

Evaluation de la microporosité du tissu osseux sous contraintes par microtomographie synchrotron

Aymeric Larrue

Encadrement : F. Peyrin, CREATIS-LRMN,

Collaboration: L. Vico, LBTO

INTRODUCTION

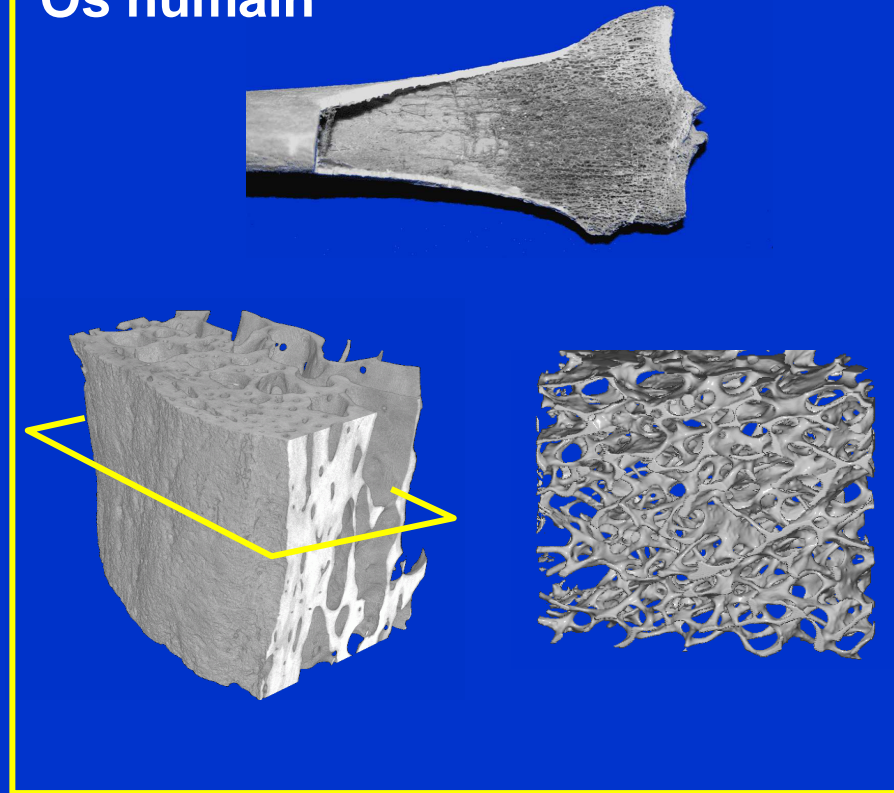
◆ Contexte

- L'ostéoporose et les maladies de fragilité osseuse
- Problème de santé publique croissant avec le vieillissement de la population

◆ Diagnostique

- Dual Absorptiometry (DXA) : mesure de la densité osseuse (quantité)
- Pas assez fiable : deux os de même densité peuvent avoir des propriétés différentes
- La qualité osseuse est primordiale

Os humain



QUALITE OSSEUSE ET MICRO-DOMMAGES

◆ La Qualité osseuse

- Micro-architecture, remodelage, Minéralisation, Ultra-structure
- Micro-porosité, Micro-dommages

◆ Micro-dommages

[Donahue, Crit Rev Biom Eng. 06]

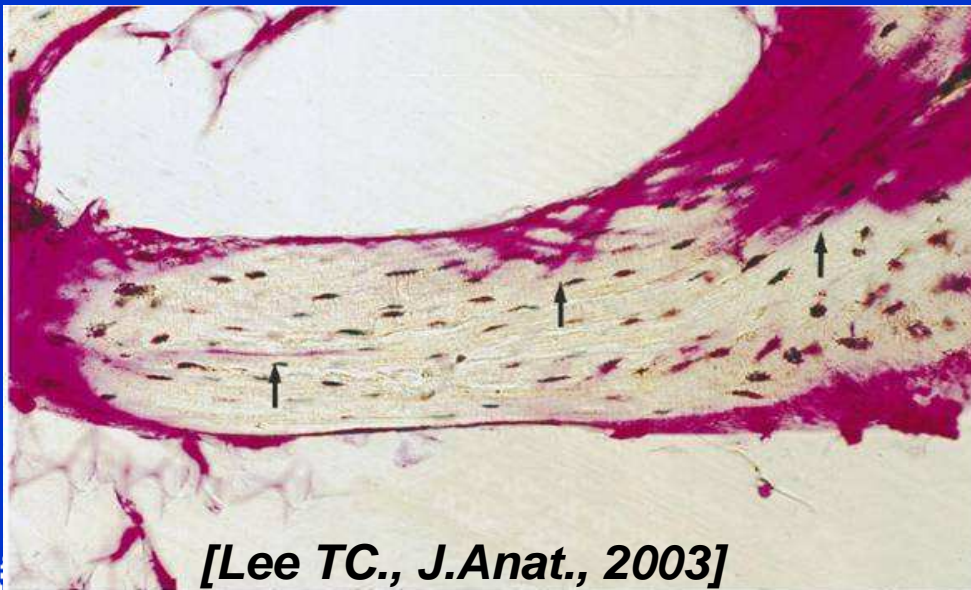
- Rôle dans la capacité d'adaptation du tissu osseux
- Absorbent et dissipent l'énergie des contraintes mécaniques – évitent des fractures plus importantes
- Hypothèse : stimuli pour le remodelage
- Leur forme et leur localisation dépendent des contraintes

MICRO-CRACKS

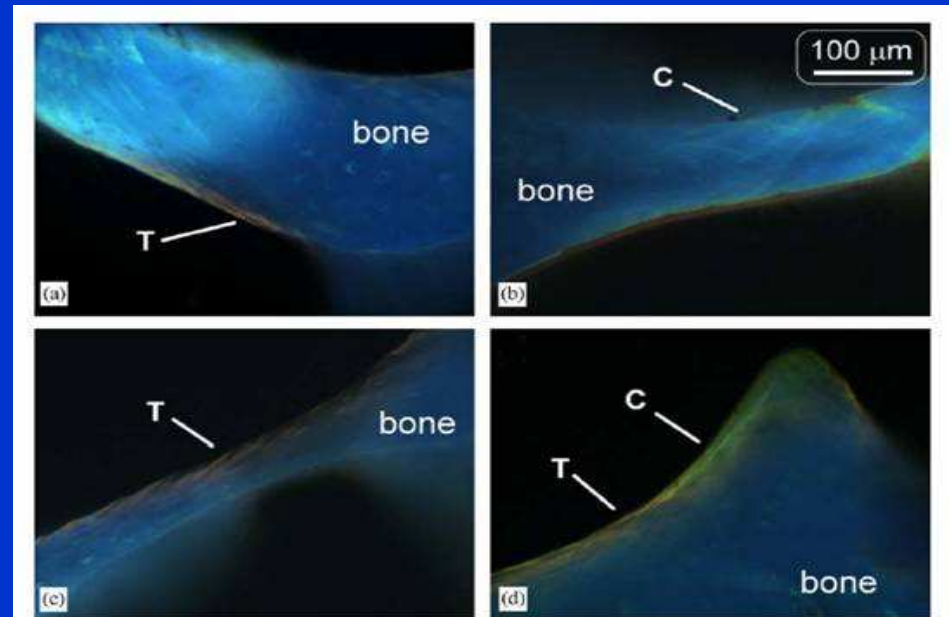
- ◆ Types de micro-dommage
 - Dommages diffus
 - Micro-cracks linéaires
 - Micro-cracks parallèles
 - Micro-cracks croisés

- ◆ Morphologie

- Ellipsoïdes planes et fines
- $\sim 5 \mu\text{m} * \sim 50 \mu\text{m} * \sim 200 \mu\text{m}$
- Grande variabilité
- Différentes échelles (phénomène hiérarchique) de l'ostéon aux lamelles



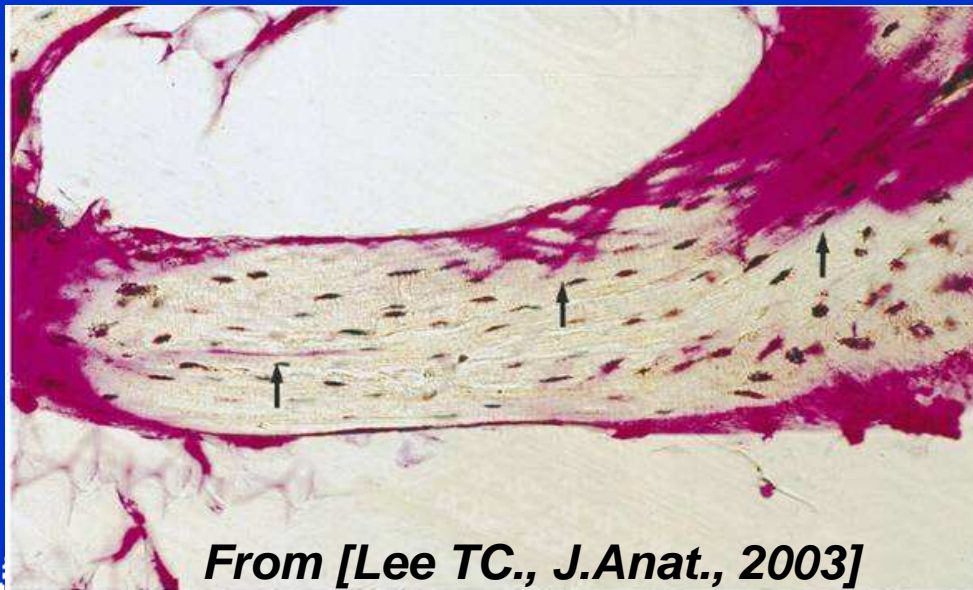
[Lee TC., J.Anat., 2003]



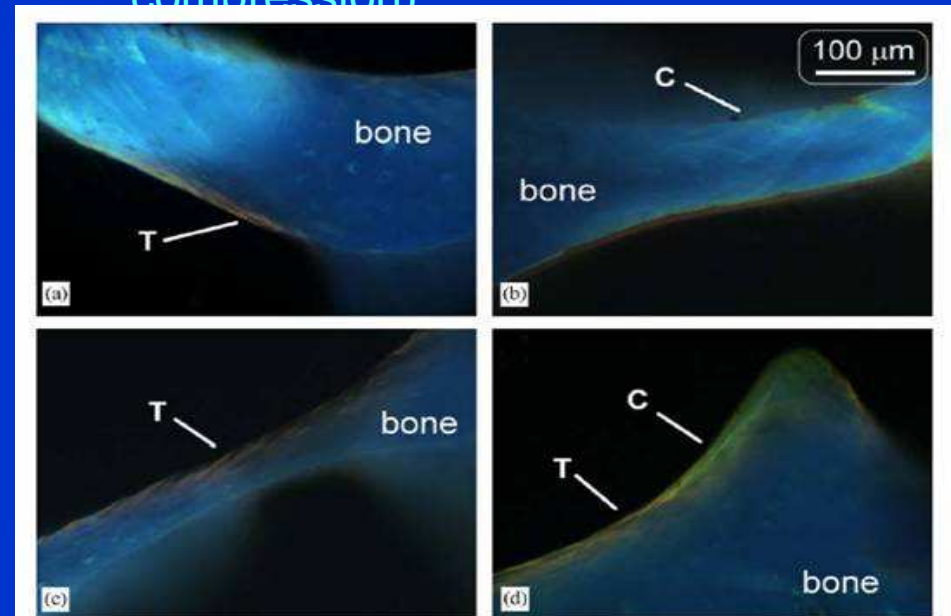
[Wang, J. of Biomechanics, 2006]

