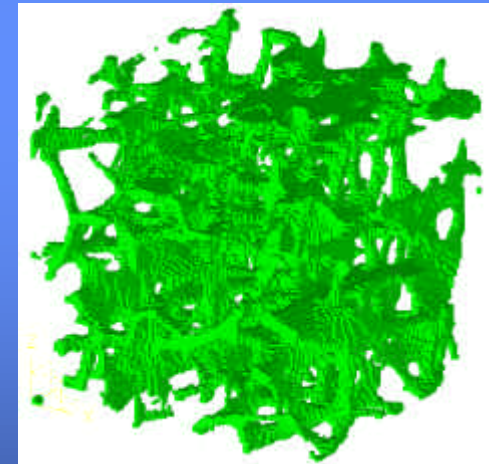


Caractérisation Biomécanique et Modélisation 3D par Imagerie X et IRM haute résolution de l'os spongieux humain : Evaluation du risque fracturaire

Hélène Follet



Directeur de Thèse : Pr C. Rumelhart

Contexte

Contexte des travaux

Quelques chiffres

Différents types d'os

Etudes Cliniques

Objectifs

Méthodologie

Matériels et Méthodes

Résultats

Discussion

Évaluation du risque
fracturaire

Conclusions et
perspectives

⇒ Ostéoporose = Problème de santé majeur dans les pays industrialisés

⇒ Ostéoporose : Perte de masse osseuse, quantifiée par la mesure de la densité minérale (ou BMD)

Viellissement de la population

- ➔ 50 % femmes + de 50 ans subiront une fracture
20 % hommes également concernés
- ➔ Fractures des vertèbres et des os périphériques
- ➔ 1.7 millions de fractures de la hanche en 1990
Prévision : 6.3 millions en 2020
- ➔ 7 milliards de francs /an (\approx 1 milliard d'euros/an)

Contexte

Contexte des travaux

Quelques chiffres

Différents types d'os

Etudes Cliniques

Objectifs

Méthodologie

Matériels et Méthodes

Résultats

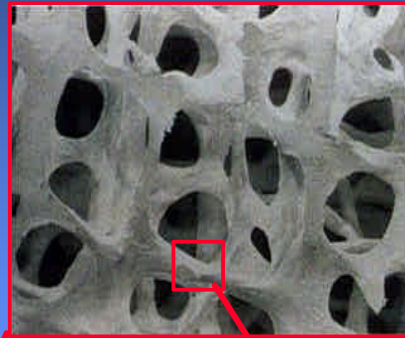
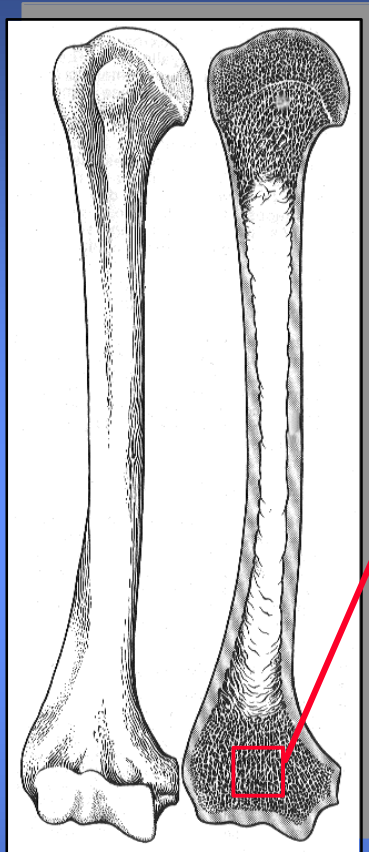
Discussion

Évaluation du risque

fracturaire

Conclusions et

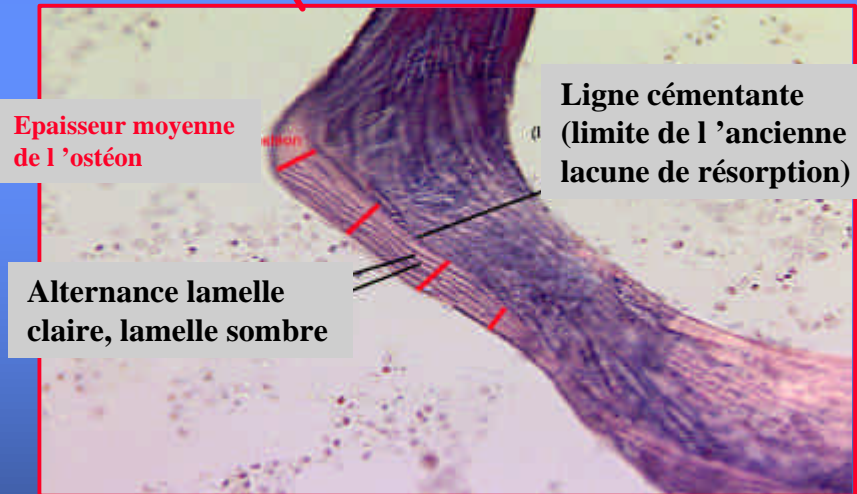
Perspectives



Os Normal



Os Ostéoporotique



⇒ BV/TV (%) : Volume Trabéculaire osseux (ou VTO)

Contexte

⇒ Quantification de l'ostéoporose (Clinique) :

Contexte des travaux

Quelques chiffres

Différents types d'os

Etudes Cliniques

Objectifs

Méthodologie

Matériels et Méthodes

Résultats

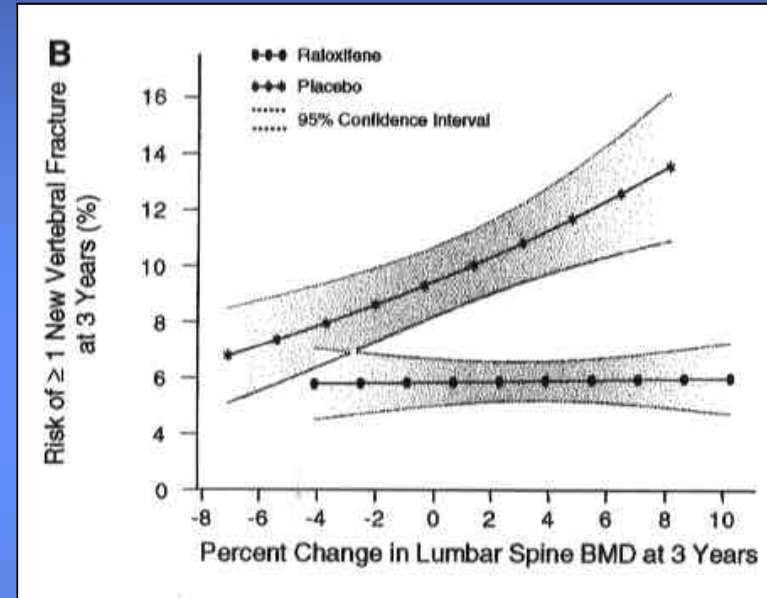
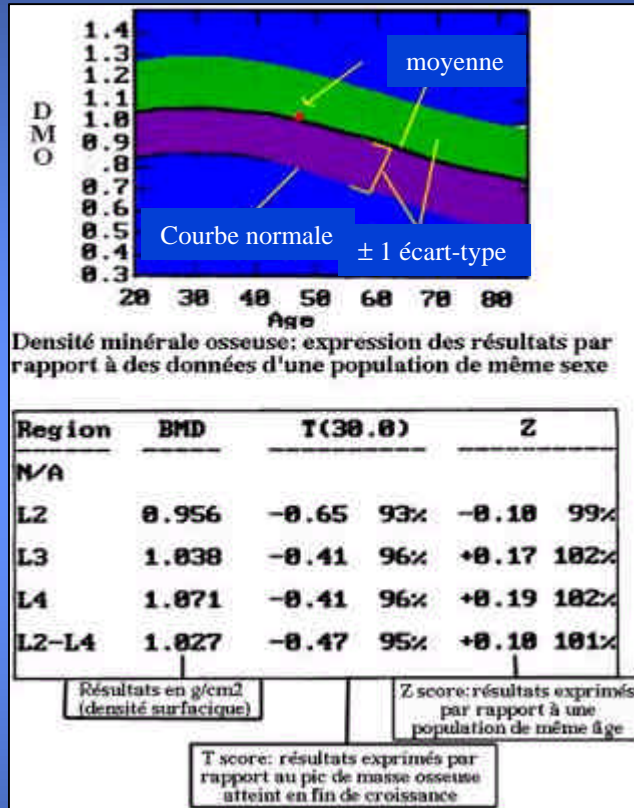
Discussion

Évaluation du risque

Facturaire

Conclusions et

Perspectives



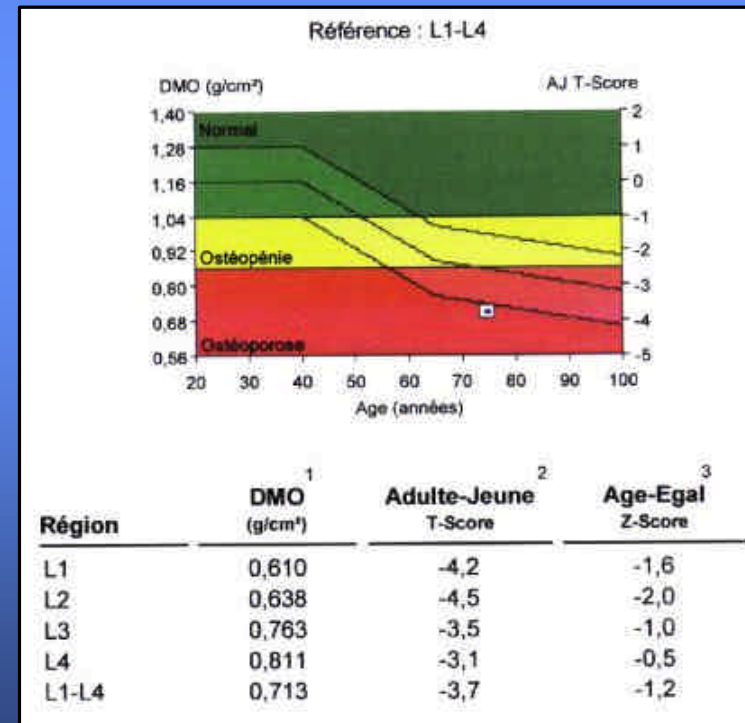
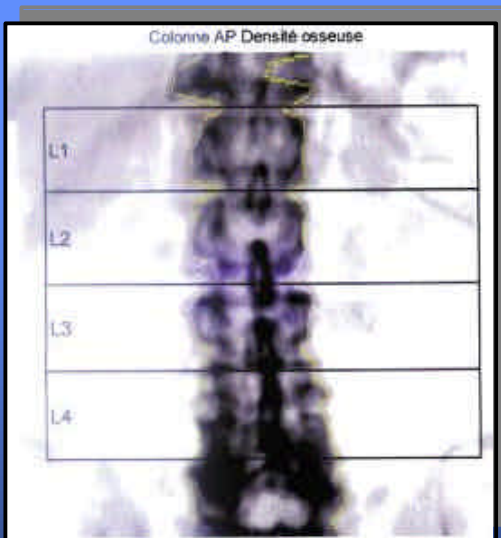
Sarkar et al. JBMR, Vol.17,n°1,2002

