstruite d'un scan de poisson.
Visualisation dans le plan axial, sagittal et coronal.

L'image 3D obtenue est enregistrée en une matrice de **voxels** (petits cubes élémentaires, équivalents en 3D des pixels d'une image 2D) dont chacun contient l'information de la **densité** de l'objet encodée en niveaux de gris.

L'image 3D est visualisable dans chacun des plans orthogonaux xy, yz et xz.
L'information de couleur/texture du spécimen n'est pas disponible dans une acquisition par micro-tomographie.

Le résultat de l'acquisition tomographique est une pile d'images 2D au format .tif dans une de ces trois orientations.

- La modélisation 3D



Segmentation des os d'un pied de girafe.

L'étape de modélisation 3D des structures d'intérêt est appelée la **segmentation**.

Elle est réalisée par les chercheurs à l'aide de logiciels dédiés.

La segmentation consiste à indiquer sur chacune des images les zones (sous la forme d'un calque de couleur) qui appartiennent à la structure à isoler.

Le logiciel de segmentation construit alors un **maillage** de chaque zone isolée.

- La modélisation 3D

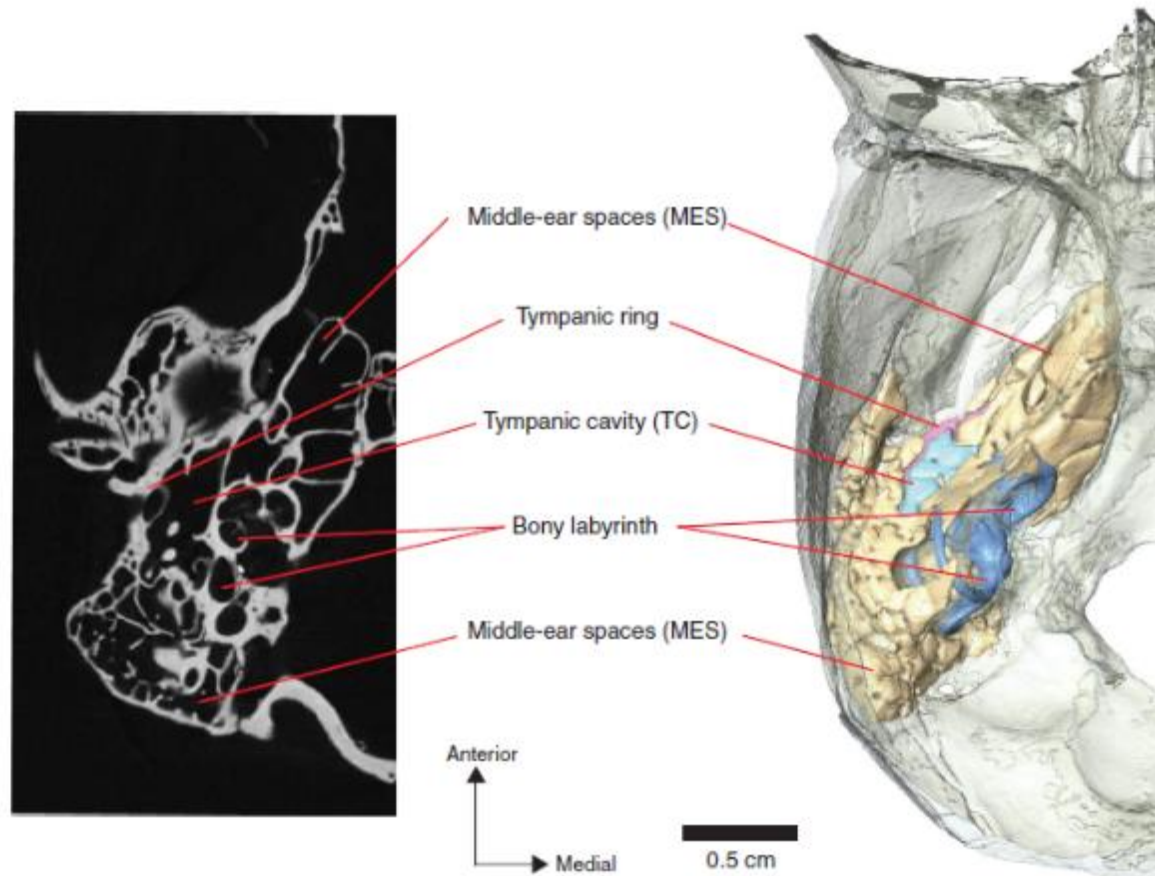


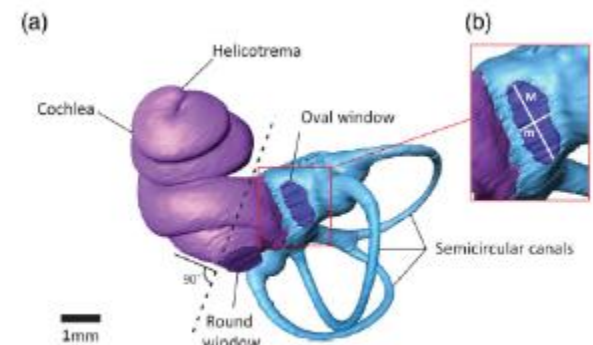
FIGURE 1 Scan slice (left) and segmentation (right) of inner and middle ear. Example of a *Mico argentatus* right ear in an endocranial view

Un **maillage** est une surface triangulée reliant des points 3D.

Le fichier pèse quelques dizaines de Mo et est enregistré dans un format spécifique (.stl, .ply ou .obj)

C'est le support utilisé pour réaliser des **mesures**, par ex. des analyses morphométriques et/ou fonctionnelles, ainsi que des visualisations avancées.

FIGURE 4 Inner ear segmentation and measurements. Example of bony labyrinth measurements in an *Otolemur crossicaudatus* right inner ear in lateral view. (a) The dashed line represents the section where cochlear volume was computed. (b) Measurements of the oval window area with major (M) and minor (m) axis lengths. (c) Diagram to explain cochlear length calculation based on cone geometry. The cone represents an uncoiled cochlea. The dashed line represents cochlear length



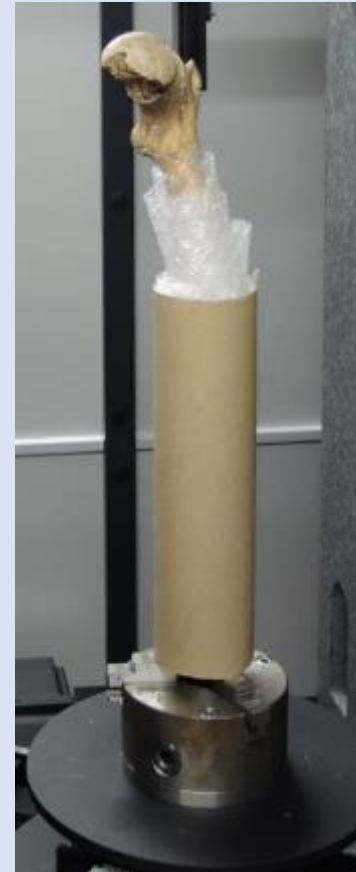
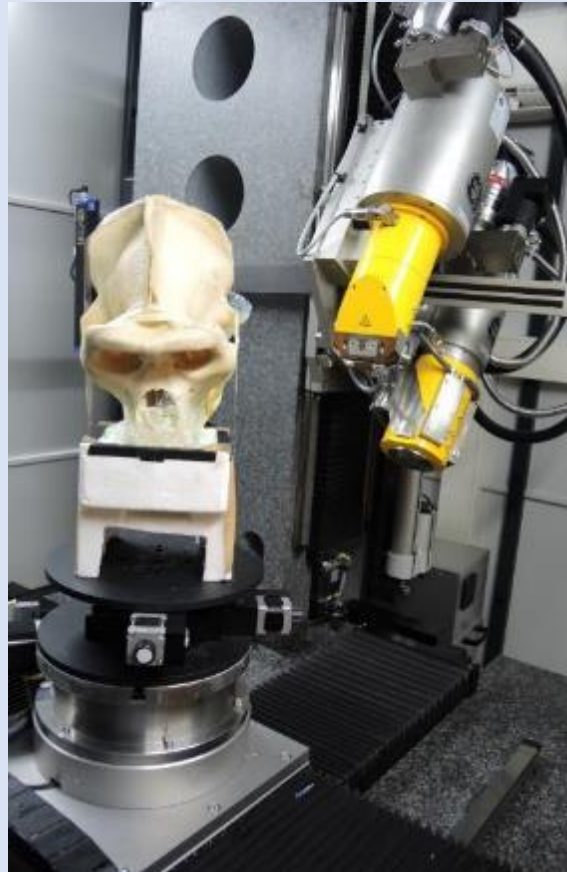
L'acquisition