OBSERVATIONS 2D

- ◆ Coupes histologiques + fuchsine basique :
 - Observation par microscopie traditionnelle



- ◆ Coupes histologiques + Fluorochromes
 - Observation par microscopie à épifluorescence
 - Permet de faire des séquences (T : cracks par torsion, C: cracks par compression)



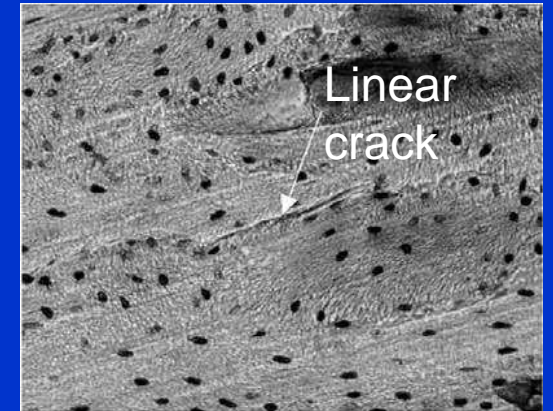
OBSERVATION 3D

◆ Reconstruction histologique en série

- Manuel, basse resolution [Mohsin, J.Anat, 2006]

◆ Microscopie confocale

- Haute résolution, petit champ de vue, résolution spatiale anisotrope [Diab, Bone, 2006]



◆ Micro-CT par Rayonnement Synchrotron [Thurner, Bone, 2006]

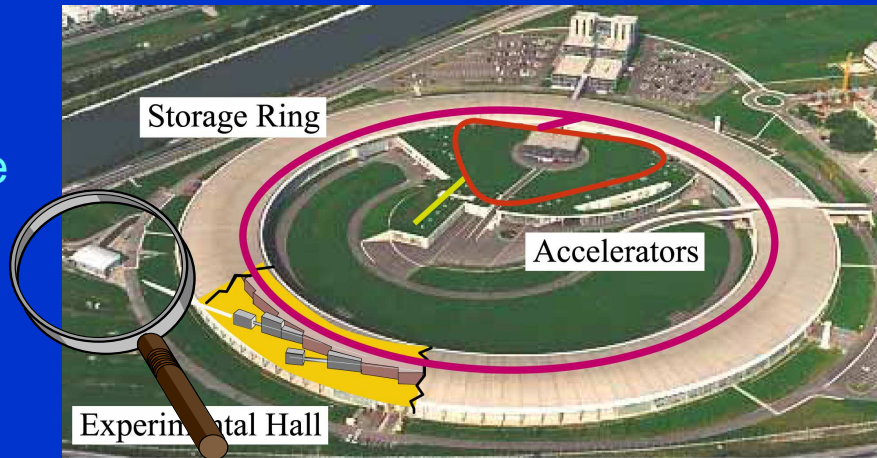
- Haute résolution, isotrope, champ de vue relativement large
- Déjà utilisé pour observé des micro-cracks sous contrainte (voxel : $7\mu\text{m}$)
- Plus proches de micro-fractures : grande taille et fort contraste à cette résolution
- Peu de traitement

OBJECTIFS

- ◆ Visualisation et caractérisation de micro-cracks en 3D à haute résolution
- ◆ Développement d'outils de détection et d'analyse des cracks spécifiques à la micro-tomographie synchrotron
 - Extraction automatique et fiable de paramètres quantitatifs 3D sur un grand nombre d'échantillons
- ◆ Caractériser différents groupes d'échantillons
 - Échantillons humains, os trabéculaire (peu de données)
 - Conditions physiologiques, cracks naturels
 - Protocole de fatigue mis en œuvre au LBTO

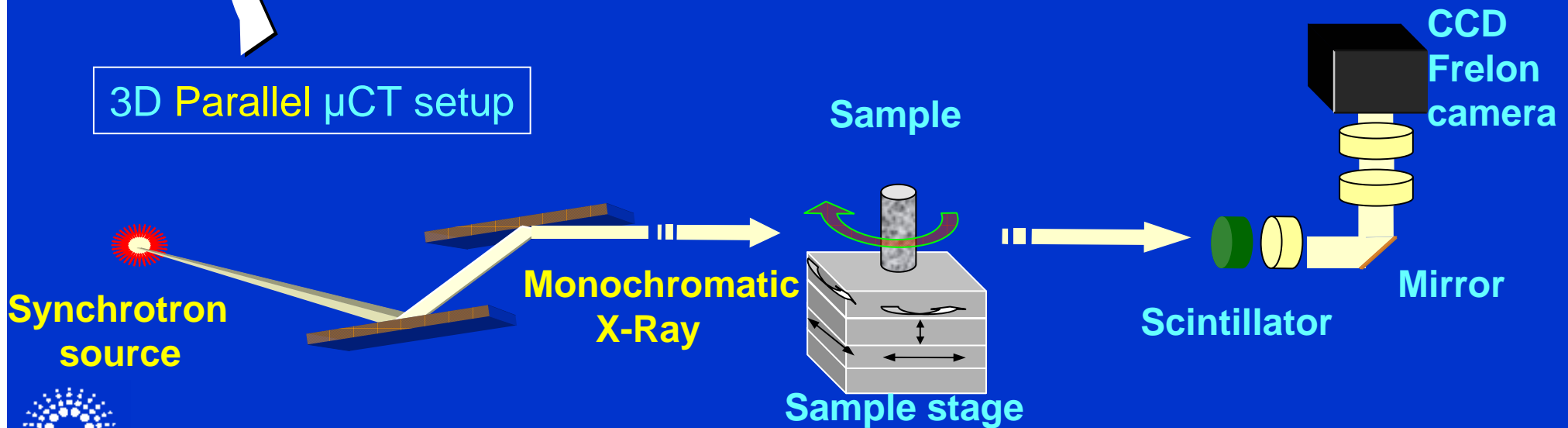
MICRO-CT SYNCHROTRON À L'ESRF, Grenoble

Beamline
ID19



- Energie : 8 to 80 KeV
- Images : $(1024)^3$ to $(2048)^3$
- Faisceau monochromatique
- Voxel :
 - isotrope
 - De $10\ \mu\text{m}$ à $0.3\ \mu\text{m}$

3D Parallel μCT setup



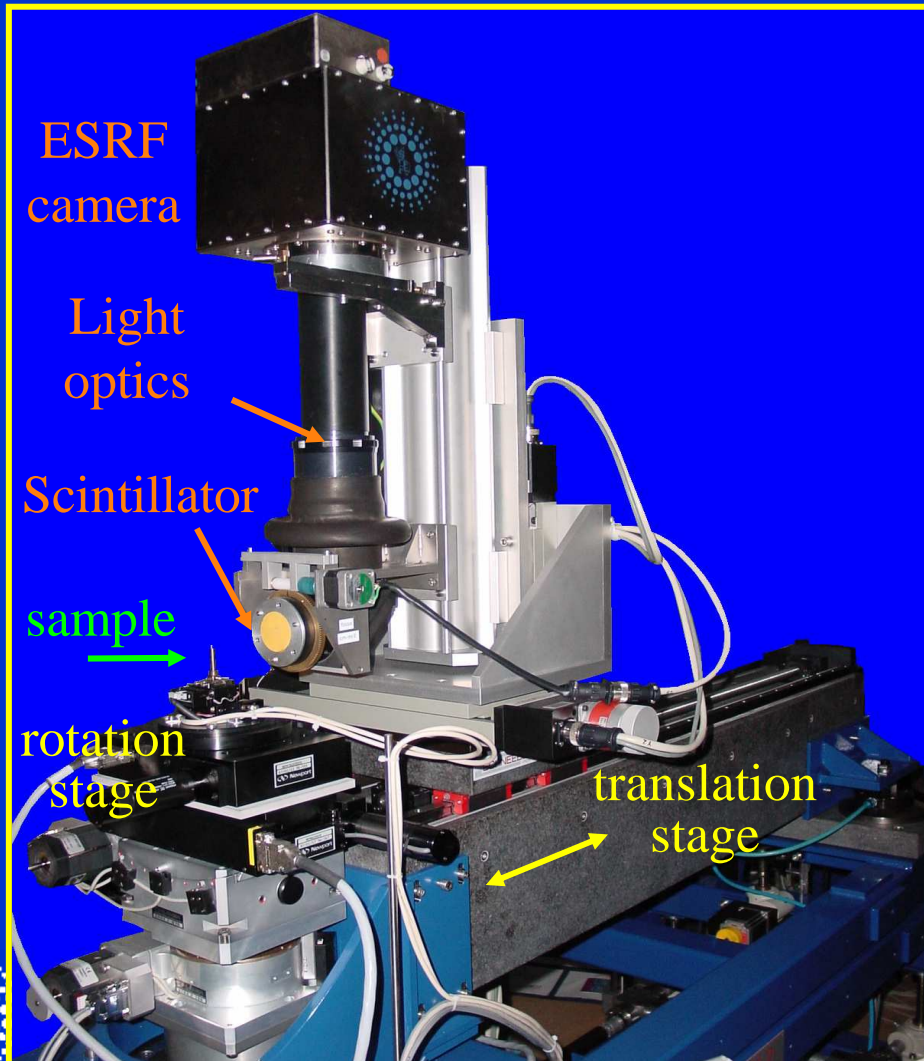
[Salomé et al., *Med Phys*, 1999]