Ostéoporose :

BMD < 2.5 sd, (T-Score)

Contexte

⇒ L'ostéodensitométrie à rayons X ou DXA (Dual X-Ray Absorptiometry)
(Clinique)

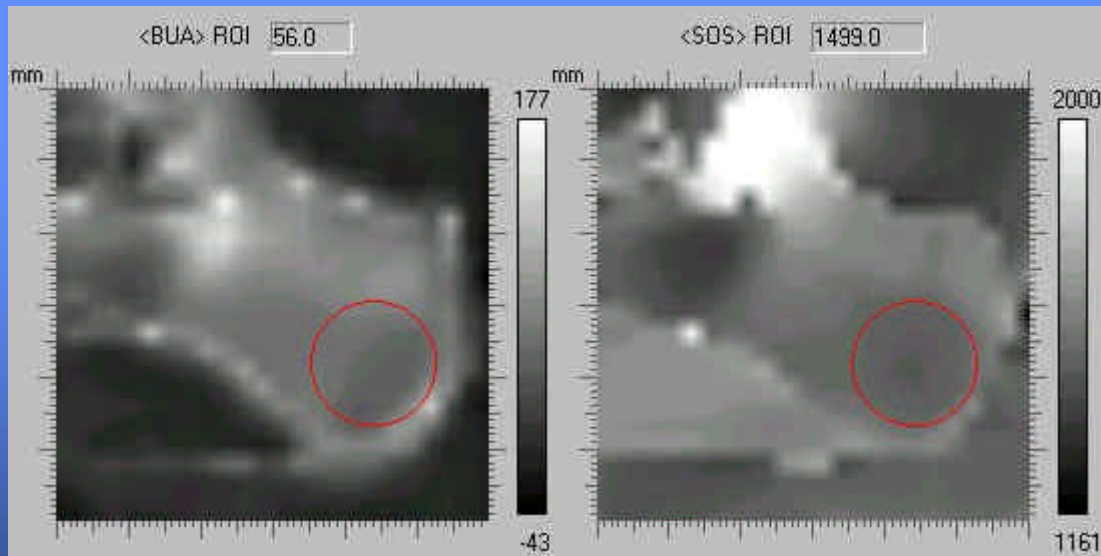


Contexte

⇒ L'ostéodensitométrie à ultrasons (US) (Clinique)



Imagerie Matricielle sur sujet *in vivo* en milieu sec:



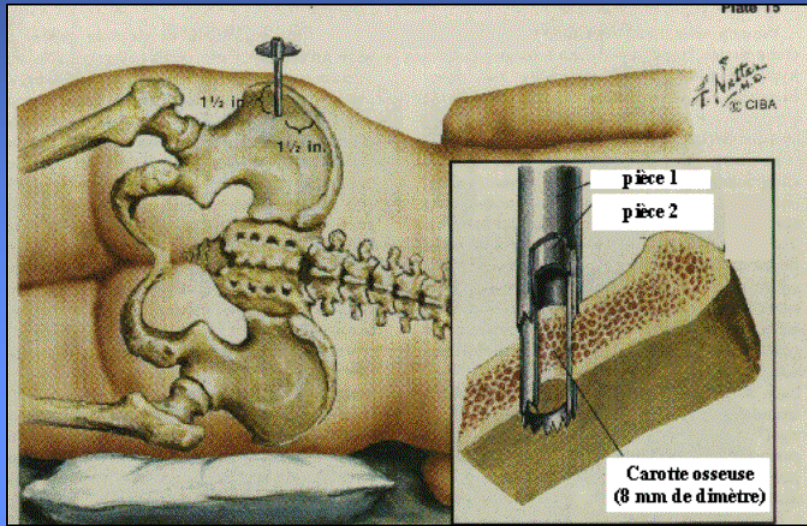
« Beam Scanner »

Atténuation BUA (dB/MHz)

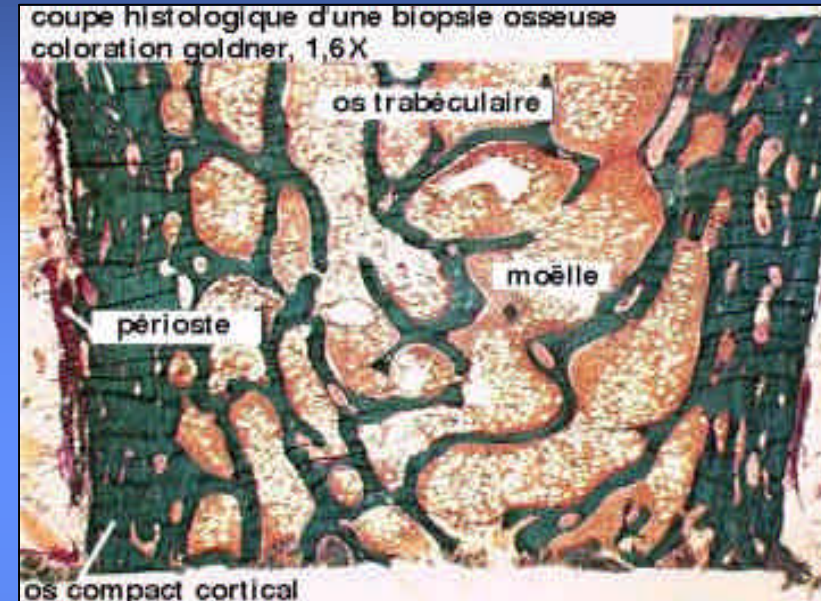
Vitesse SOS (m.s⁻¹)

Contexte

⇒ Biopsies osseuses transfixiantes de crête iliaque (indication prioritaire : troubles de minéralisation osseuse)



Biopsie osseuse



Coupe Histologique

Paramètres mesurés :

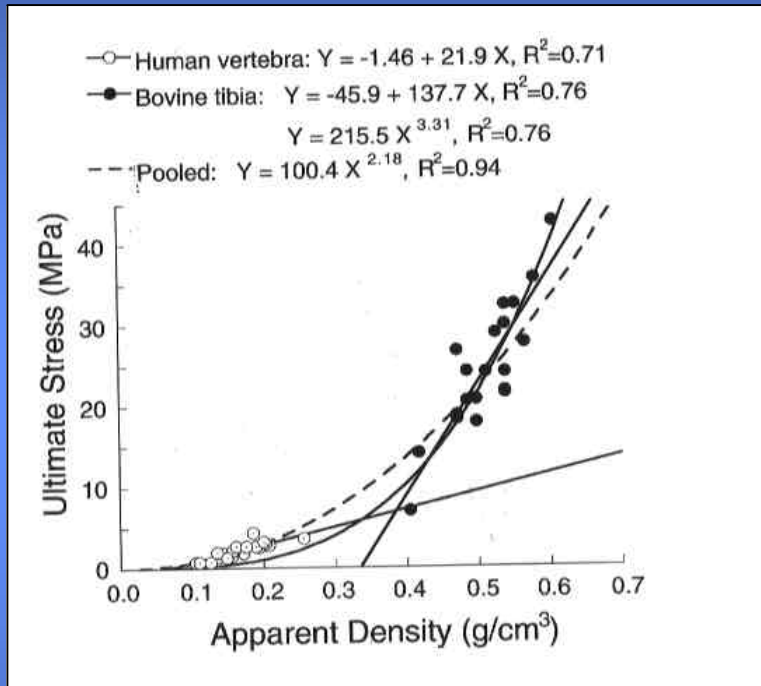
- Structure : BV/TV (%); Tb.N (mm^{-1}); Tb.Sp (μm); Tb.Th (μm)
- Résorption (Er/BS (%); OcS/BS (%); OcN/BS (mm^{-1}))
- Formation statique : OS/BS (%); Oth (μm) ; OV/BV (%)
- Formation dynamique : MAR; BFR/BS; Ac.f (yr^{-1})

Dr Mh Lafage Proust.

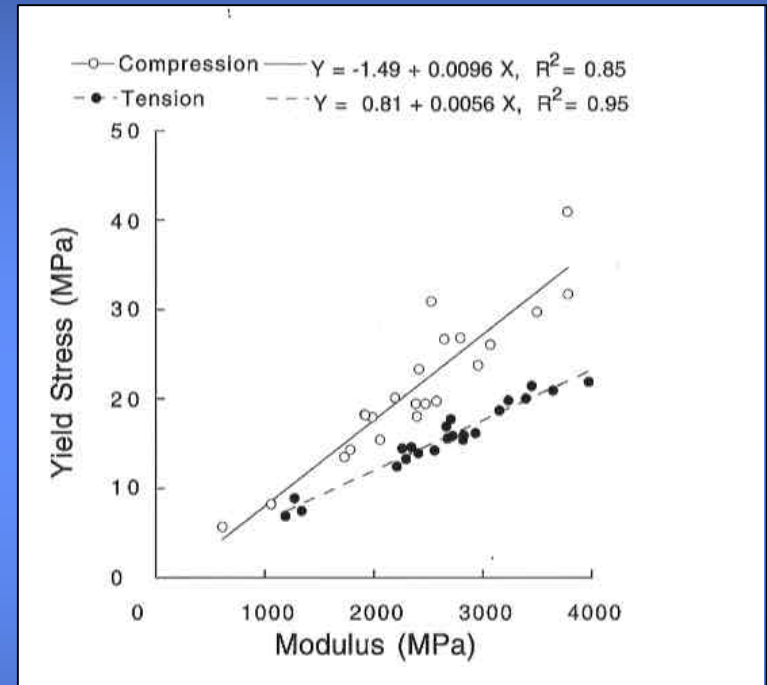
St Etienne

Contexte

⇒ Corrélations classiques entre la contrainte et la densité apparente (corrélée au BMD) ou entre contrainte et module d'élasticité global



Kopperdahl et al. 1998



Keaveny et al. 1994

⇒ **QUESTION** : Comment affiner ces résultats et améliorer la prédiction du risque fracturaire ?