Spécimen placé **verticalement** sur sa plus grande dimension pour obtenir le meilleur grossissement

Conception de supports adaptés à la forme et à la répartition du poids pour garantir l'immobilité

Distance en hauteur à prévoir avec le support métallique

Distance à prévoir pour ne pas entrer en collision avec la source ou le détecteur



Scan complet vs scan local

Scan crâne de renard en entier

Distance source - objet = 426 mm

Distance source - detecteur = 904 mm

Taille voxel = **94 μm**

Grossissement = $\times 2.1$



Scan complet vs scan local

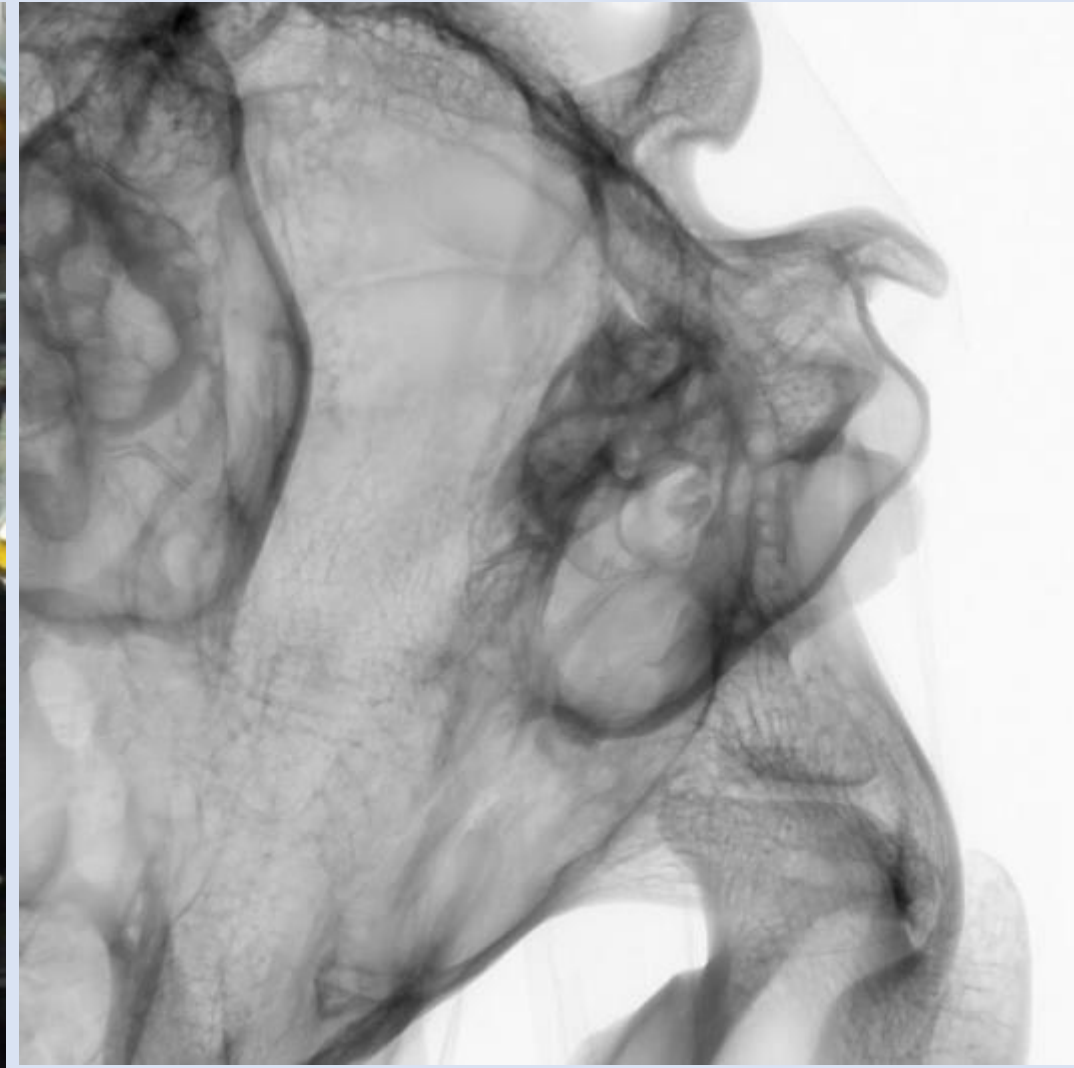