CLUSTERS
DE RECHERCHE
RHÔNE-ALPES
HANDICAP - VEILLISSEMENT - NEUROSCIENCES

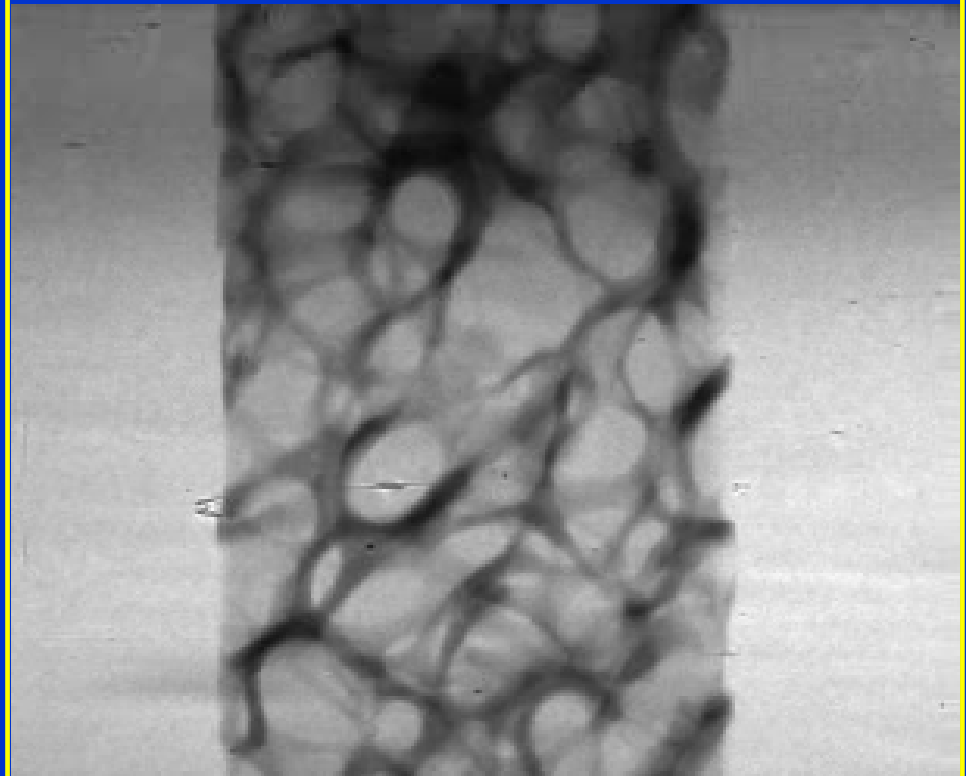
Creatis
LRMN

LBTO

MICRO-CT SYNCHROTRON À L'ESRF, Grenoble



Acquisition = série de radiographies

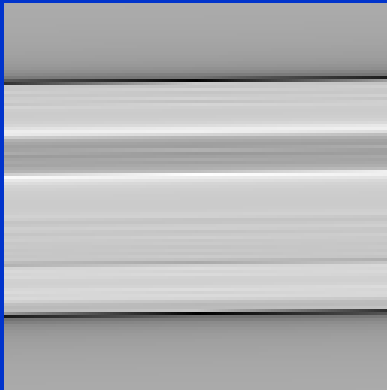


MICRO-CT SYNCHROTRON À L'ESRF, Grenoble

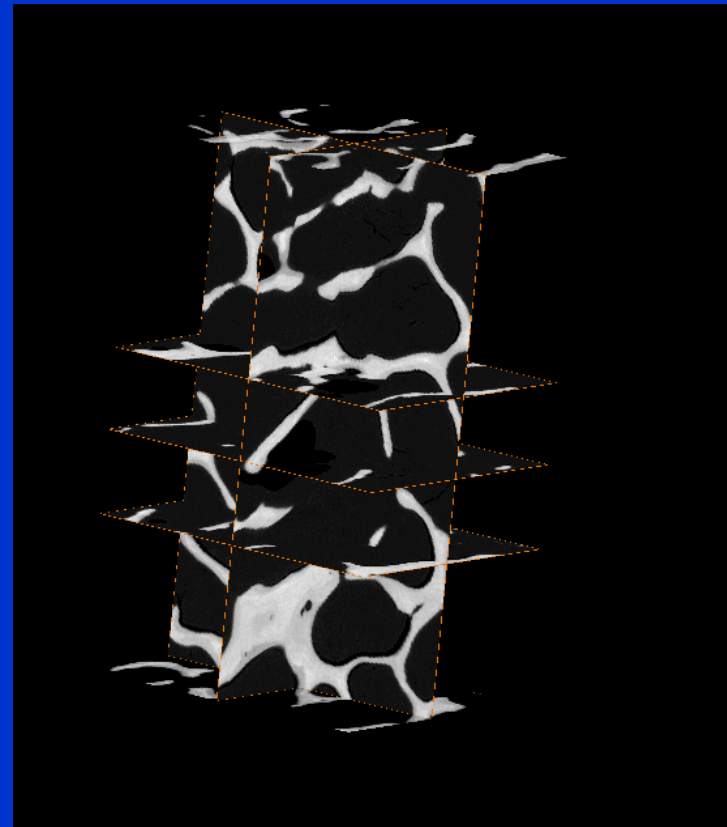
Rétroprojection filtrée (FBP)

Algorithme en 2 étapes :

- ♦ Filtrage des projections
- ♦ Rétro-projection des projections filtrées

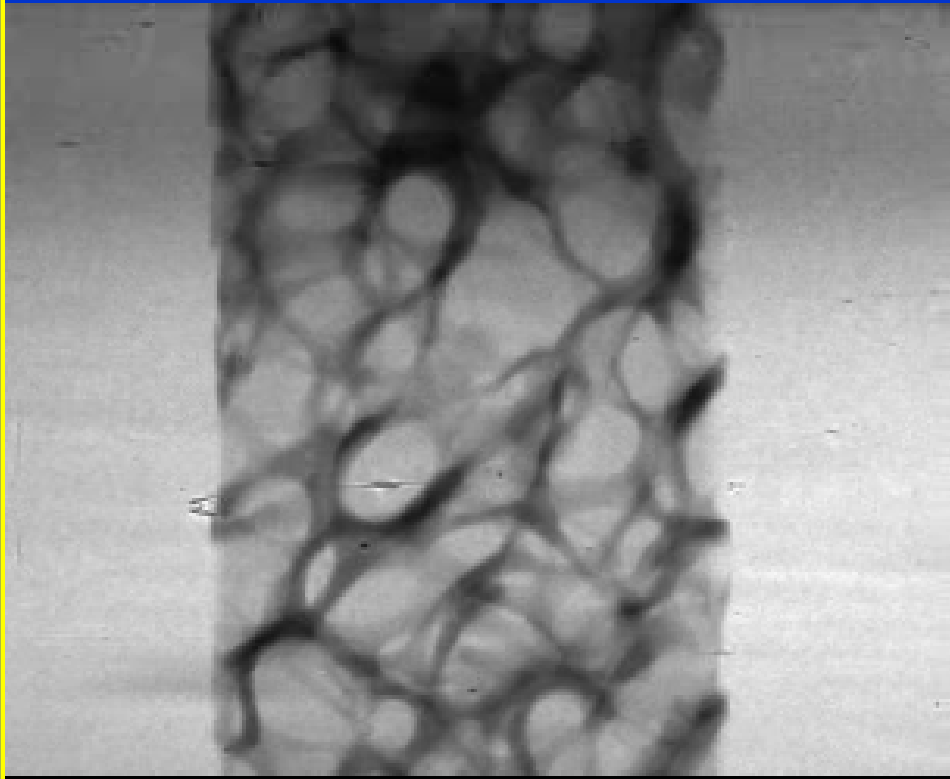


Reconstruction coupe par coupe

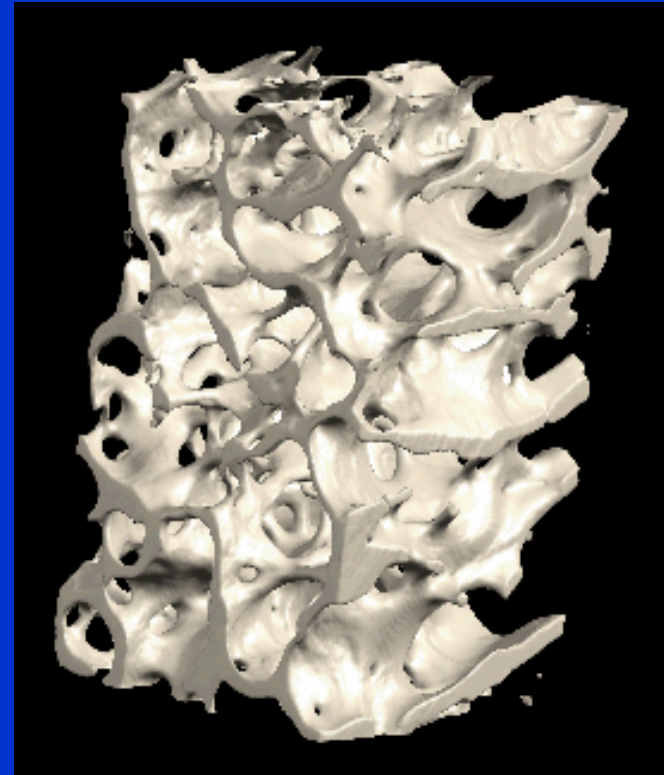


MICRO-CT SYNCHROTRON À L'ESRF, Grenoble

Acquisition



Volume



L'IMAGERIE D'ECHANTILLONS D'OS TRABECULAIRE HUMAIN

◆ Echantillons

- Têtes de fémur humaine
- Inclusion dans la résine MMA

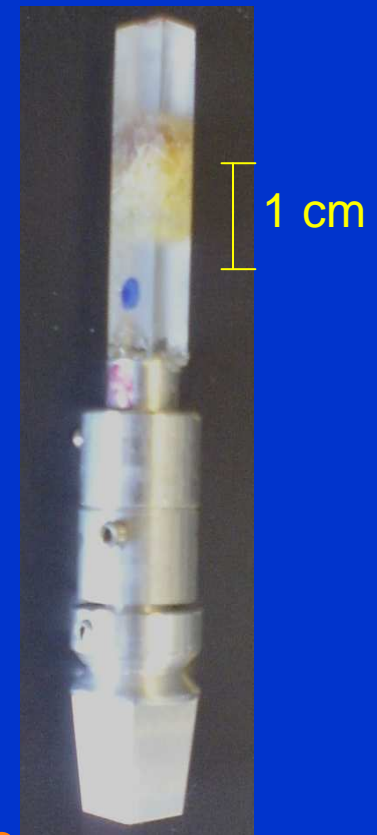
◆ Fatigue

- Environnement physiologique (ZETOS) (tissus osseux frais)
- Echantillons témoins et fatigués à basse fréquence :
1Hz , 5Hz, 10Hz, Contrainte < 0.1%

◆ Imagerie

- SR micro-CT, 23 KeV
- Résolution :
 - 1.4 μm , FOV : 2.8 x 2.8 x 2.3 mm³, 2 images par échantillon
 - 5 μm , FOV : 7 x 7 x 5.5 mm³, 2 images par échantillon

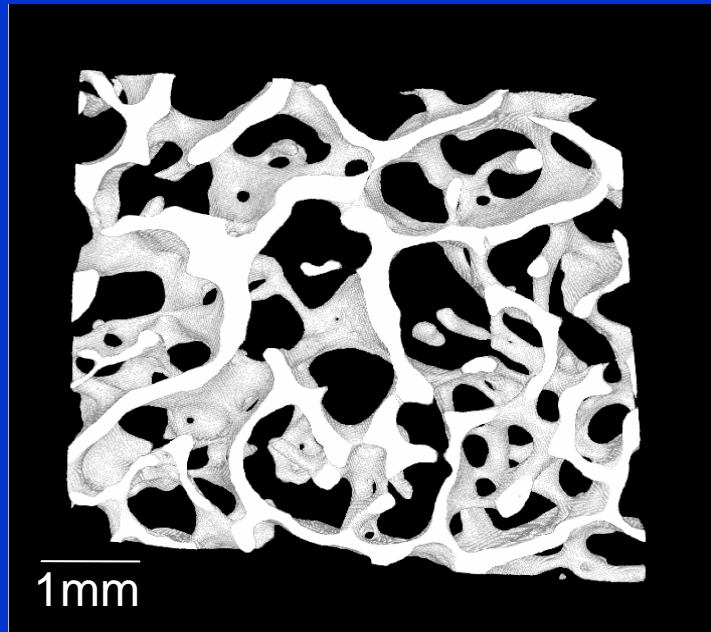
NB: Le champ de vue est inversement proportionnel à la résolution



RESOLUTION vs CHAMP DE VUE

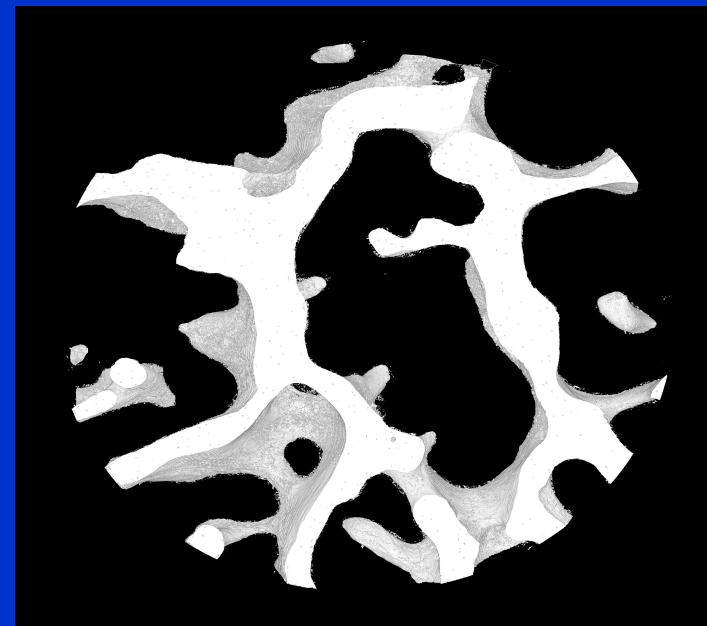
♦ images a $5\mu\text{m}$:

- Champ de vue important
- MAIS micro-cracks invisibles



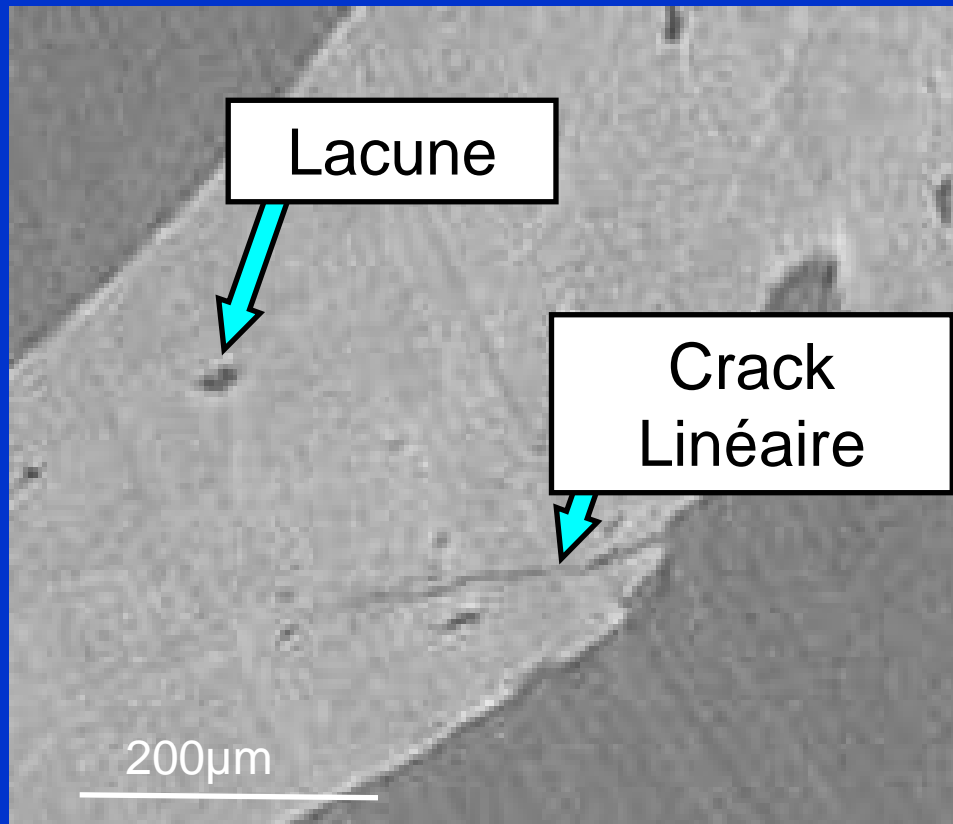
♦ images a $1.4\mu\text{m}$:

- Champ de vue plus petit
- MAIS micro-cracks visibles

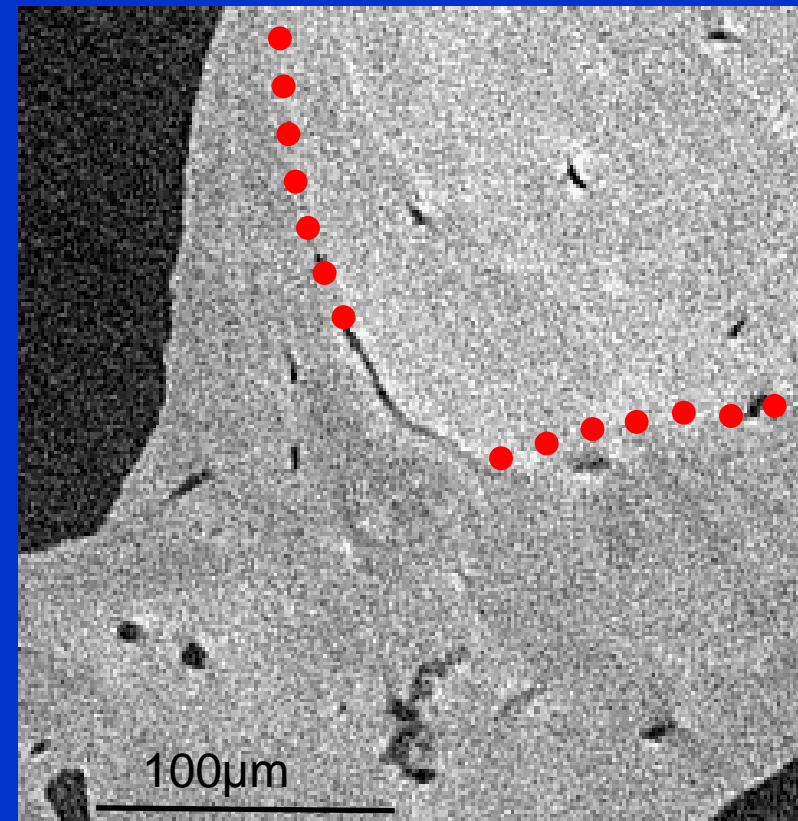


Vue 3D

ANALYSE QUALITATIVE



μ -crack linéaire



Cracks entre deux zones de différente minéralisation

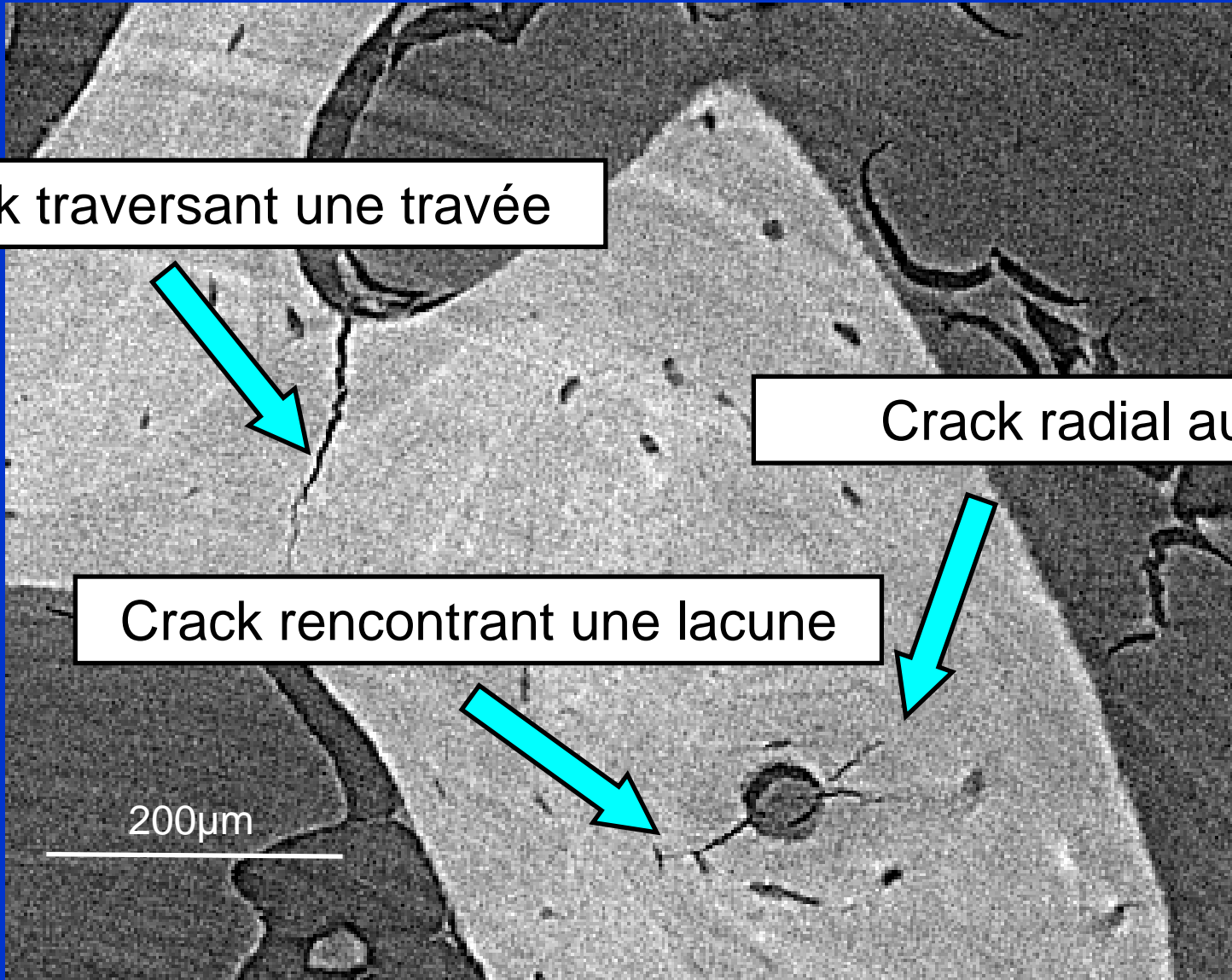
ANALYSE QUALITATIVE

Crack traversant une travée

Crack radial au pore

Crack rencontrant une lacune

200µm



ANALYSE

◆ Position du problème :

- Segmentation des micro-cracks

◆ Difficultés

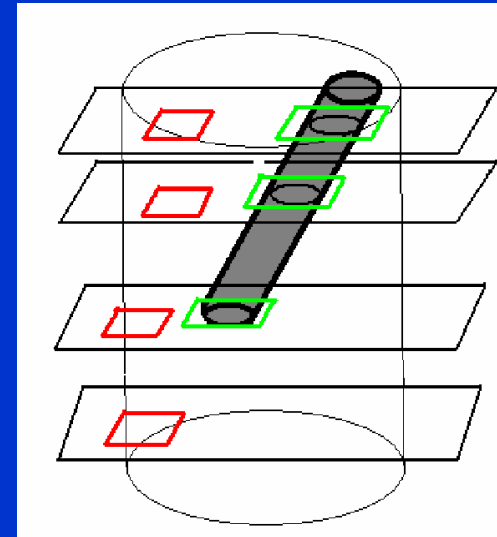
- Objets à segmenter très fins (2-3 voxels)
- Faible contraste, bruit gaussien, artefacts circulaires
- Limite de résolution causant un effet de volume partiel
- Taille des données : 8 Giga octets par image

◆ Méthodes de débruitage

- Méthodes linéaires : perte de SNR qui est déjà faible
- Méthodes non-linéaires :
 - Diffusion anisotrope : amplifie les autres irrégularités (fond et artefacts)
 - Approches statistiques et filtres par voisinage (par exemple SUSAN) : peu de voxels concernés, statistiques non fiable

ANALYSE

- ◆ Idée : utiliser la morphologie des cracks
 - 1ère approche : utiliser la répétition du contour des cracks sur un grand nombre de coupes (information redondante)
 - Pas efficace : trop de bruit, pas assez de contraste
 - 2ème approche : Evaluer le caractère localement planaire