Objectifs

Utilisation Imagerie X et IRM

Contexte des travaux

Objectifs

Imagerie

Mécanique

Relations

MEF

Prédiction

Méthodologie

Matériels et Méthodes

Résultats

Discussion

Évaluation du risque

fracturaire

Conclusions et

perspectives

- ⇒ Acquisition la + fidèle possible de l'architecture de l'os spongieux de calcaneums humains
- ⇒ Caractérisation mécanique de l'os spongieux et des travées sur échantillons
- ⇒ Relations : Mécanique - Paramètres Structuraux & Architecturaux (2D-3D)
- ⇒ Méthode des Eléments Finis (MEF) et Simulation Numérique → Propriétés Mécaniques du tissu trabéculaire
- ⇒ Méthode d'évaluation du risque fracturaire

Objectifs

Utilisation Imagerie X et IRM

Contexte des travaux

Objectifs

- Imagerie
- Mécanique
- Relations
- MEF
- Prédiction

Méthodologie

Matériels et Méthodes

Résultats

Discussion

Évaluation du risque fracturaire

Conclusions et perspectives

- ⇒ Acquisition la + fidèle possible de l'architecture de l'os spongieux de calcaneums humains
- ⇒ Caractérisation mécanique de l'os spongieux et des travées sur échantillons
- ⇒ Relations : Mécanique - Paramètres Structuraux & Architecturaux (2D-3D)
- ⇒ Méthode des Eléments Finis (MEF) et Simulation Numérique → Propriétés Mécaniques du tissu trabéculaire
- ⇒ Méthode d'évaluation du risque fracturaire

Objectifs

Utilisation Imagerie X et IRM

Contexte des travaux

Objectifs

Imagerie

Mécanique

Relations

MEF

Prédiction

Méthodologie

Matériels et Méthodes

Résultats

Discussion

Évaluation du risque

fracturaire

Conclusions et

perspectives

- ⇒ Acquisition la + fidèle possible de l'architecture de l'os spongieux de calcaneums humains
- ⇒ Caractérisation mécanique de l'os spongieux et des travées sur échantillons
- ⇒ Relations : Mécanique - Paramètres Structuraux & Architecturaux (2D-3D)
- ⇒ Méthode des Eléments Finis (MEF) et Simulation Numérique → Propriétés Mécaniques du tissu trabéculaire
- ⇒ Méthode d'évaluation du risque fracturaire

Objectifs

Utilisation Imagerie X et IRM

Contexte des travaux

Objectifs

Imagerie

Mécanique

Relations

MEF

Prédiction

Méthodologie

Matériels et Méthodes

Résultats

Discussion

Évaluation du risque

fracturaire

Conclusions et

perspectives

- ⇒ Acquisition la + fidèle possible de l'architecture de l'os spongieux de calcaneums humains
- ⇒ Caractérisation mécanique de l'os spongieux et des travées sur échantillons
- ⇒ Relations : Mécanique - Paramètres Structuraux & Architecturaux (2D-3D)
- ⇒ Méthode des Eléments Finis (MEF) et Simulation Numérique → Propriétés Mécaniques du tissu trabéculaire
- ⇒ Méthode d'évaluation du risque fracturaire

Objectifs

Utilisation Imagerie X et IRM

Contexte des travaux

Objectifs

Imagerie

Mécanique

Relations

MEF

Prédiction

Méthodologie

Matériels et Méthodes

Résultats

Discussion

Évaluation du risque

fracturaire

Conclusions et

perspectives

- ⇒ Acquisition la + fidèle possible de l'architecture de l'os spongieux de calcaneums humains
- ⇒ Caractérisation mécanique de l'os spongieux et des travées sur échantillons
- ⇒ Relations : Mécanique - Paramètres Structuraux & Architecturaux (2D-3D)
- ⇒ Méthode des Eléments Finis (MEF) et Simulation Numérique → Propriétés Mécaniques du tissu trabéculaire
- ⇒ Méthode d'évaluation du risque fracturaire

Tableau Synoptique

Laboratoire de Mécanique des Solides (LMSO), INSA de Lyon,

Laboratoire de Biodynamique Osseuse, (Pr P.J. Meunier),

Service de rhumatologie et de pathologie osseuse (Pavillon) (Pr P.J. Meunier & P.D. Delmas)

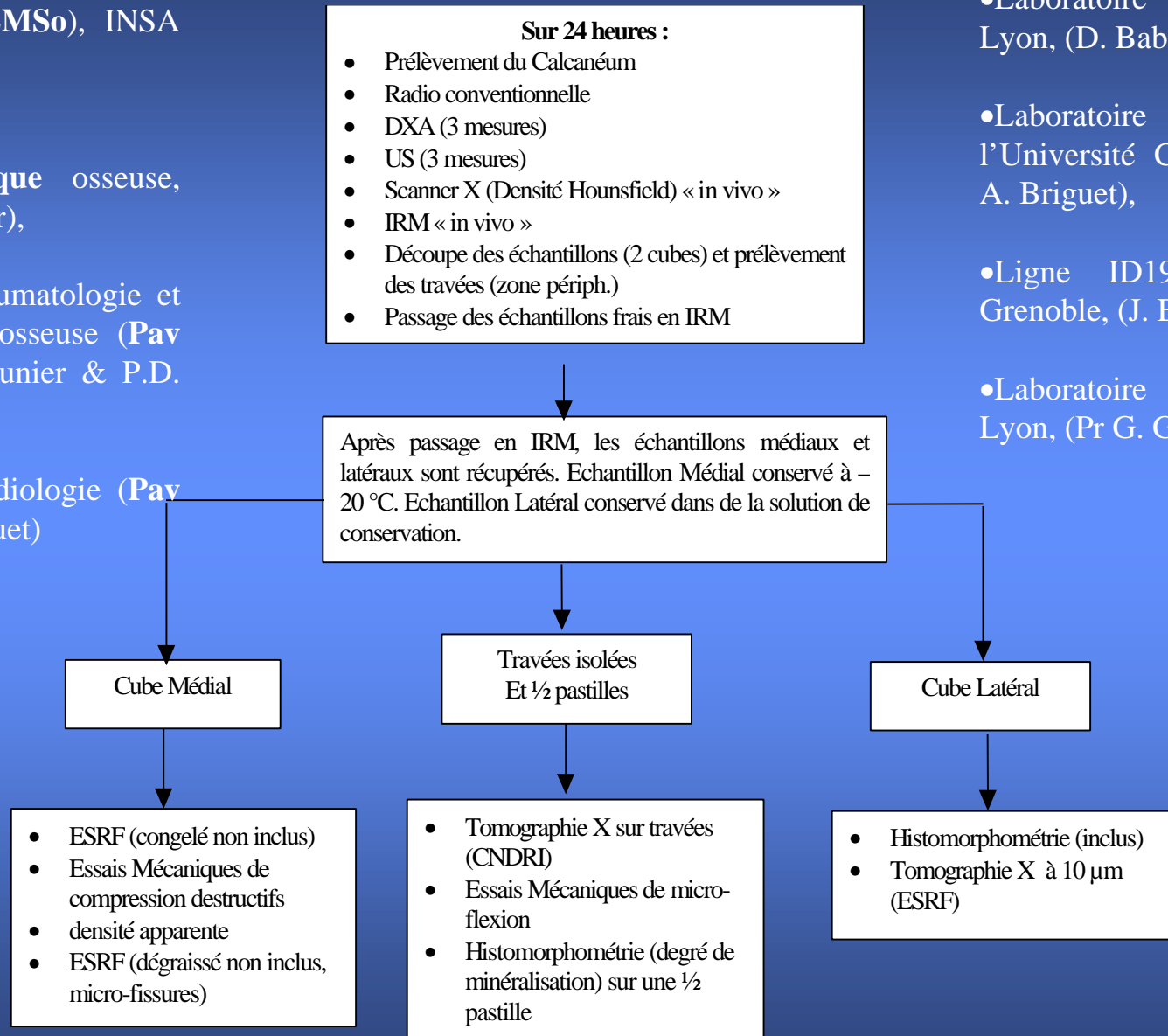
Service de radiologie (Pavillon) (Pr P.L. Clouet)

•Laboratoire CNDRI, INSA de Lyon, (D. Babot).

•Laboratoire de RMN à l'Université Claude Bernard, (Pr A. Briguet),

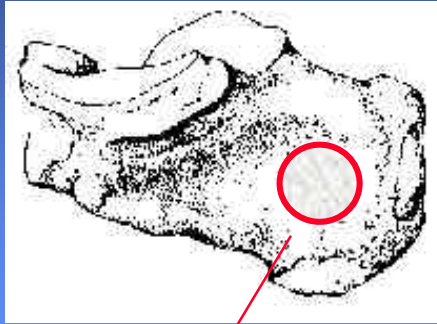
•Ligne ID19 à l'ESRF Grenoble, (J. Baruchel),

•Laboratoire CREATIS, INSA de Lyon, (Pr G. Gimenez)



3 Niveaux d'étude sur Calcaneum

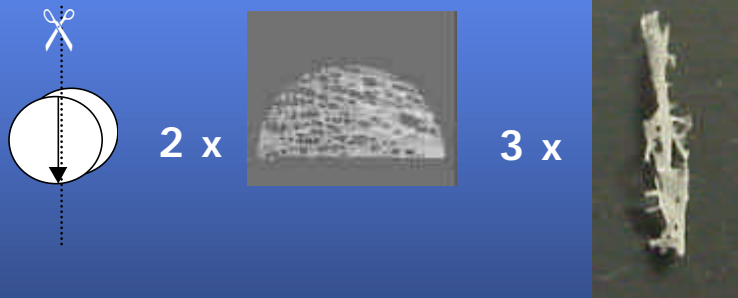
1



2



3



⇒ Calcaneum entier :

- ✓ Radio standard,
- ✓ DXA,
- ✓ US,
- ✓ Scan X ,
- ✓ IRM

Hôpital
Edouard Herri

⇒ Echantillons cubiques :

- ✓ IRM (Lyon 1) (78 μm)
- ✓ Tomographie μCT (ESRF) (10 μm)
- ✓ Essais Mécanique (LMSo, INSA) + ME
- ✓ Mesures densité physique

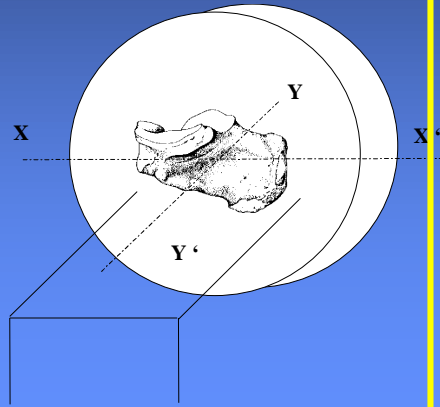
⇒ 1/2 pastilles + Travées :

- ✓ Tomographie(CNDRI , INSA), (20 μm)
- ✓ Essais Mécanique (LMSo, INSA) + ME
- ✓ Microradiographie
(Hôp. E. Herriot)

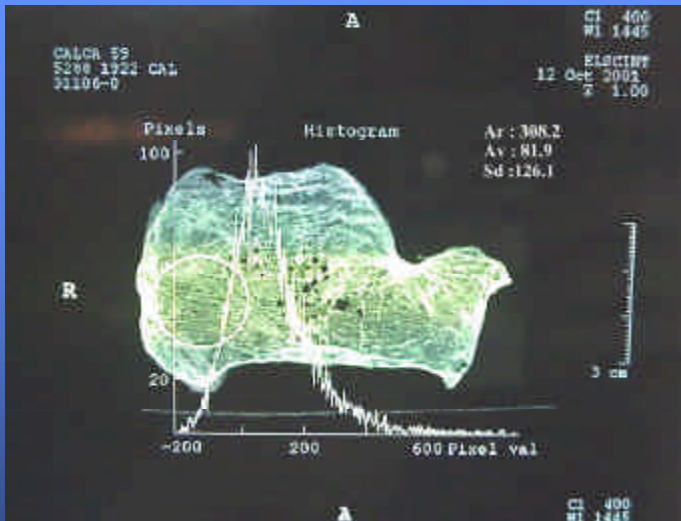
Sur calcaneum entier

Hôpital Edouard Herriot

⇒ Scanner X

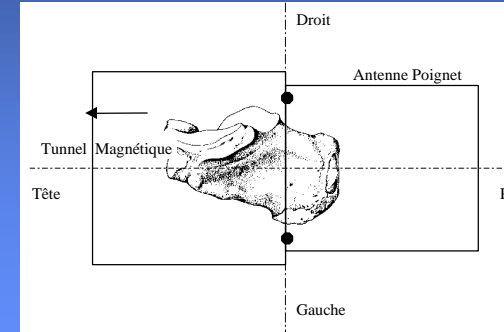


Densité Hounsfield HU

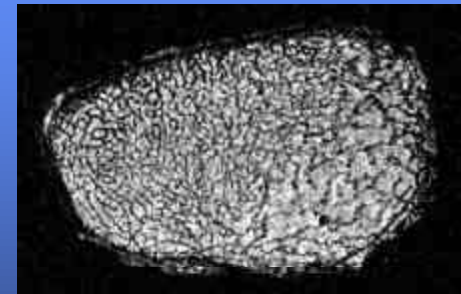


Avec P.L. Clouet

⇒ IRM Médical



Paramètres de type Histomorphométriques (TbTh, TbN, TbSp)