Scan région d'intérêt – oreille interne

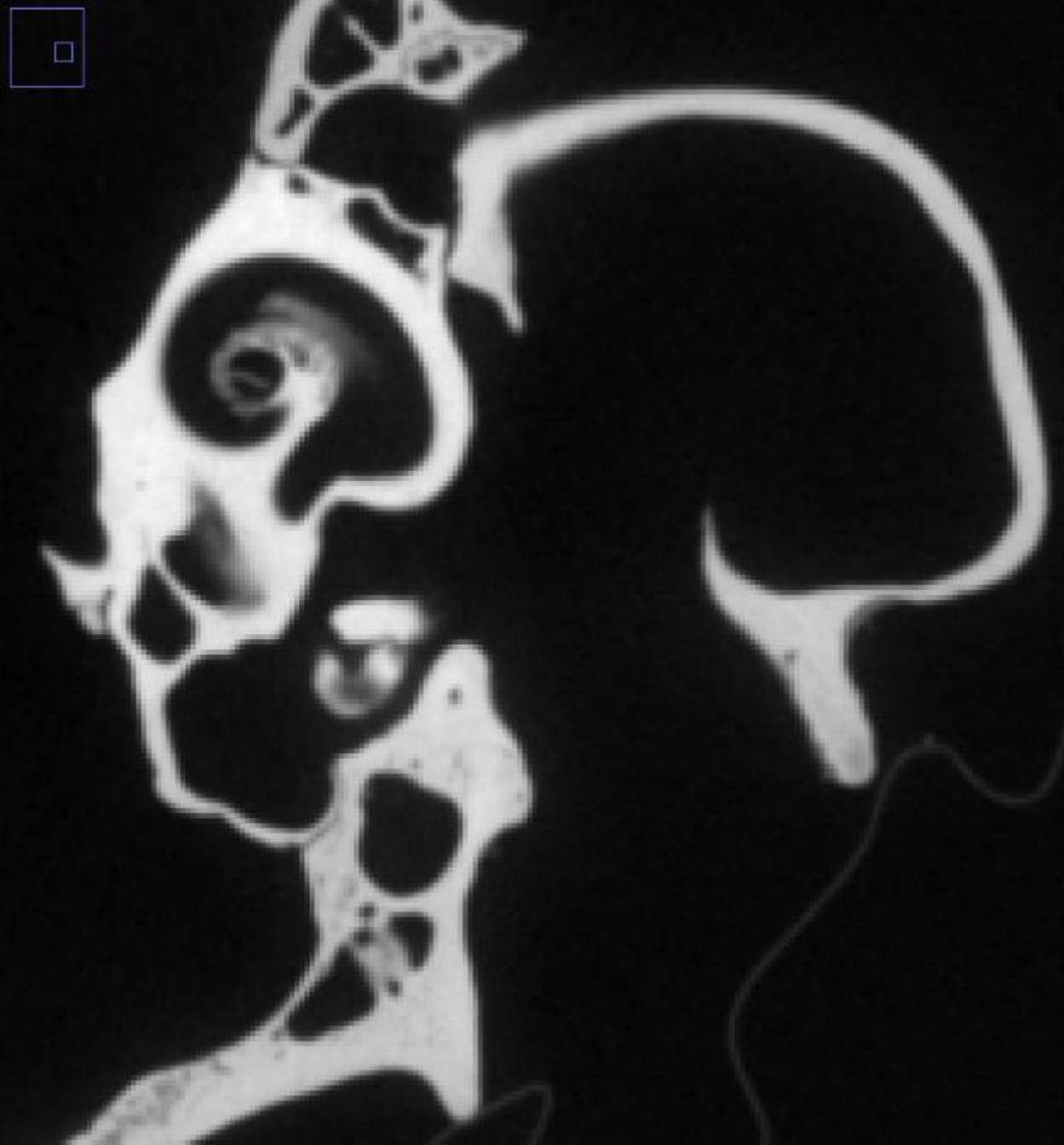
Distance source - objet = 137 mm

Distance source - detecteur = 904 mm

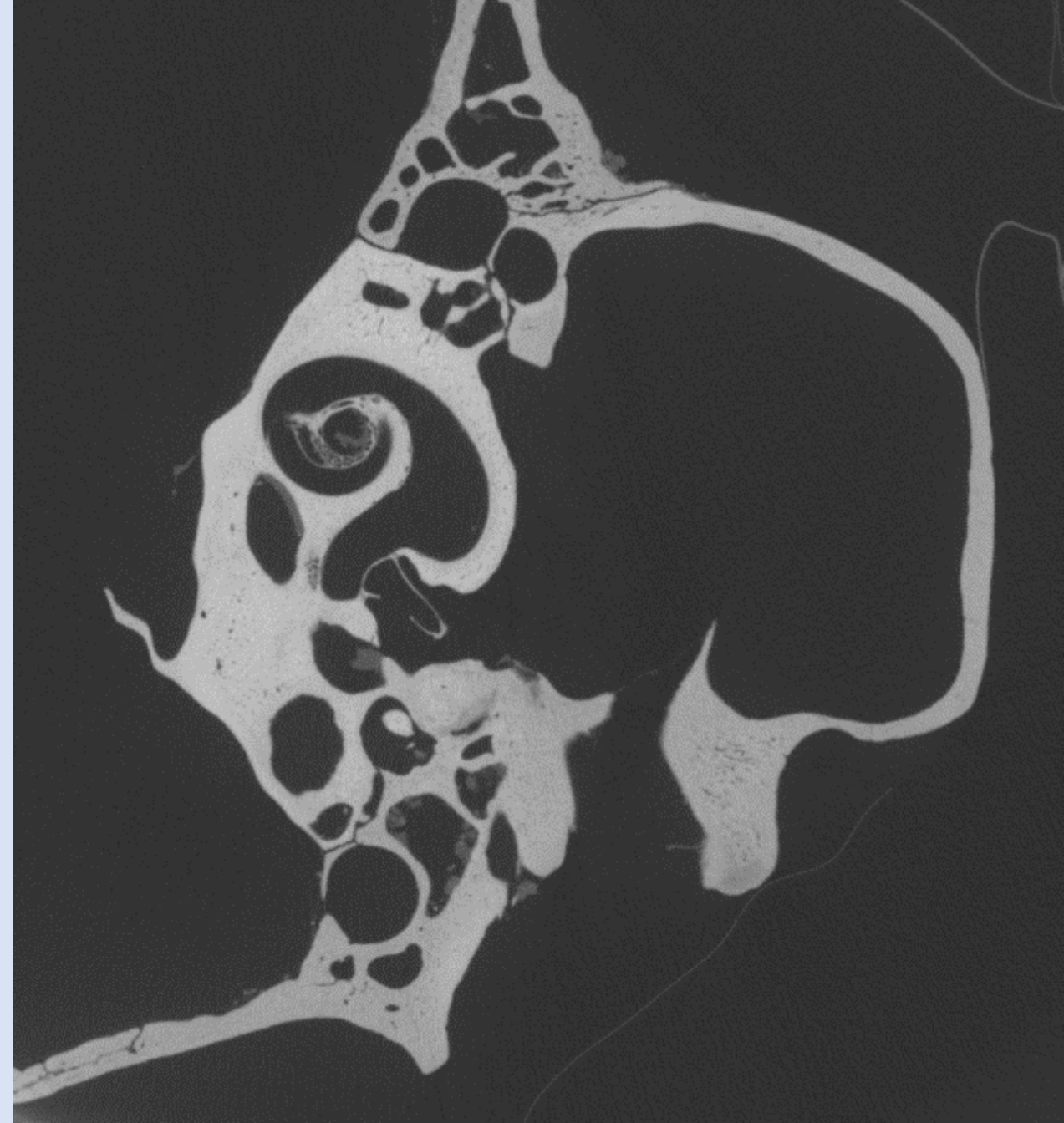
Taille voxel = **30 μm**

Grossissement = **$\times 6.6$**



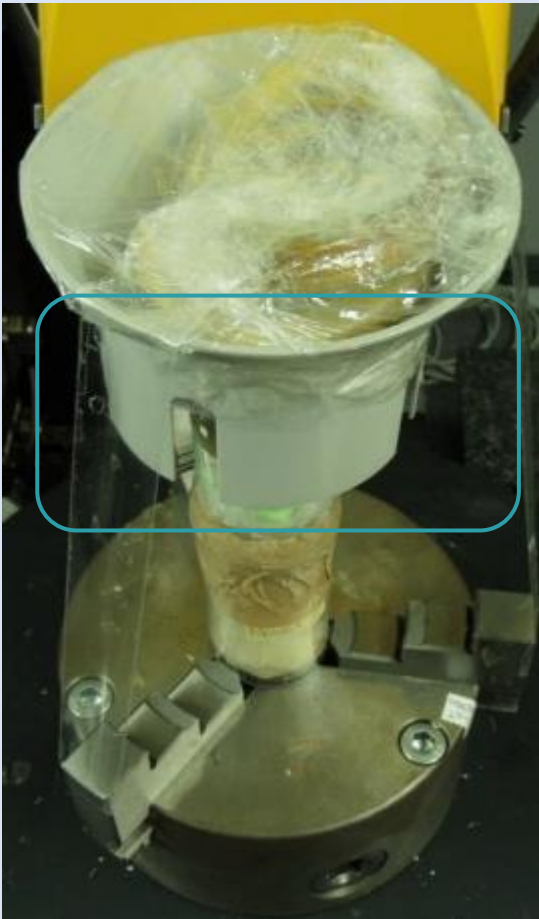