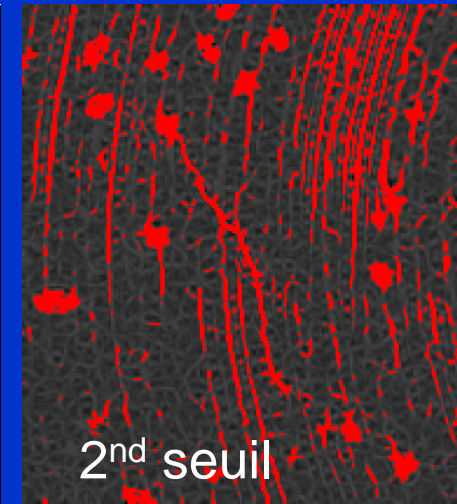
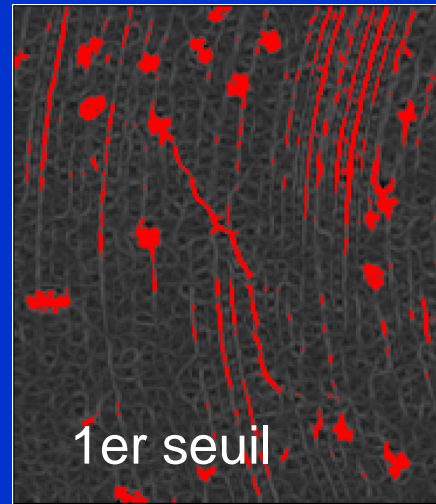
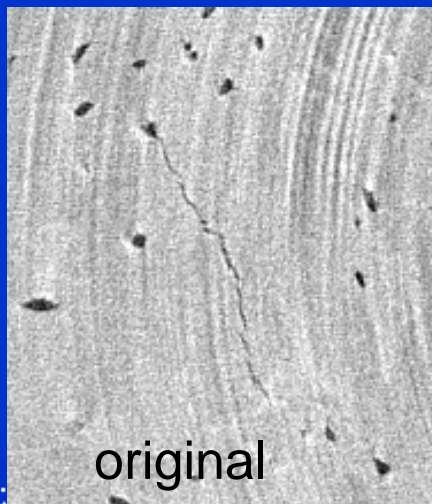


FILTRAGE NON LINEAIRE

- ◆ Les filtres “Steerable” fournissent un critère de planéité locale robuste et sensible

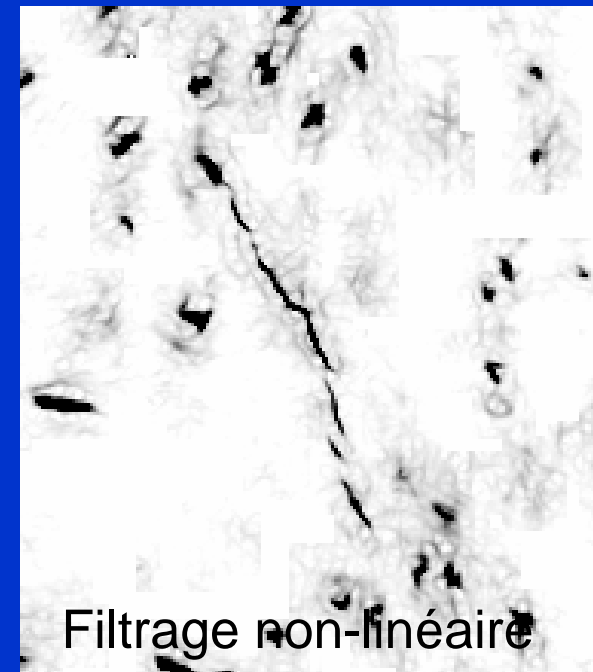
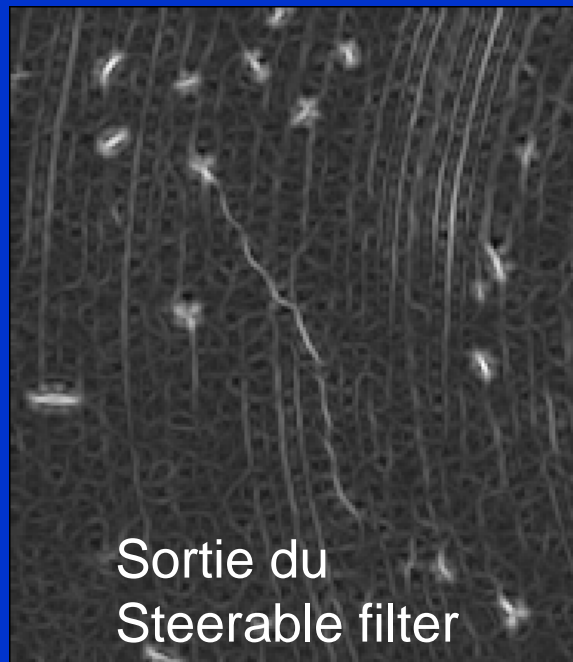
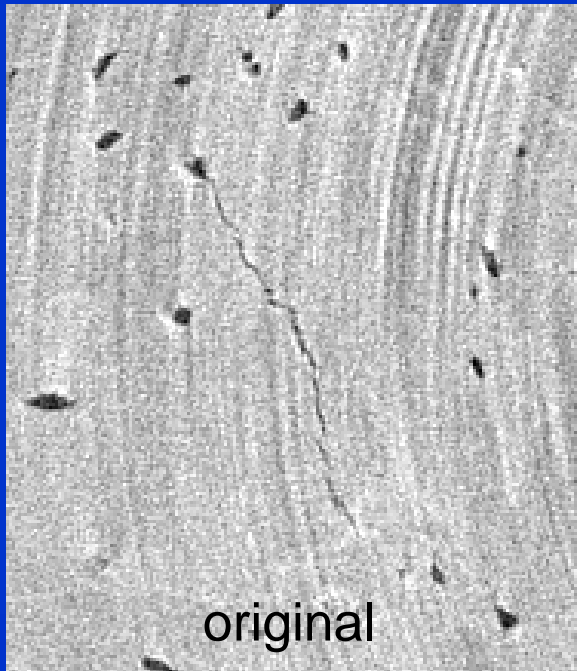
– Problème :

- L’information sur les niveaux de gris est perdue
⇒ détection des contours sombres et clairs
- Les structures sont reliées entre elles



FILTRAGE NON LINEAIRE

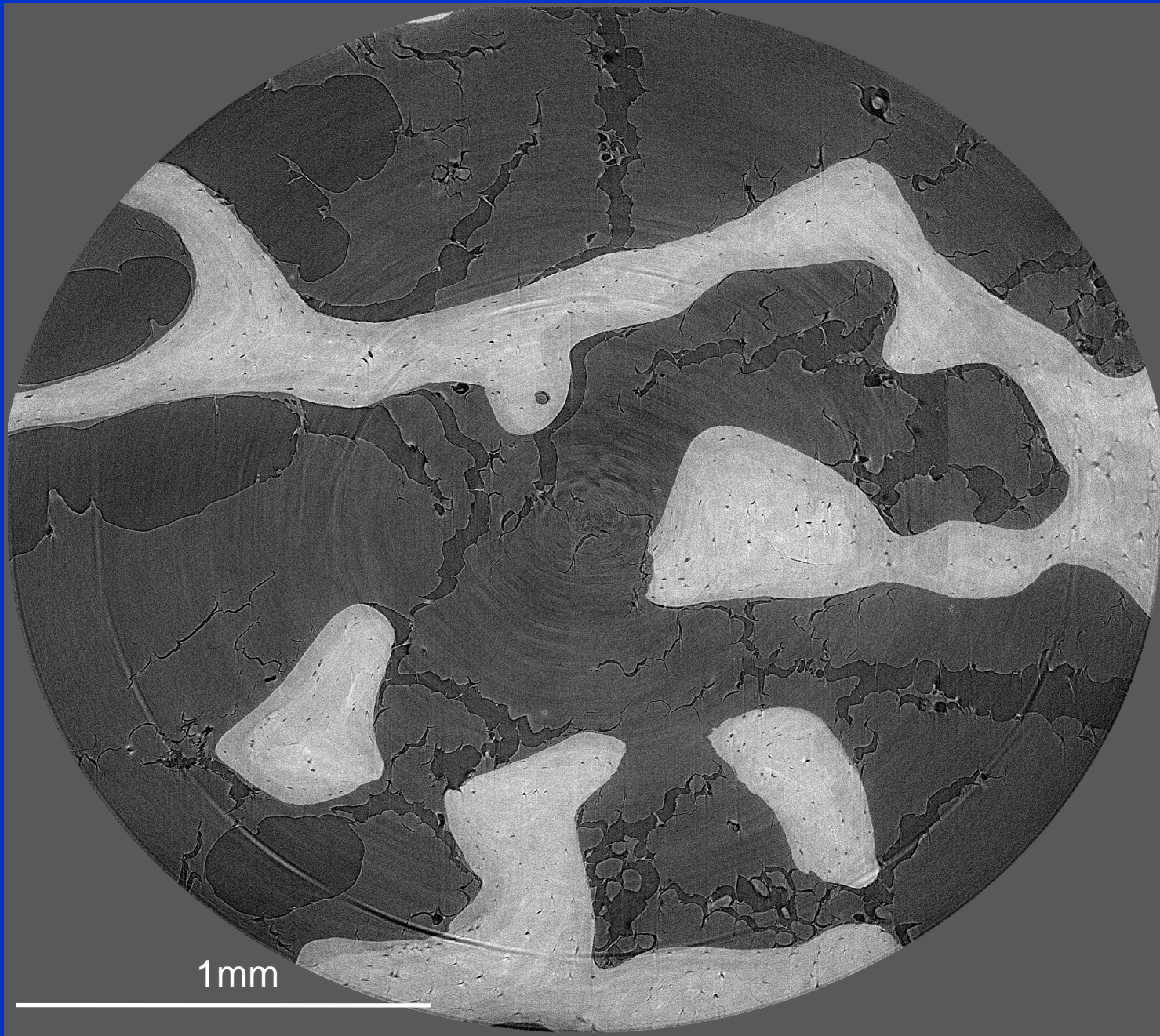
- ♦ Solution proposée : utiliser ce critère pour un filtrage non-linéaire des niveaux de gris



CHAINE DE TRAITEMENT

- ◆ **Traitement**
 - Détection de l'enveloppe de l'os
 - Gommage des artefacts et des fluctuations du niveau de gris du fond
 - Filtre non linéaire de la famille des filtres "Steerable"
 - Seuillage hystéresis et analyse en composantes connexes (en simultané)
- ◆ Chaque étape doit être optimisée en temps et en espace