Avec O. Beuf

Sur calcaneum entier

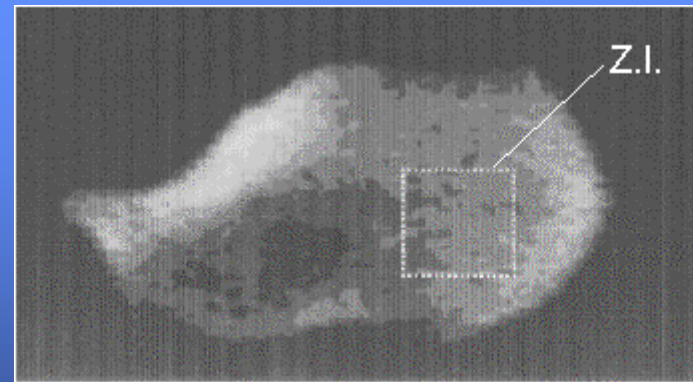
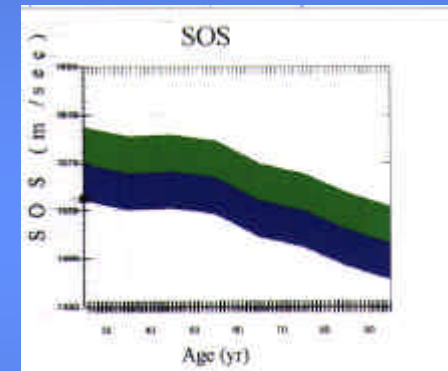
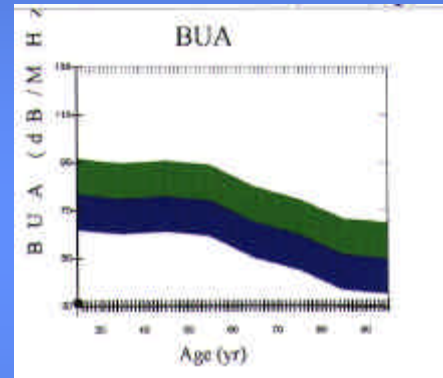
Hôpital Edouard Herriot

Densité

⇒ DXA

Région	Surface	BMC	BMD
	cm ²	grammes	g/cm ²
L1	3.16	1.72	0.544

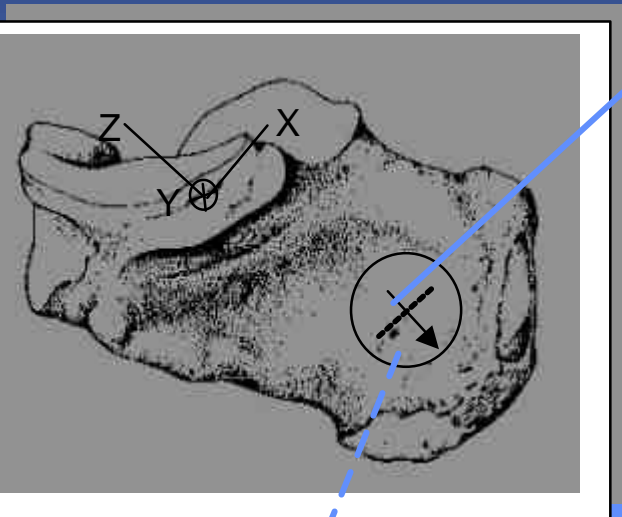
⇒ Ultrasons



Avec F. Duboeuf

Avec F. Duboeuf

Sur échantillons cubiques

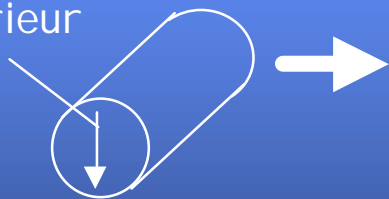


Direction du réseau supérieur des travées

- ✓ IRM (résolution 78 μm)
- ✓ Tomographie (résolution 10 μm)
- ✓ Mesure de densités physiques
- ✓ Modélisation par éléments finis

Direction du réseau inférieur des travées

Repérage du réseau supérieur des travées (radio X)



LATERAL



- ✓ Analyse histomorphométrique (BV/TV, TbN, TbTh, TbSp)

MEDIAL



- ✓ Compression (E_{app} , σ_{app})
- ✓ Modélisation MEF

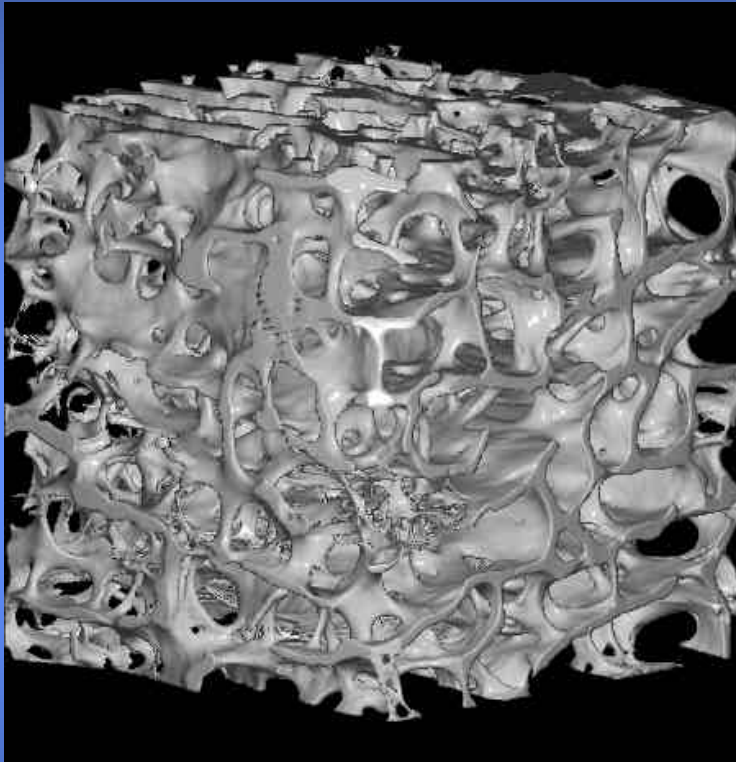
INTER MEDIAL-LATERAL



- ✓ Découpe des travées
- ✓ Micro-radiographie

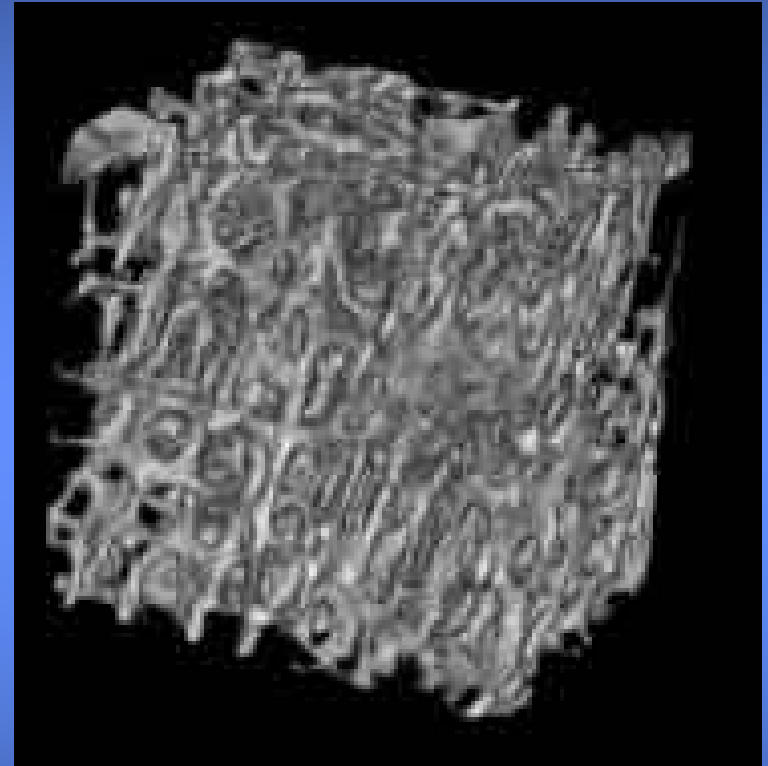
Tomographie 10 μ m - IRM 78 μ m

Tomographie à 10 μ m



*Calcaneum, Homme, 73 ans
obtenue à l'ESRF*

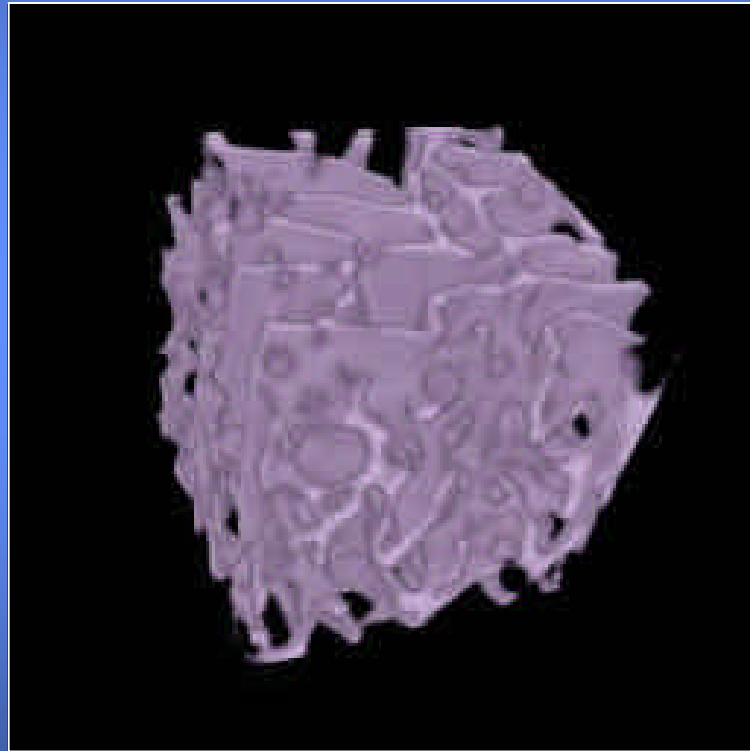
IRM à 78 μ m



*Calcaneum, Femme, 85 ans
obtenue au labo de RMN à Lyon 1*

Tomographie

⇒ Illustration d'un échantillon cubique Tomographié



Tomographie 10 μ m - IRM 78 μ m

⇒ Paramètres Architecturaux :

- ✓ BV/TV (%)
- ✓ TbTh (mm), TbN (mm⁻¹), TbSp (μ m)