Taille voxel = **94 μm** - Grossissement = $\times 2.1$



Taille voxel = **30 μm** - Grossissement = $\times 6.6$

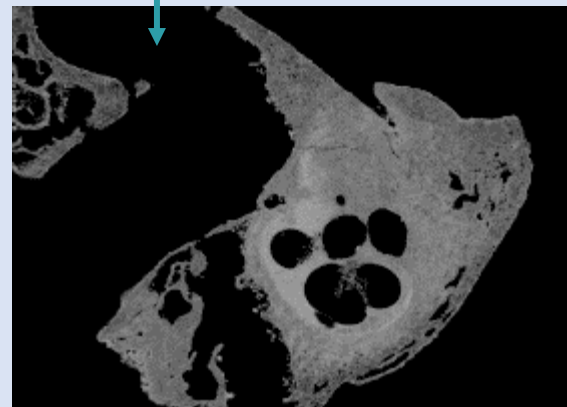
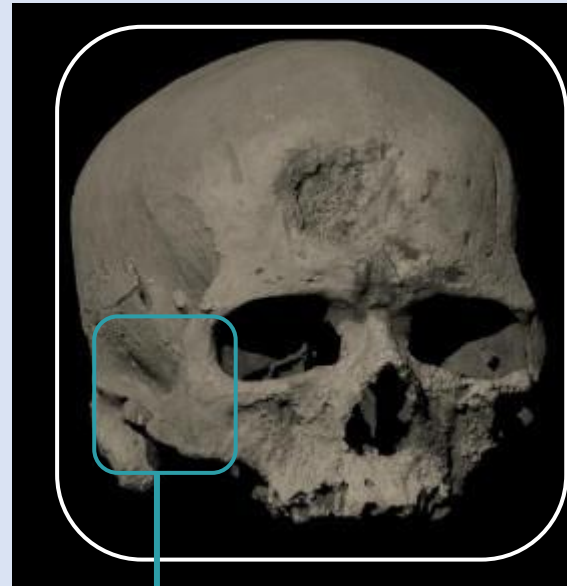
Régions d'intérêt – scan **local** pour permettre un meilleur grossissement et **une meilleure résolution**