SEGMENTATION 1/4



1mm

SEGMENTATION 2/4

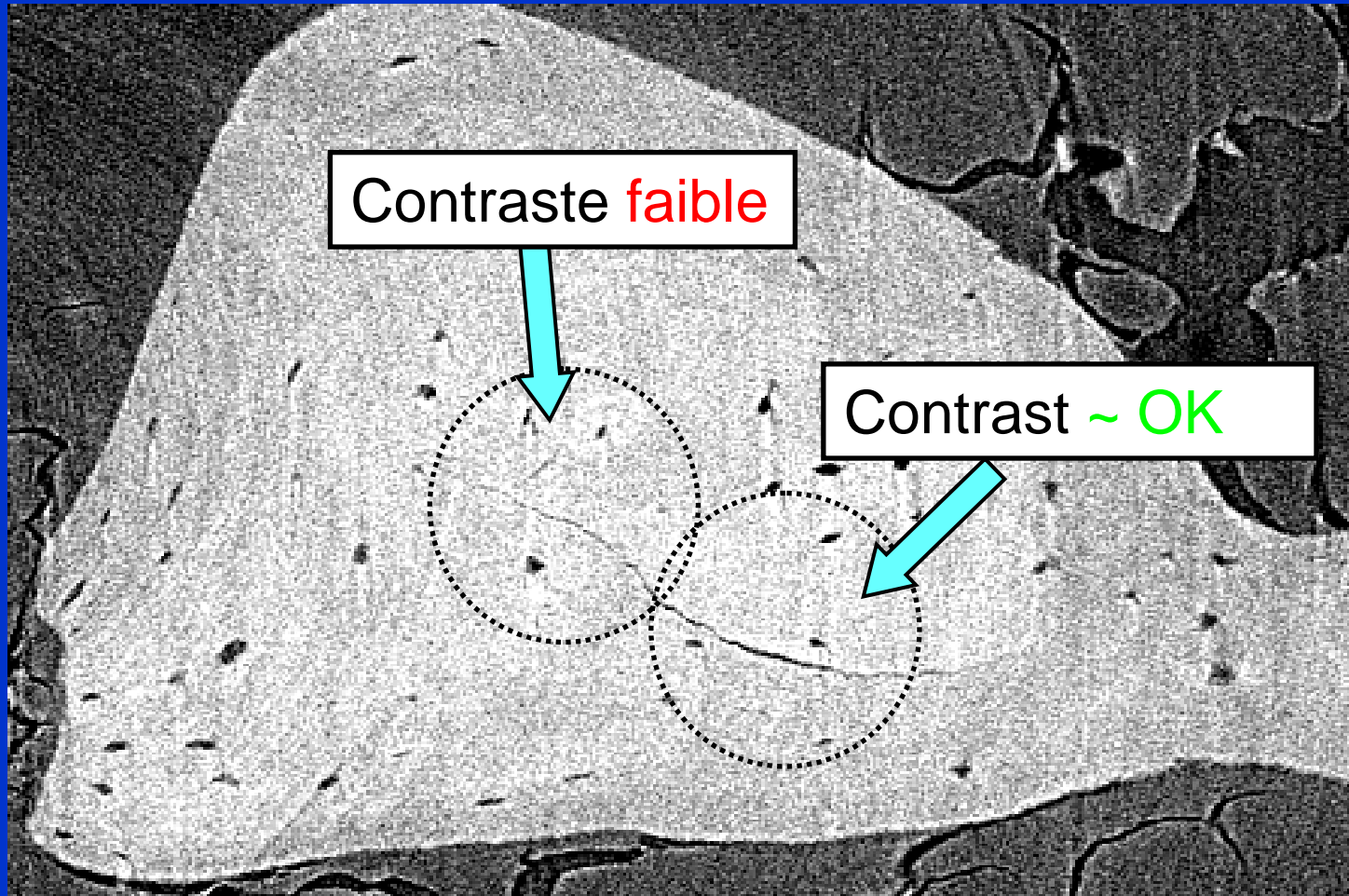


Image initiale

SEGMENTATION 3/4

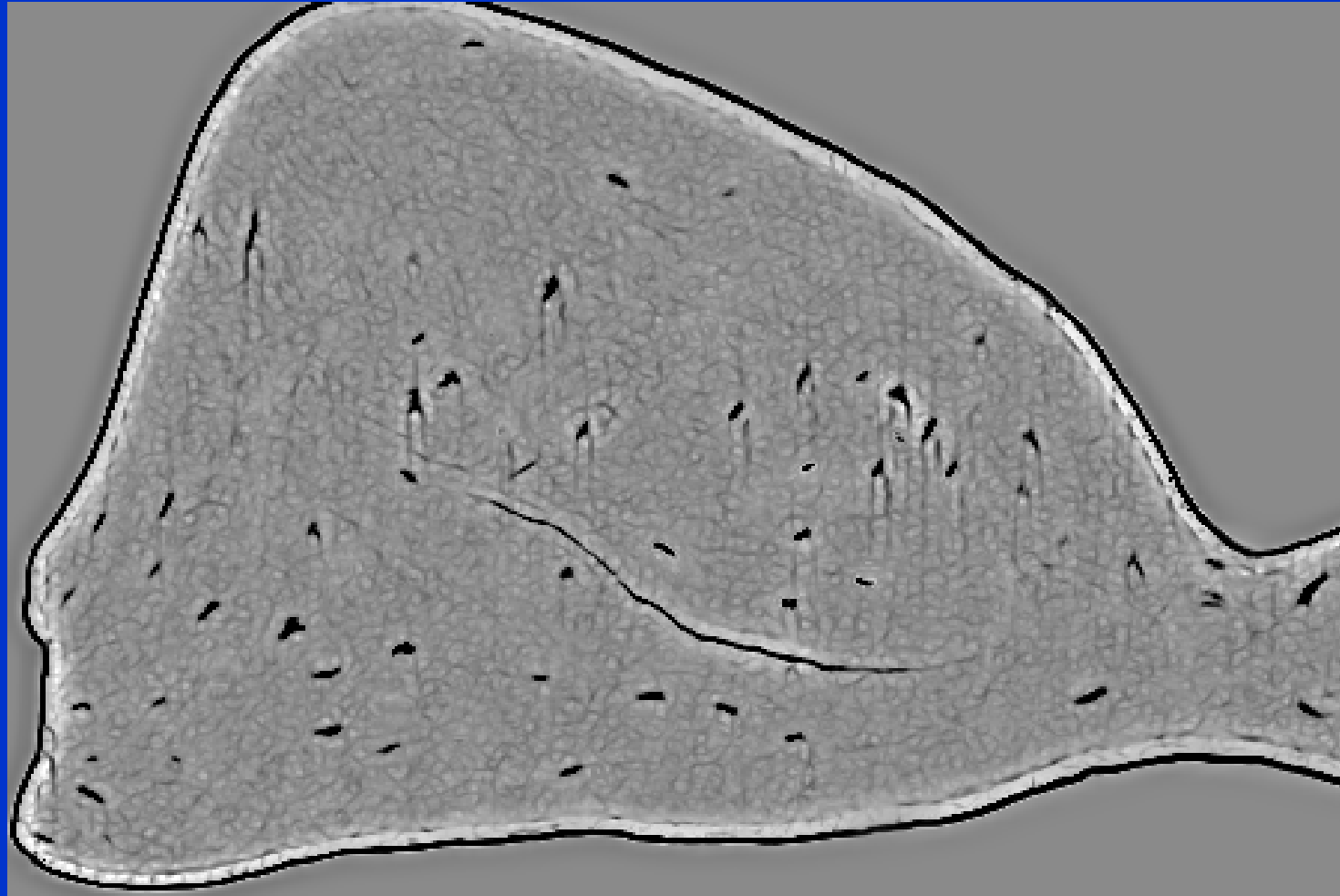


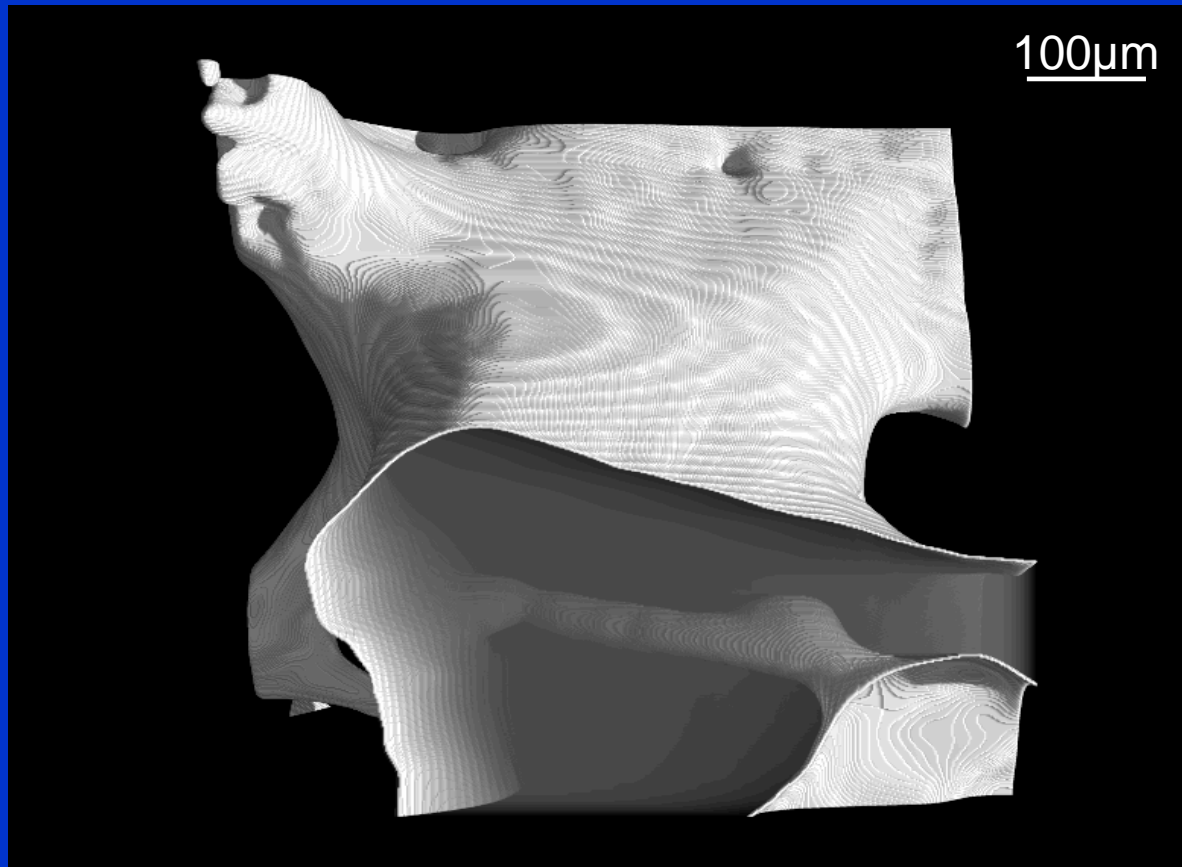
Image filtrée

SEGMENTATION 4/4



Image seuillée

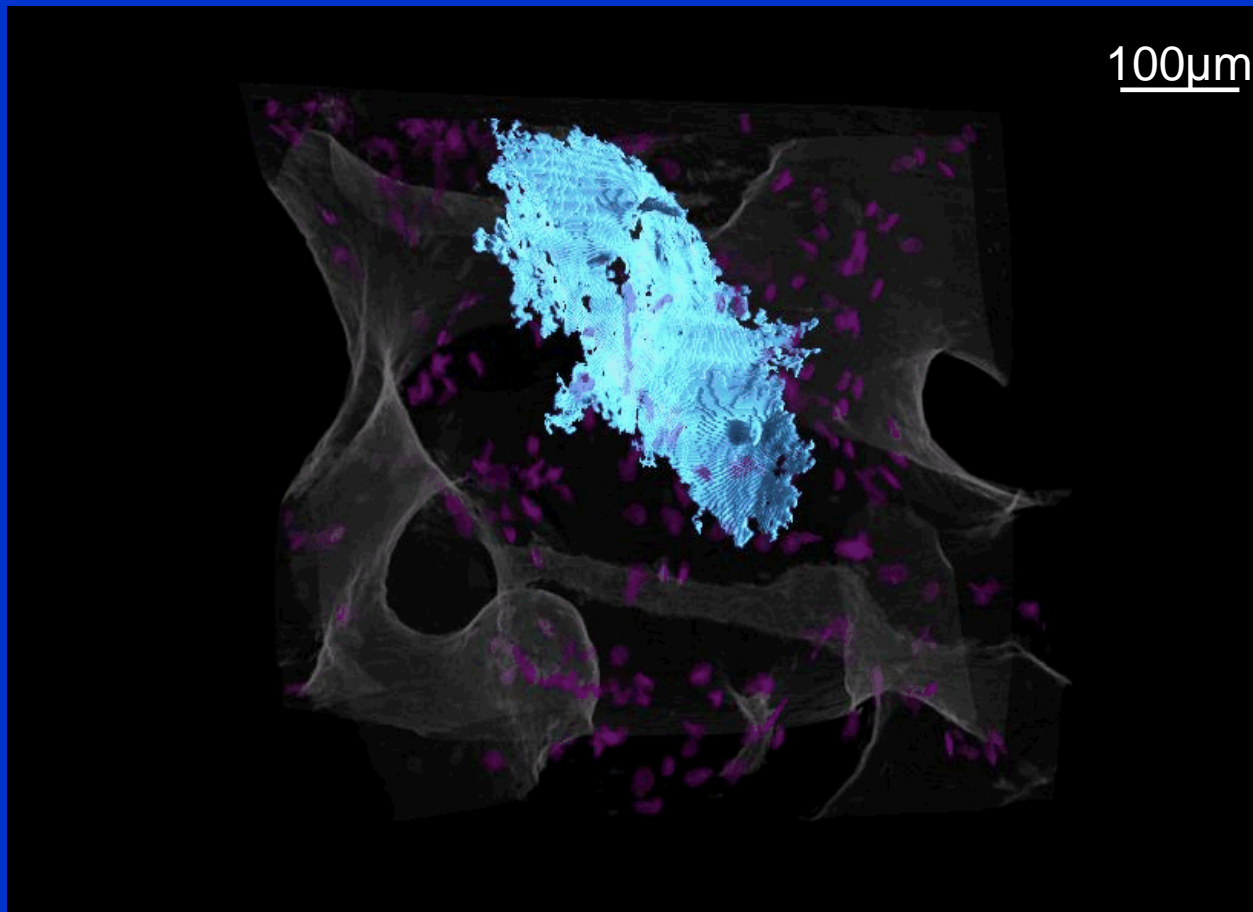
RESULTATS : VISUALISATION 3D



- ◆ 512x512x512 voxels
0.7x0.7x0.7 mm³
Fatigue 10Hz
- ◆ Structure complexe de l' os trabeculaire
- ◆ Pores traversant

Surface

RESULTATS : VISUALISATION 3D

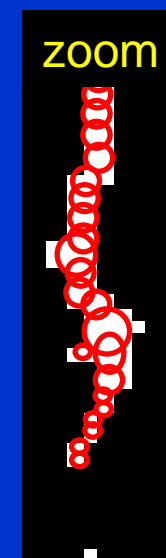
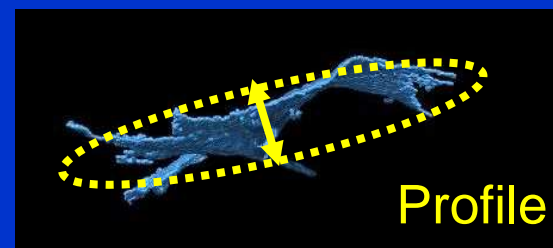
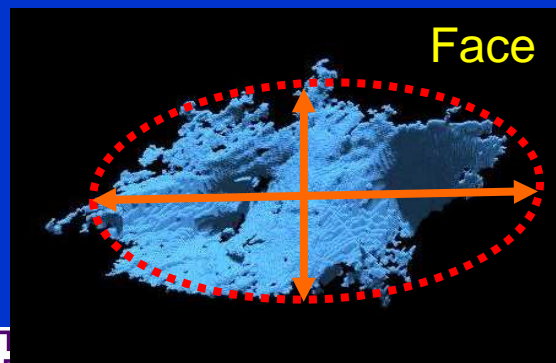
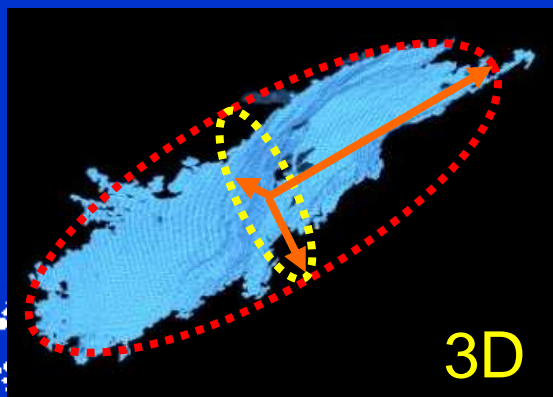