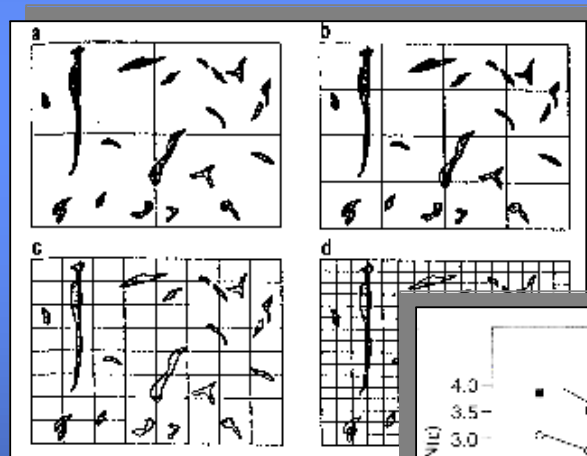


⇒ Paramètre d'Anisotropie :

- ✓ MIL (mm)

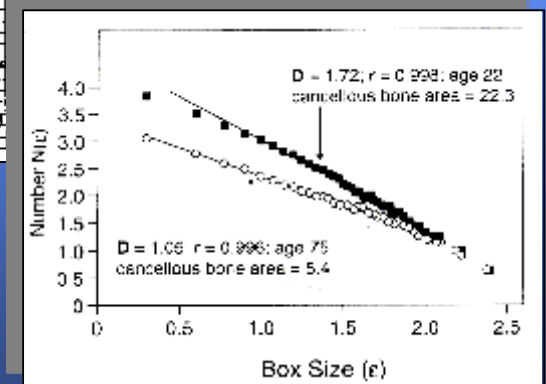
⇒ Paramètre de Connectivité :

- ✓ Nb d'Euler



⇒ Paramètre d'irrégularité

- ✓ Dimension Fractale D



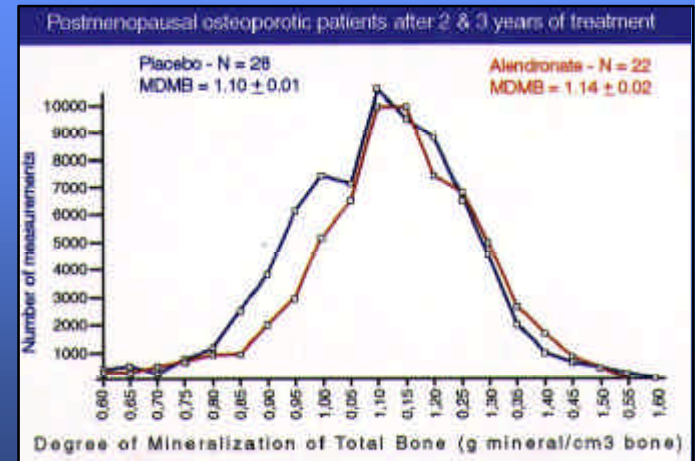
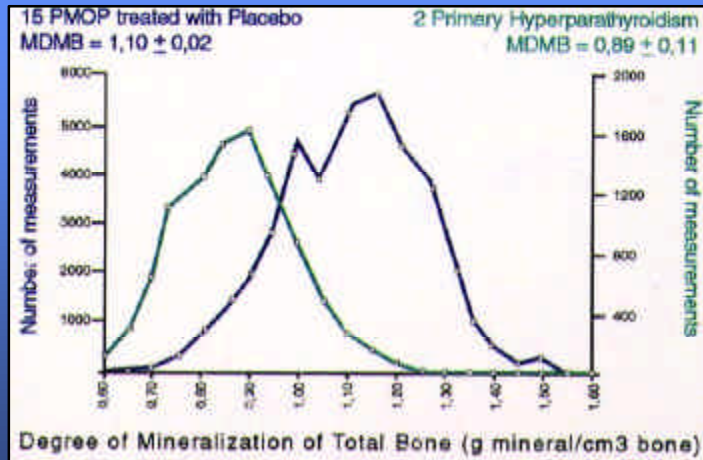
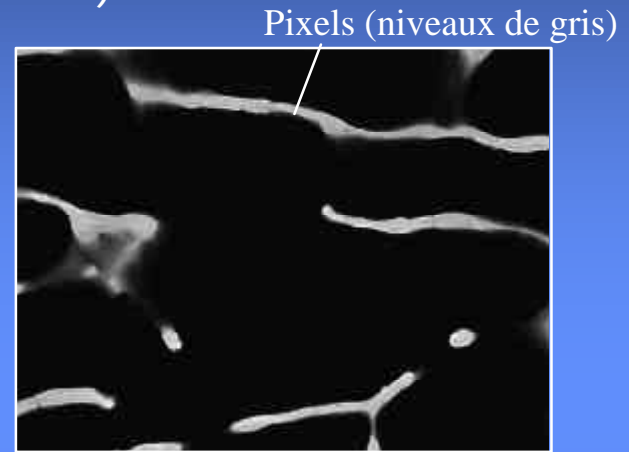
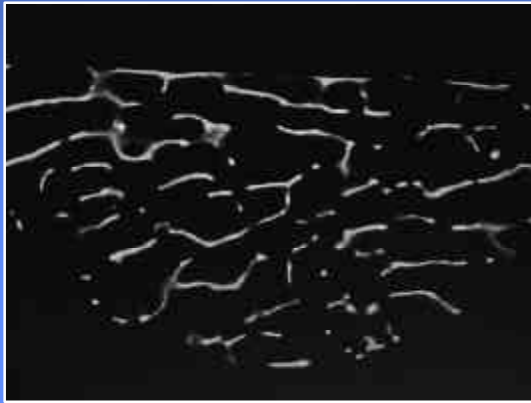
Microradiographie sur demi-pastille

Image

⇒ Mesure du degré moyen de minéralisation

Avec G. Boiv

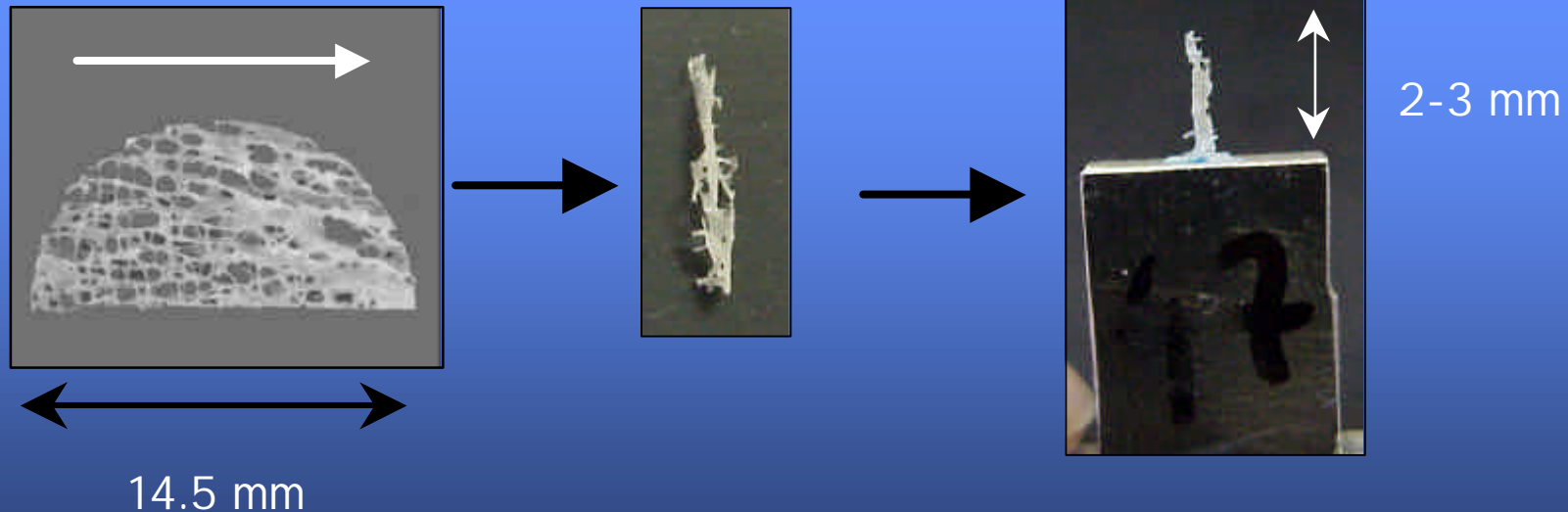
✓ d (gramme minéral/cm³) (Nb d 'observation)



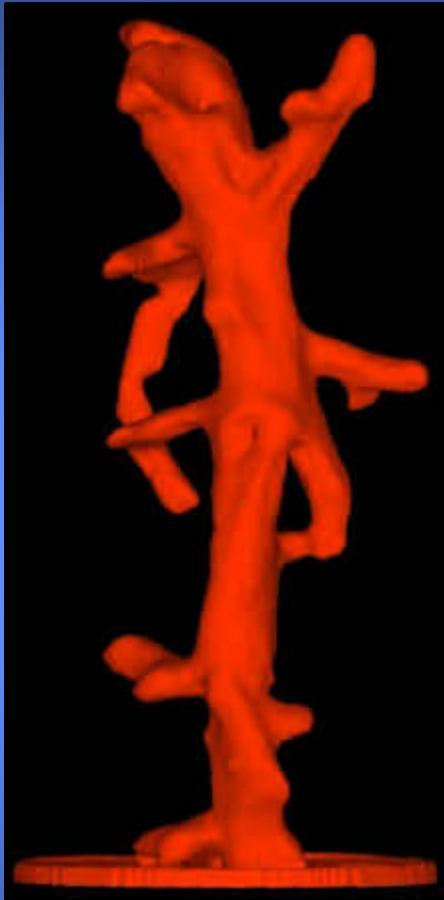
Sur travées

⇒ Découpe et repérage de travées de calcanéum (travées humides)

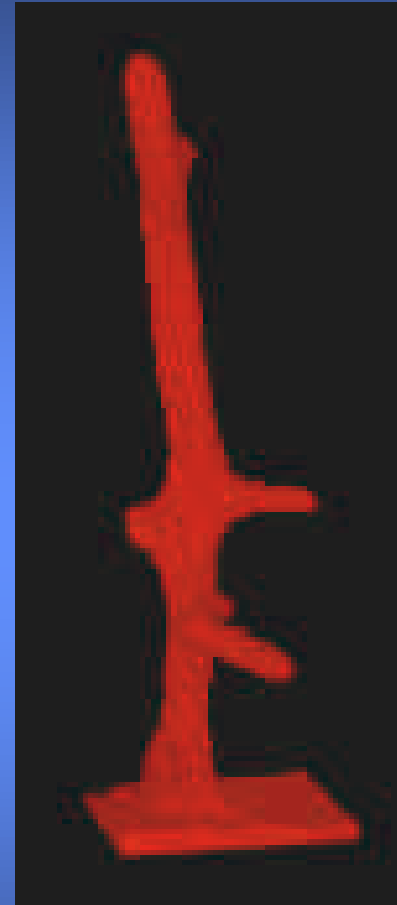
- ✓ Respect de l'intégrité de la structure
- ✓ Encastrement de la travée sur le porte-échantillon par colle cyanoacrylate pour tomographie CNDRI et microflexion
- ✓ MEF



Images tomographiques de travées



3 mm



Travées osseuses obtenues au CNDRI (20 μ m)