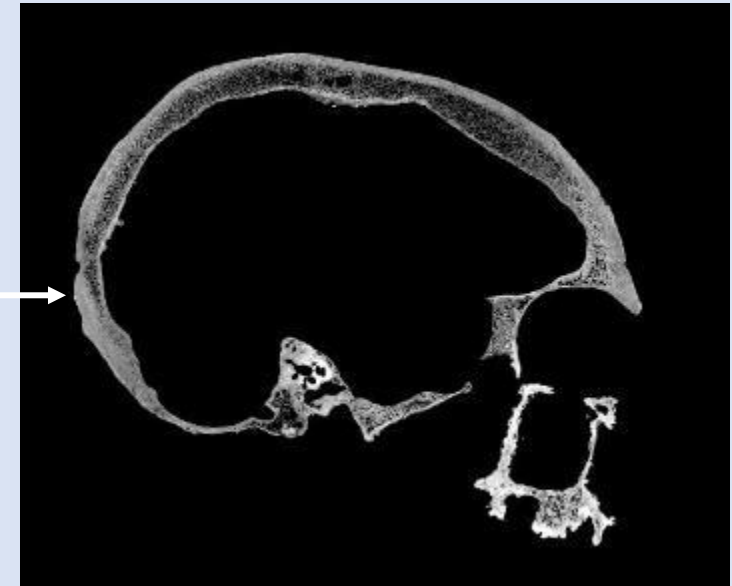
Scan de 2 crânes de lézards

Objectif : mesures morphométriques

Le scan du spécimen complet avec la même résolution
aurait nécessité 4 acquisitions supplémentaires



Zoom sur le temporal à 39 μm



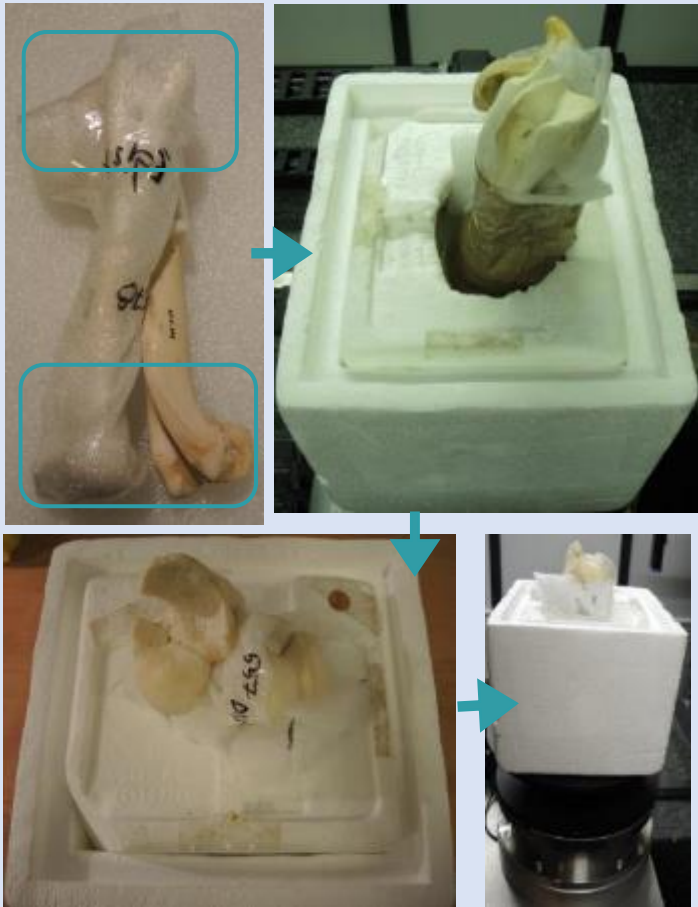
Scan complet à 114 μm

Scan du crâne de Cro-Magnon

Objectifs : spécimen unique et
caractérisation de l'oreille interne

2 scans (crâne complet + région
d'intérêt)