- ◆ Planaire MAIS distordu
⇒ localement planaire
- ◆ Parallèle a la surface
- ◆ Irrégularités,
Notamment au bord
- ◆ Très fins !

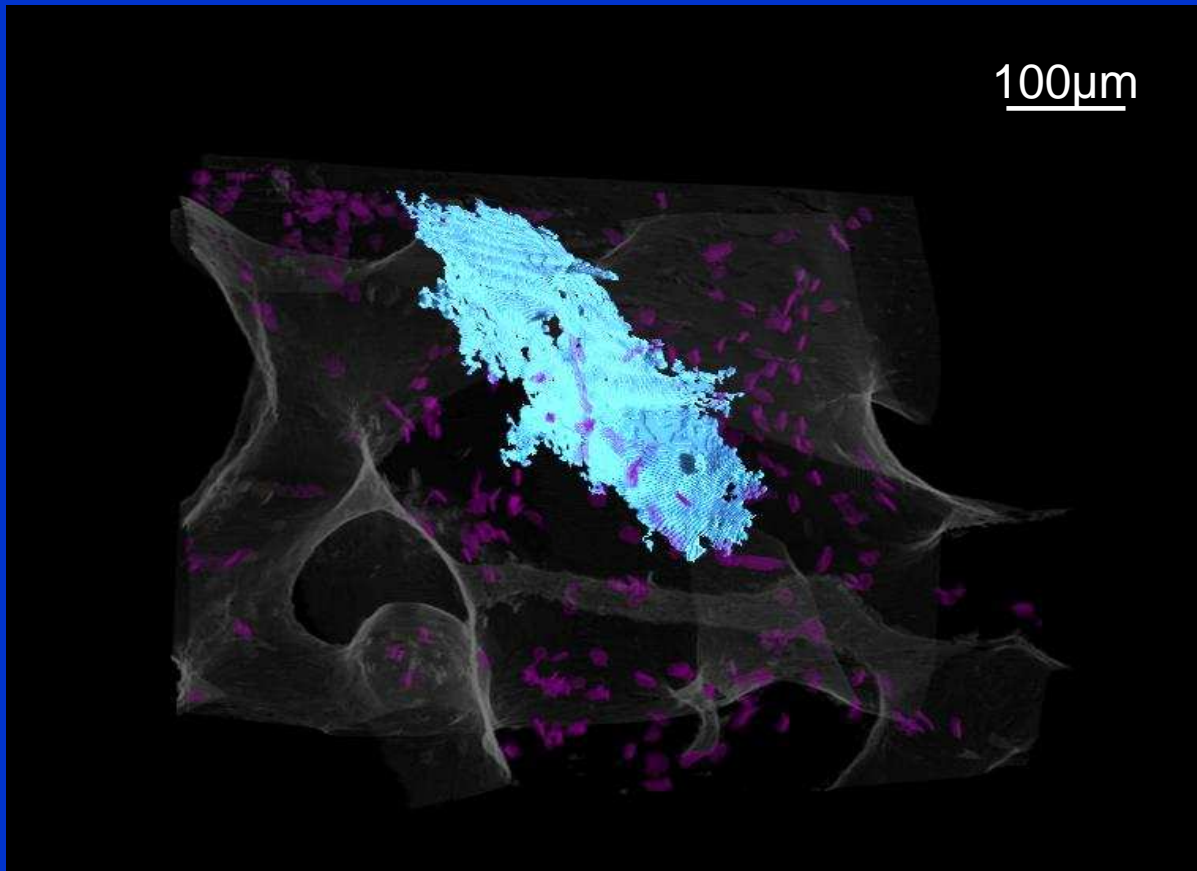
Bone, **Lacunae**, **Micro-crack**

EXTRACTION DE PARAMETRES QUANTITATIFS 1/2

- ◆ Paramètres directement accessibles:
 - Volume, nombre, position : densité N.Cr /TV, volume moyen Cr.V
- ◆ Dimension des cracks :
 - Orientation (absolue ou relative a la travee)
 - Longueur Cr.L, Largeur Cr.w, Epaisseur Cr.th
 - Méthode :
 - Ellipsoïde : Longueur, Largeur OK
 - Epaisseur : biais
 - Boules maximales : Epaisseur OK



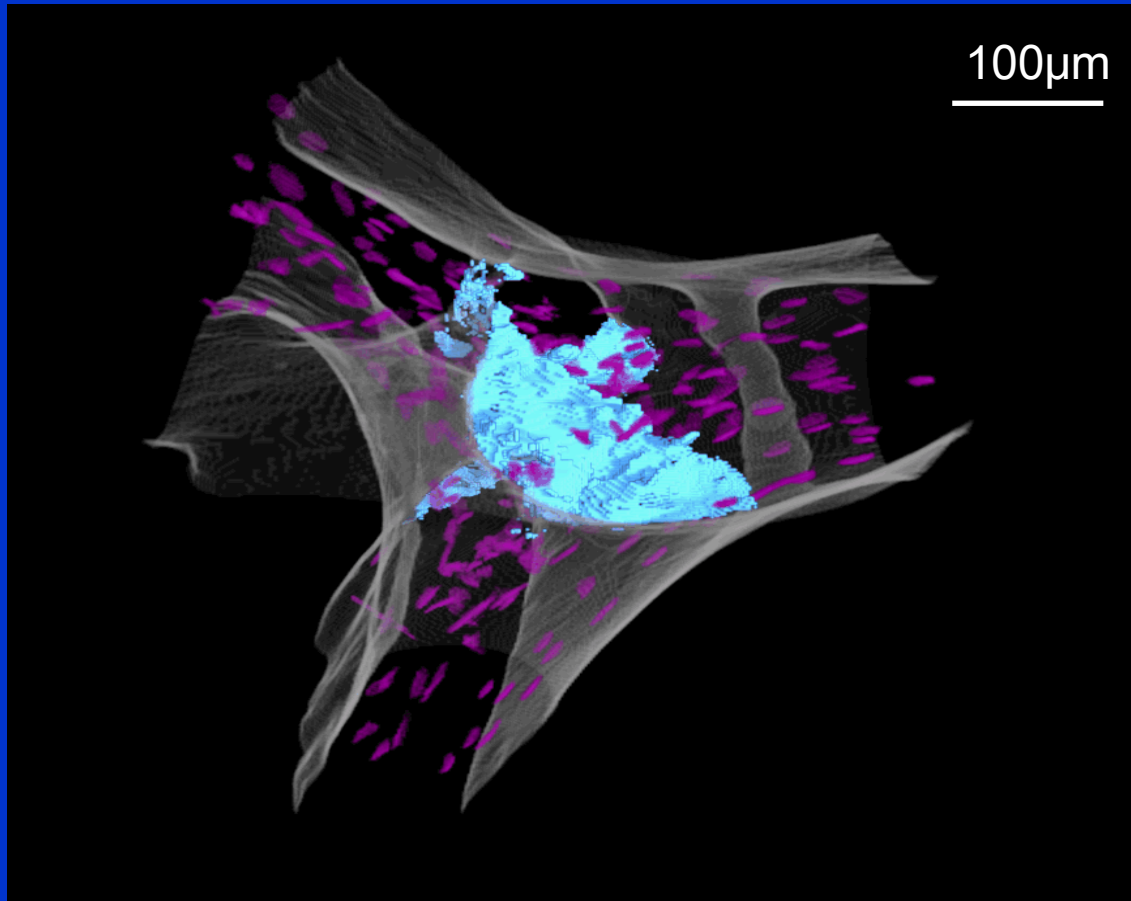
EXTRACTION DE PARAMETRES QUANTITATIFS 2/2