Avec G. Peix

Essai de compression

⇒ Conditions d'essais

- ✓ Air à température ambiante ou sérum physiologique à 37 °C
- ✓ Echantillons cubiques
- ✓ Précyclage (10 cycles)

⇒ Moyens de mesure

- ✓ Capteur d'effort
- ✓ Extensomètre à jauges

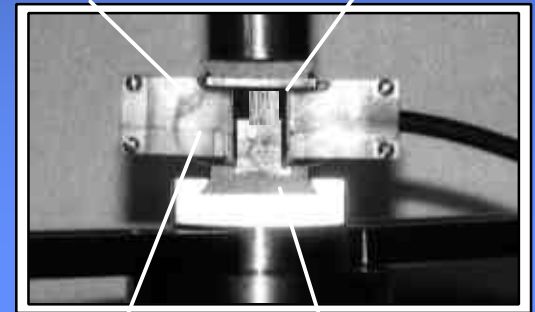
⇒ Paramètres principaux

$E_{X,Y,Z}$ (MPa) Module d'Young dans les directions **X, Y, Z**

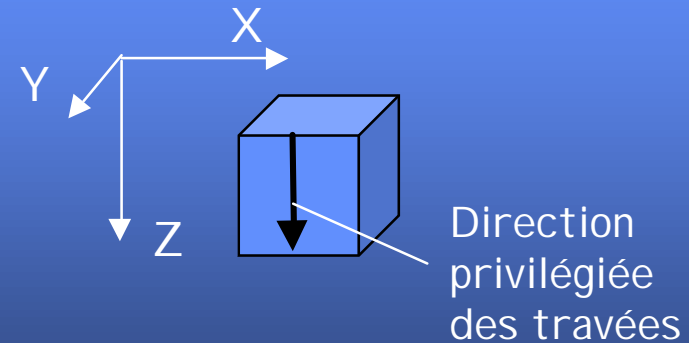
E (MPa) Module d'Young dans la direction **Z**

S_{max} (MPa) Contrainte maximale dans la direction **Z**

Protection en plexiglas Echantillon

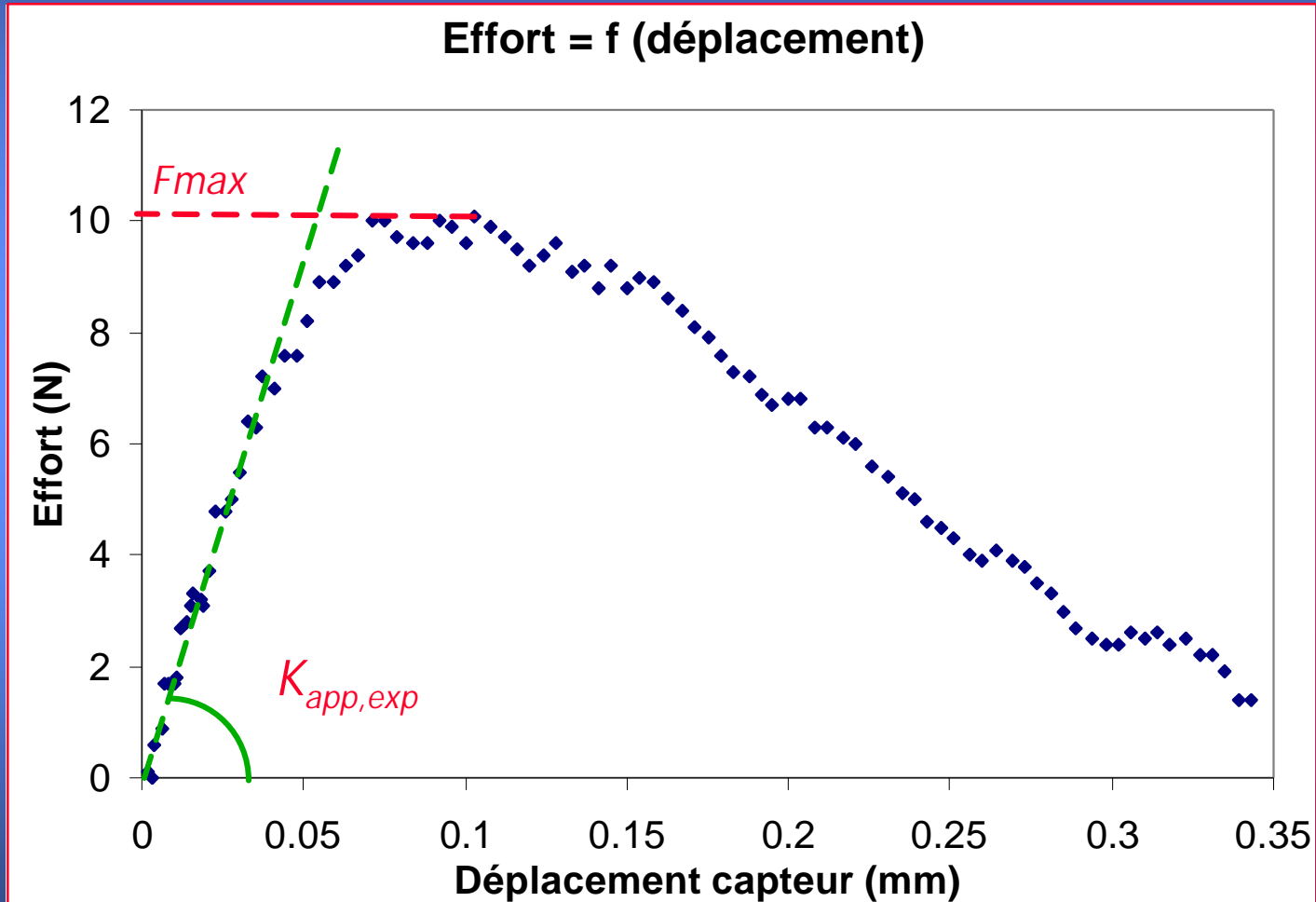


Arche latérale Cale amovible



Essai de compression

⇒ Courbe caractéristique d'un essai de compression



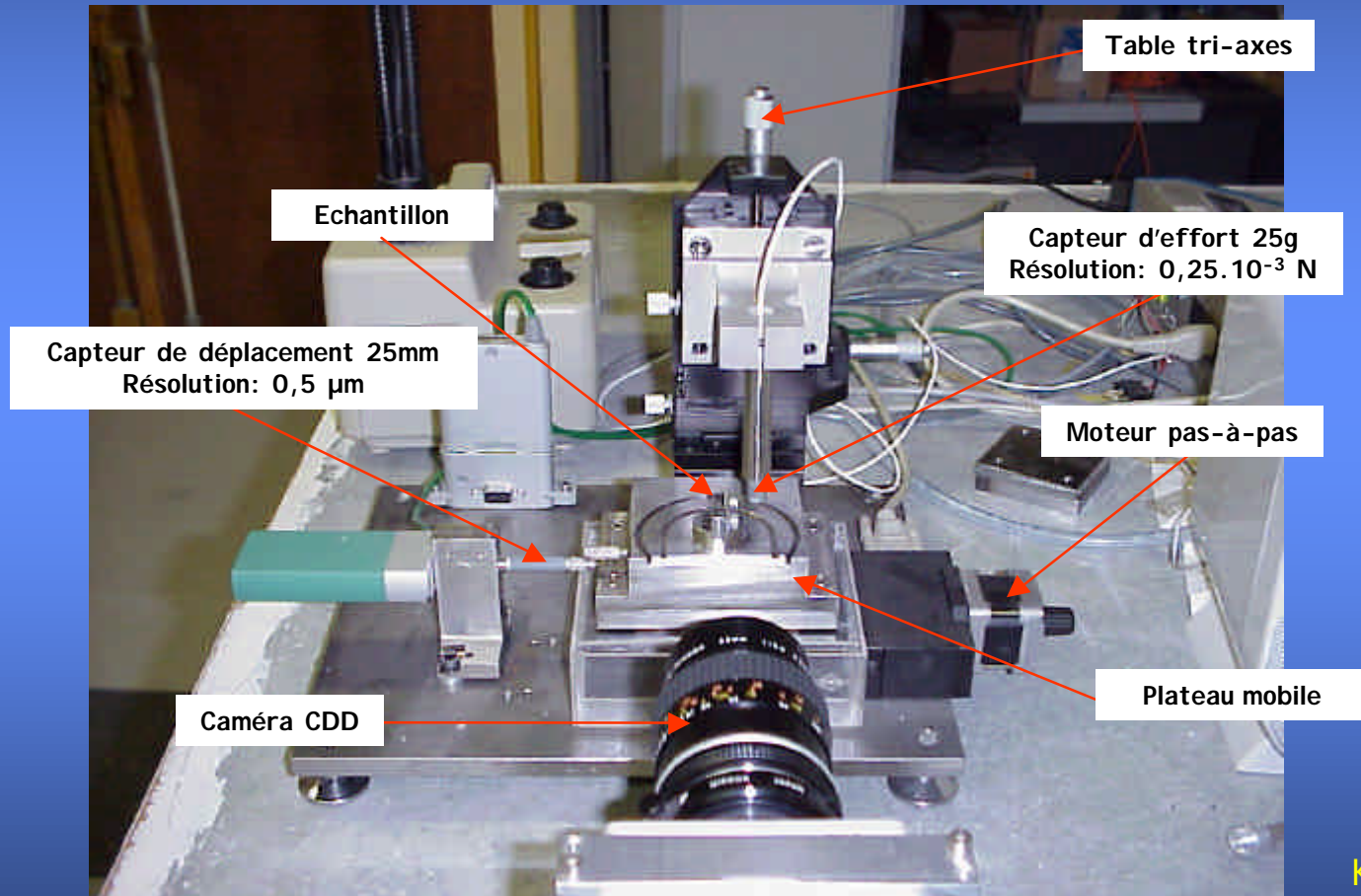
$$\sigma_{\max, \text{exp}} = F_{\max} / S_{\text{app}}$$