Montage combiné de spécimens (gain en temps) en fagot ou en colonne



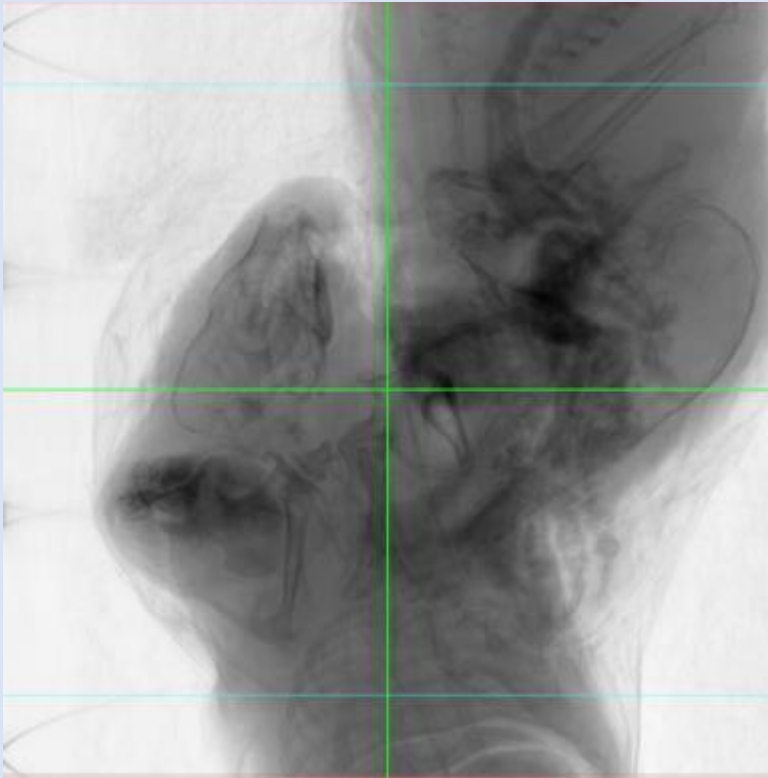
Os longs
Séparés par une feuille de mousse et calés avec de la mousse.
Stabilisés en position verticale avec le contenant.



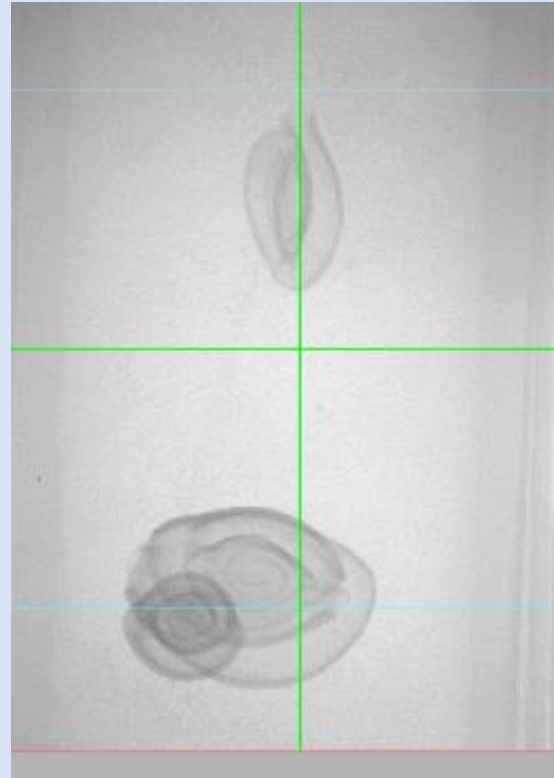
Crânes de souris
Pipette coupée en deux puis collée sur un vérin.
Les crânes sont plantés dans de la cire d'abeille.

Paramétrage spécifique à chaque type d'objet ET problématique scientifique pour obtenir la meilleure qualité d'image

Entre 1100 et 3000 radiographies par scan (8,5 Go à 23,4Go). Durée entre 20 minutes et 6h.



Plusieurs spécimens + Région d'intérêt
Taupe européenne



Plusieurs spécimens + Taille <1mm
Foraminifères



Présence de structures métalliques
Crâne humain + mandibule