- ◆ Longueur: 481 μm
- ◆ Largeur: 268 μm
- ◆ Epaisseur: 4,26 μm
- ◆ Surface: 35 803 μm²
- ◆ Volume: 152714 μm³

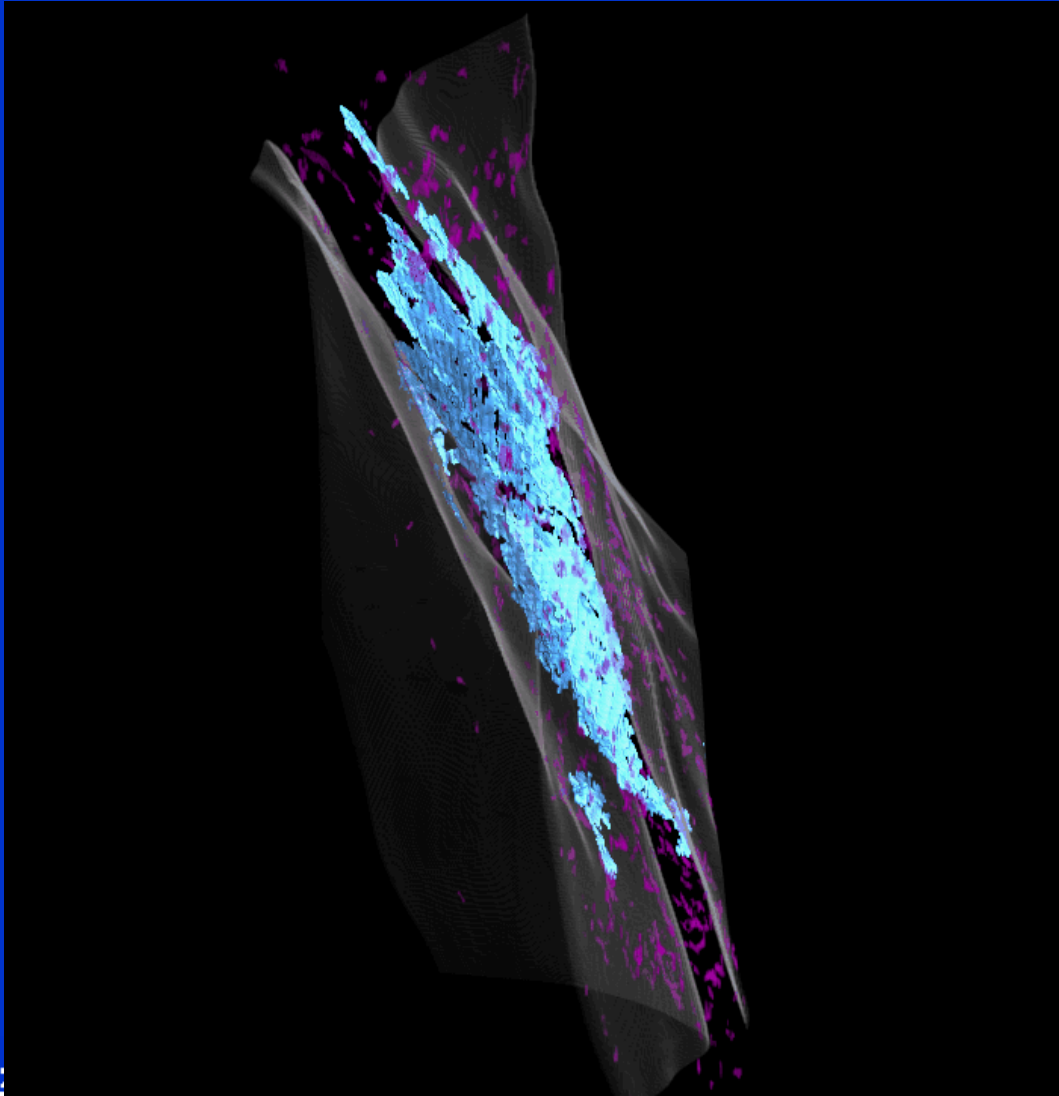
Observations 1/2

Lien avec la forme de la travée

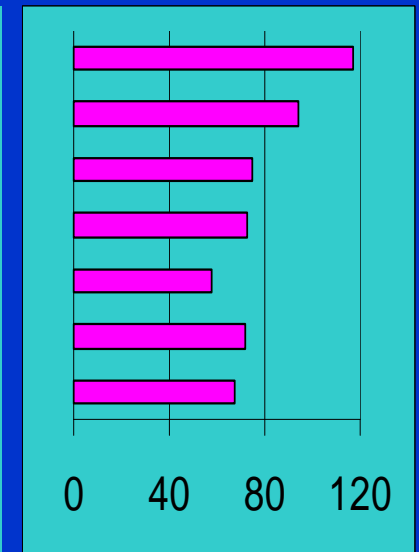
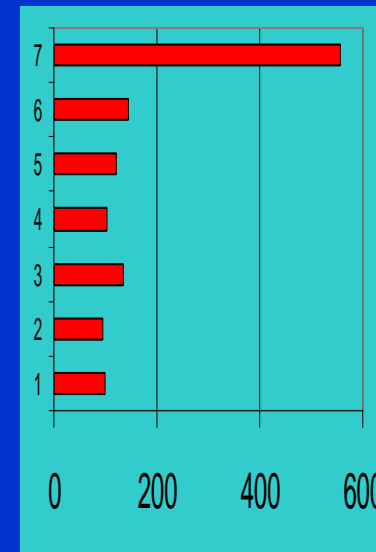


- ◆ Forte relation entre les formes des cracks et de la travée
- ◆ Longueur: 219 μm
- ◆ Largeur: 103 μm
- ◆ Epaisseur: 4,3 μm
- ◆ Surface: 8623 μm²
- ◆ Volume: 37650 μm³

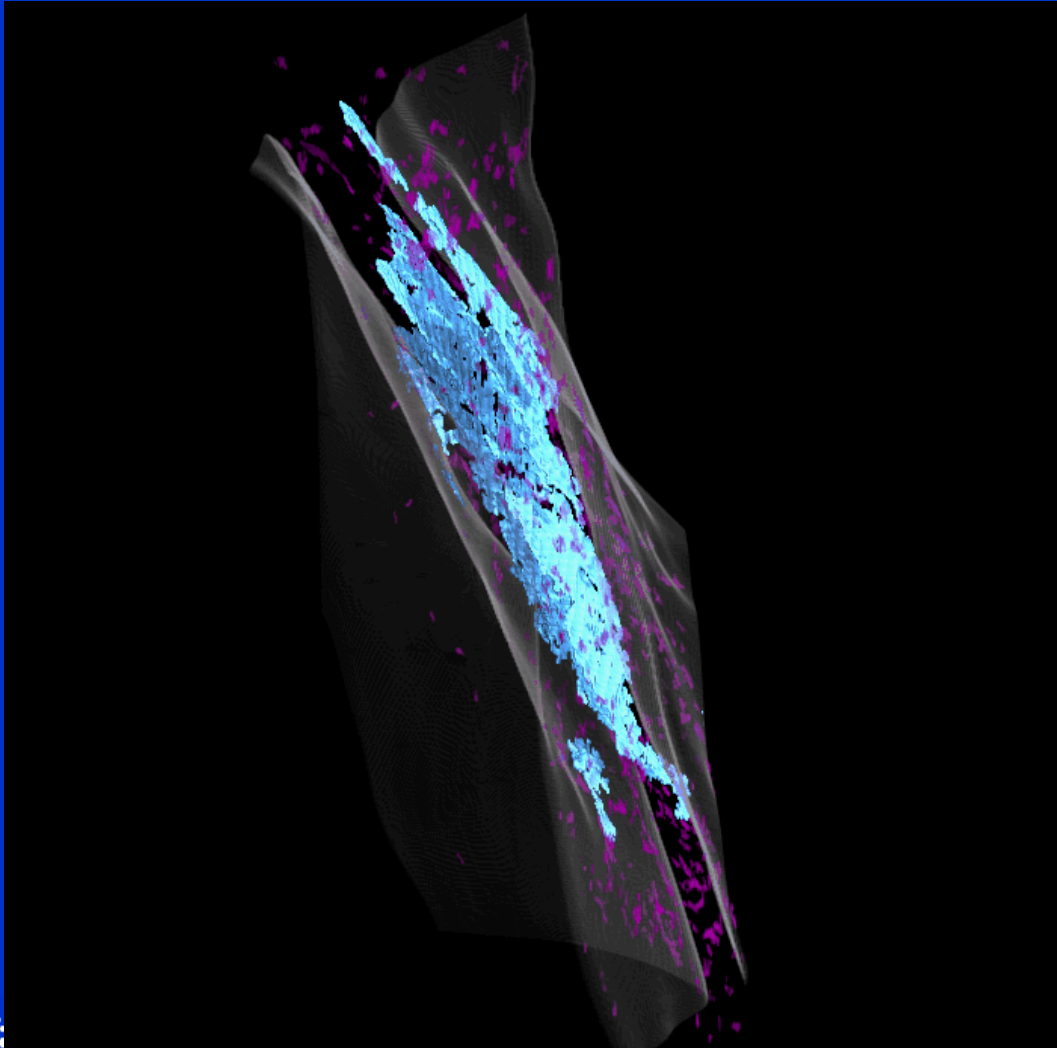
Observations 2/2 Cracks Paralleles



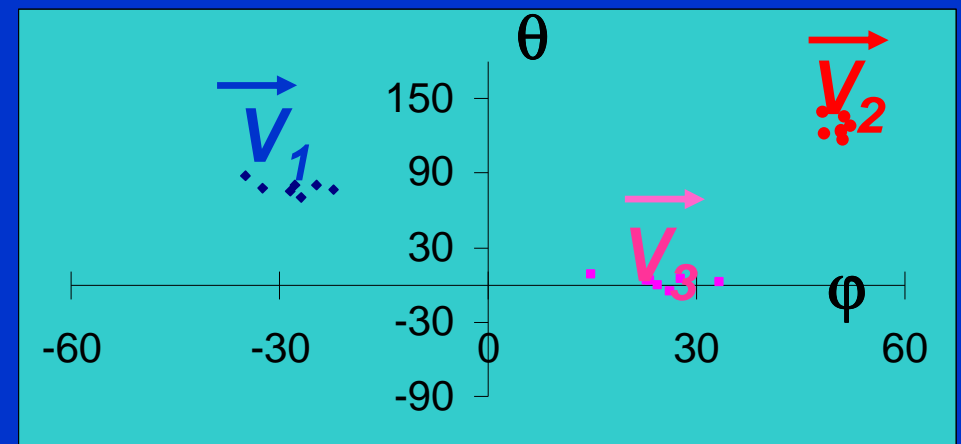
- ◆ Témoins
- ◆ 7 Cracks parallèles à la surface
- ◆ Longueur, largeur (μm)



Observations 2/2 Cracks Paralleles



- ◆ Témoins
- ◆ 7 Cracks parallèles à la surface
- ◆ Orientation: 3 axes/vecteurs par crack



CONCLUSION

- ◆ Développement d'un outil robuste et automatique de détection, segmentation et analyse des cracks
- ◆ Premiers résultats : segmentation différents types de micro-cracks en 3D avec une précision jamais atteinte
- ◆ Travail en cours
 - Mise en œuvre de la chaîne de traitement sur les données acquises (1 Tb) sur 3 groupes d'échantillons
 - Analyse des paramètres extraits
 - Validation des méthodes d'imagerie et d'analyse