$$E_{\text{app, exp}} = k * K_{\text{app, exp}}$$

$k = \text{constante géométrique}$

Essai de microflexion sur travées

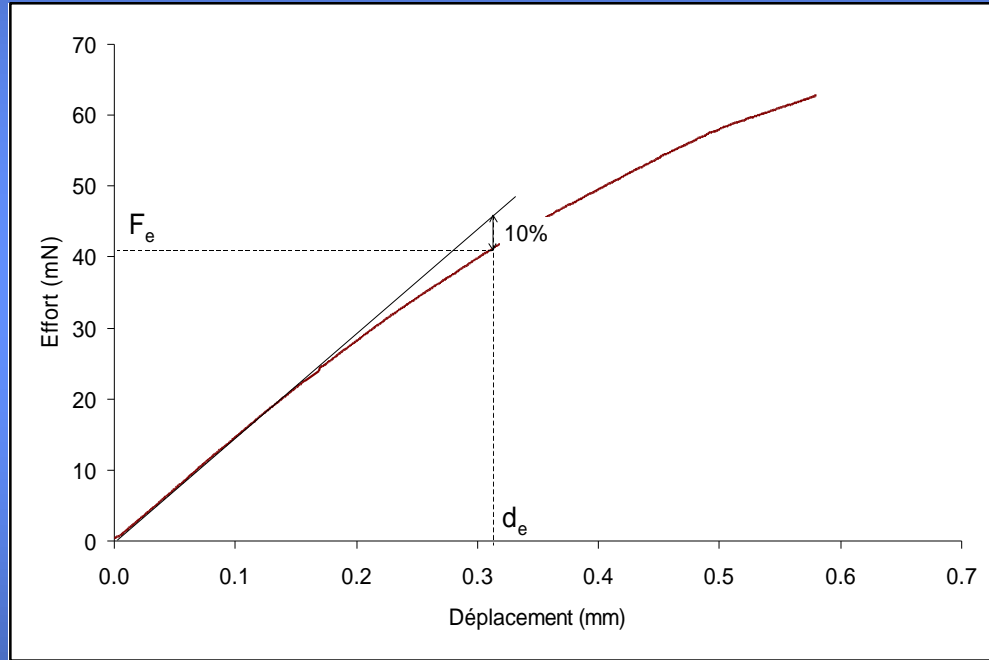
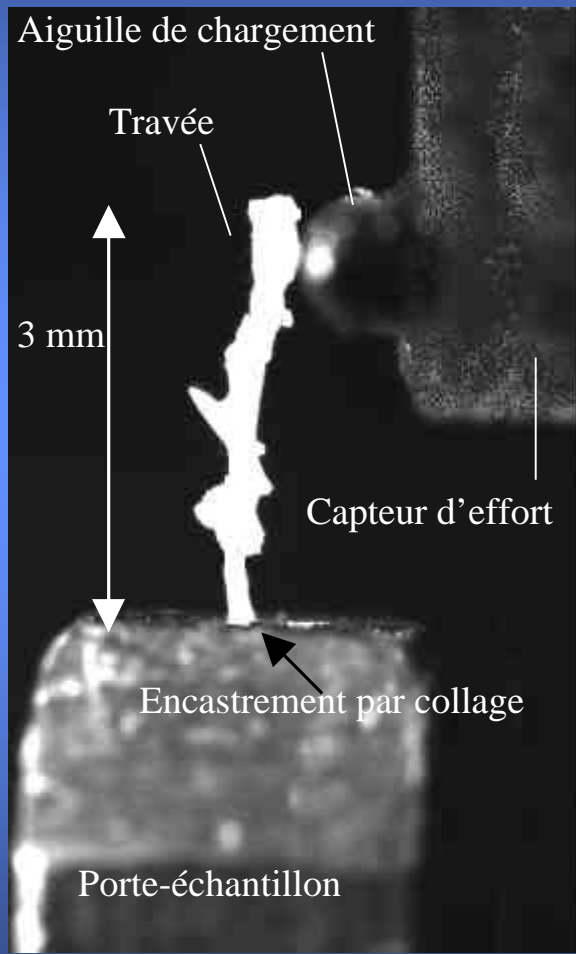
⇒ Banc d'essai



K. Bruyère,
Thèse 2000

Essai de microflexion sur travées

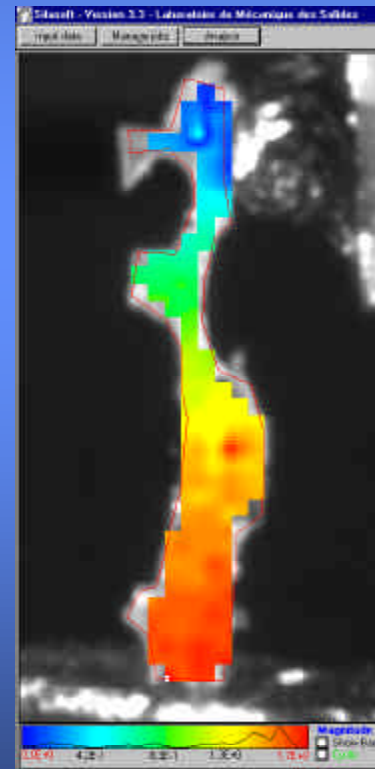
⇒ Schéma de principe et courbe caractéristique



Corrélation d'images sur travées

⇒ Mesure du champ de déplacements et de déformations sur un objet déformé

- ✓ logiciel Sifasoft
- ✓ caméra numérique 1024*1024



Norme des déplacements

Avec F. Morest

Modélisation par éléments finis

⇒ Construction de modèles 3D de géométrie réelle à partir d'images 3D (IRM ou μ Tomographiques)

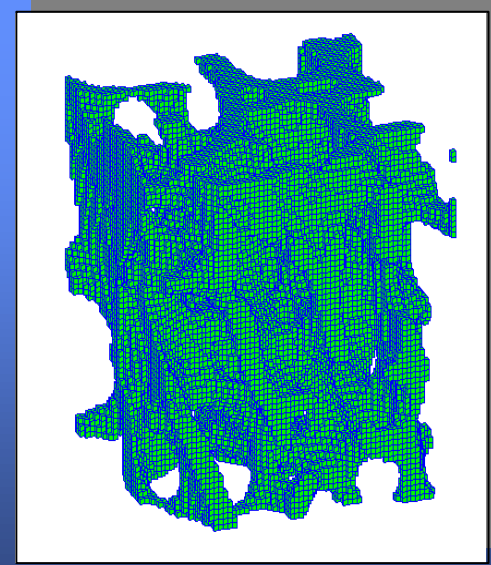
- ✓ Élément brique à 8 nœuds ou élément poutre
- ✓ Maillage ⇒ 1 élément = 1 voxel ou un groupement de voxels
- ✓ Taille de voxels = taille des éléments briques = 78 ou 40 μm
- ✓ Hypothèse : matériau homogène et isotrope

⇒ Simulation numérique

- Code Abaqus®
- Visualisation sous Ideas® ou Abaqus Viewer 6.1.1
- CINES Montpellier



5 000 éléments

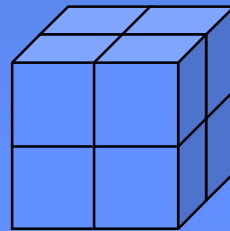


100 000 éléments

Modèles 3D de géométrie réelle

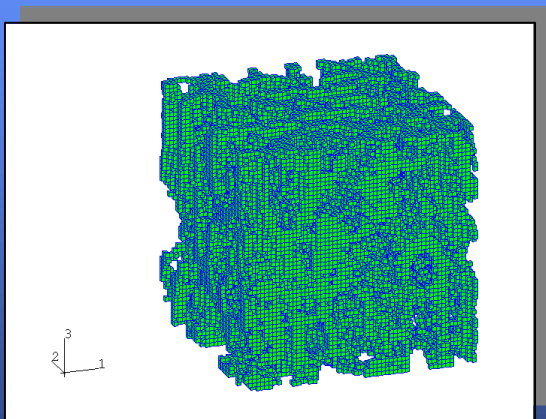
⇒ Modèles issus d'images I RM

- ✓ Taille de voxels = taille des éléments briques = $78\mu\text{m}$
- ✓ Volume Maillé = selon les images ($\rightarrow 7,3^3 \text{ mm}^3$)



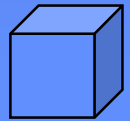
$78\mu\text{m}$

Modèle I RM



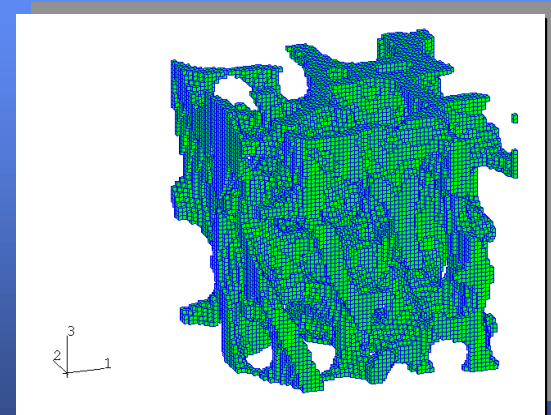
⇒ Modèles issus d'images μ Tomographie

- ✓ Taille de voxels = taille des éléments briques = $40\mu\text{m}$
- ✓ Volume Maillé = selon le VTO ($\rightarrow 6,6^3 \text{ mm}^3$)



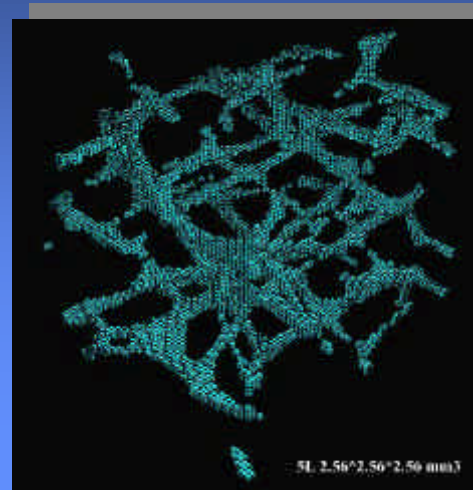
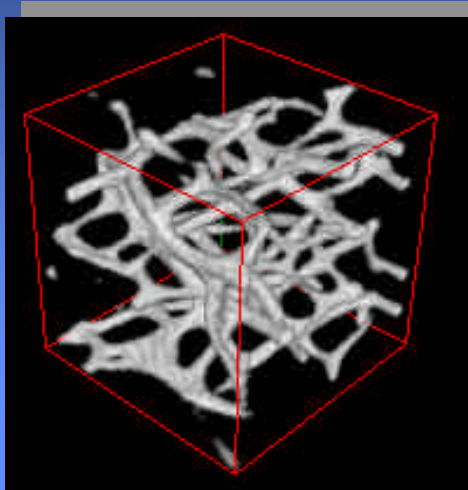
$40\mu\text{m}$

Modèle μ TOMO



Modèles 3D de géométrie réelle

⇒ Modèle brique et Modèle poutre



• Fort VTO (>12%) :

Modèle Brique 👍

Faible VTO (<12%) :

Modèle Brique 👎

Modèle Poutre, basé sur TbT

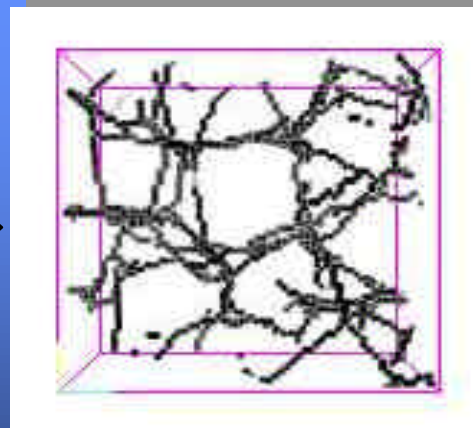
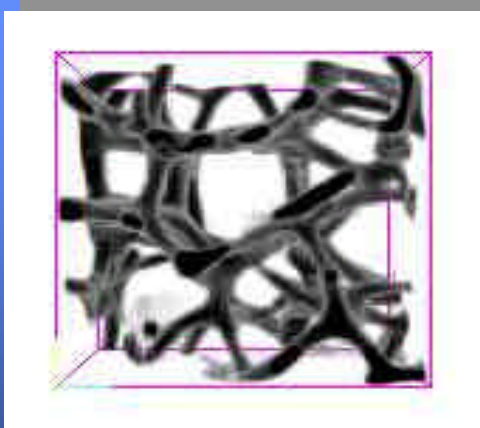


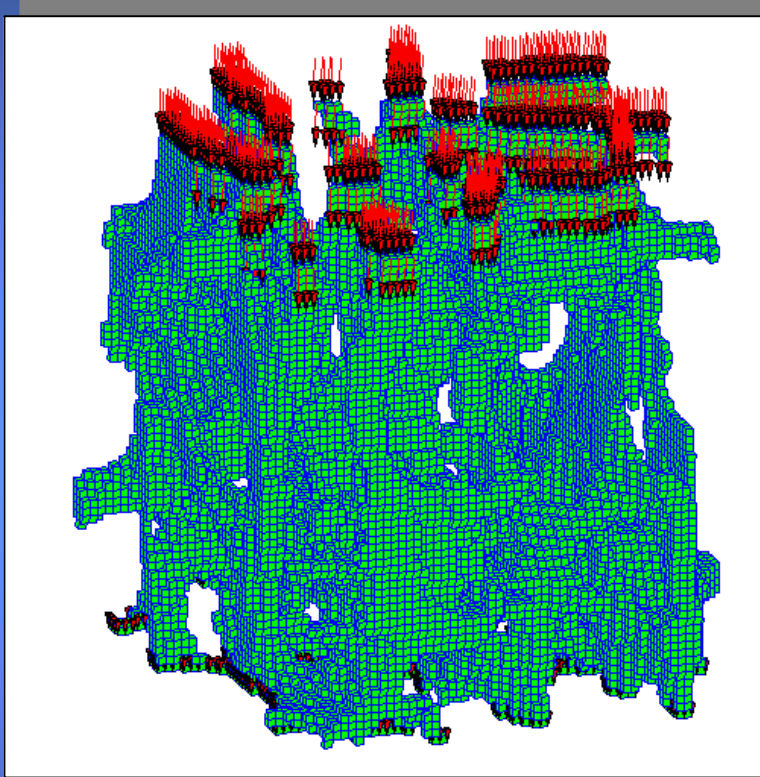
Image tomographiée de l'échantillon 48M, 64*64*64

Image squelettisée de l'échantillon 48M, 64*64*64

Modèle poutres de l'échantillon 48M, 64*64*64

Méthode de caractérisation

⇒ Simulation de la compression dans la direction privilégiée des travées



⇒ 0.5 % de déformation

- Image IRM (78 μm) et Tomo (40 μm)
- Volumes max 6,6³ mm³
- Matériau homogène et isotrope
- $E_{\text{travée, initial}} = 8000 \text{ MPa}$

$$\frac{E_{\text{Travée}}^{\text{initial}}}{E_{\text{app}}^{\text{num}}} = \frac{E_{\text{Travée}}^{\text{num}}}{E_{\text{app}}^{\text{exp}}} = K$$

⇒ Identification pour déterminer le Module d'Young du tissu trabéculaire

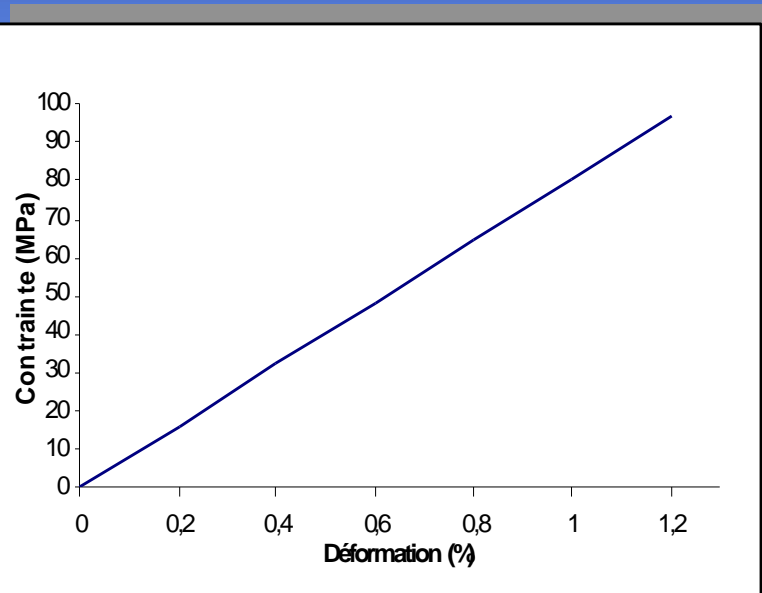
✓ Ajustement de $E_{\text{travée}}$ pour retrouver E_{apparent} expérimental

Méthode de caractérisation

⇒ Deux types de simulation :

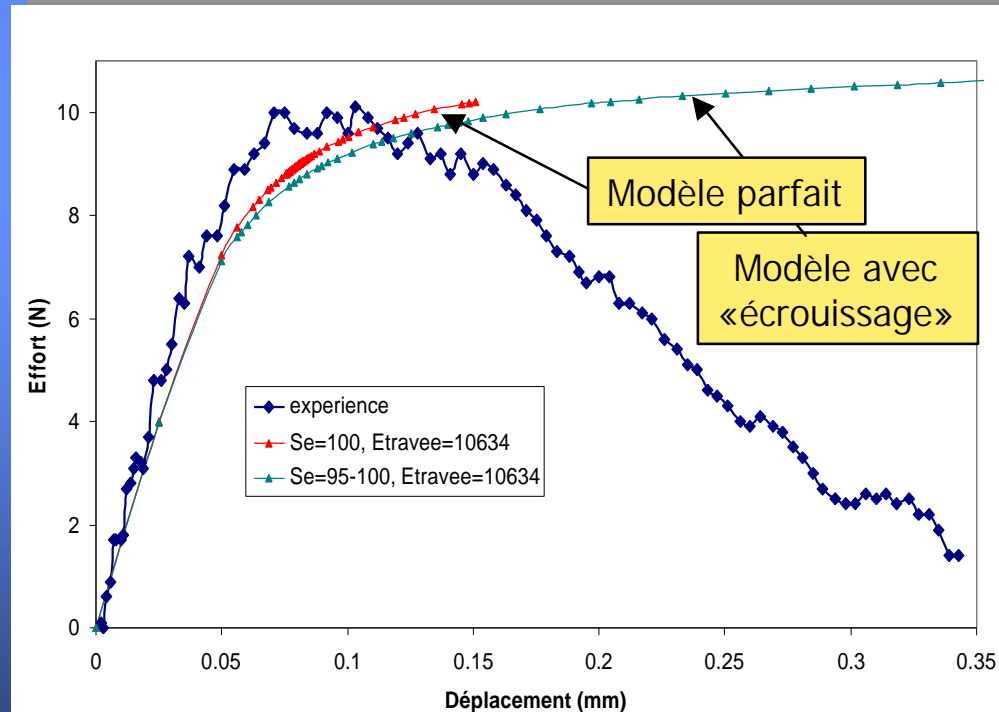
✓ Elastique → $E_{\text{tissulaire}}$

✓ Elasto-plastique → $E_{\text{tissulaire}}$ et $\sigma_{\text{élastique}}$



Loi Elastique

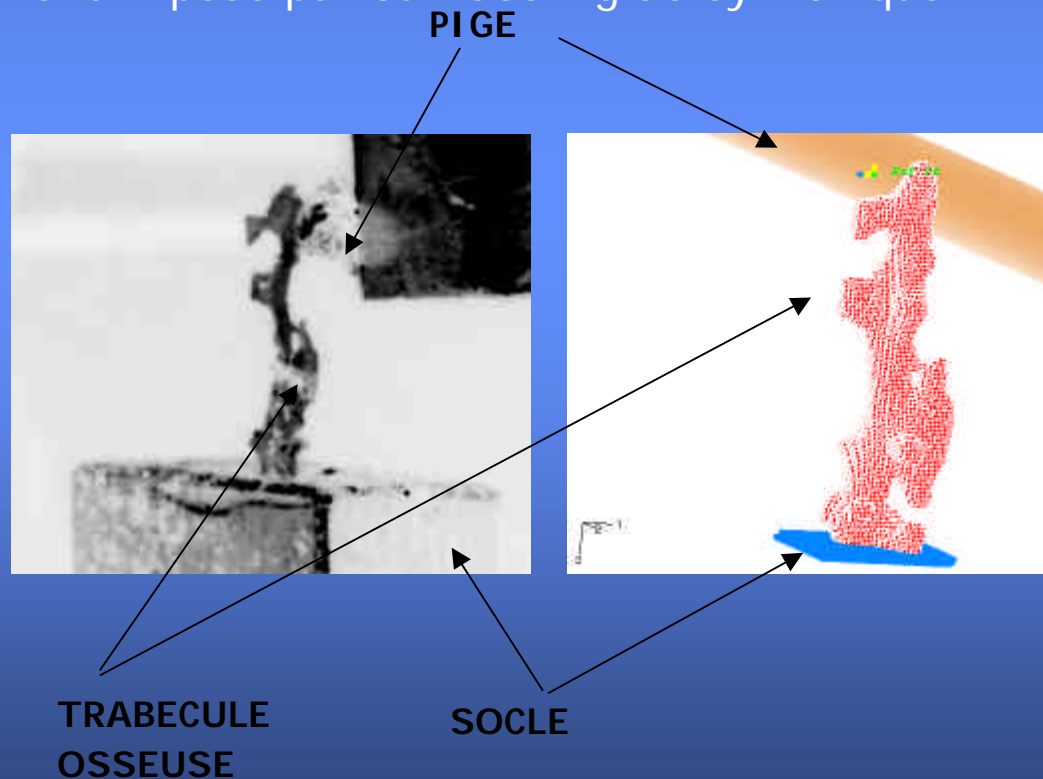
Loi Elasto-plastique



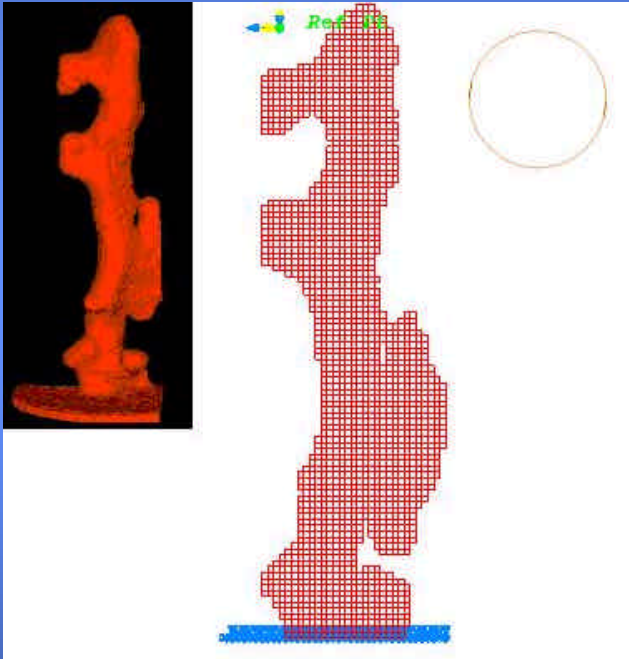
Modélisation du tissu trabéculaire

⇒ Modèles issus d'images Tomographiques (CNDRI)

- ✓ Taille de voxels = taille des éléments briques = 20 μm
- ✓ Volume Maillé = travées entières ($h \approx 3 \text{ mm}$)
- ✓ Encastrement de la base
- ✓ Déplacement imposé par surface rigide cylindrique

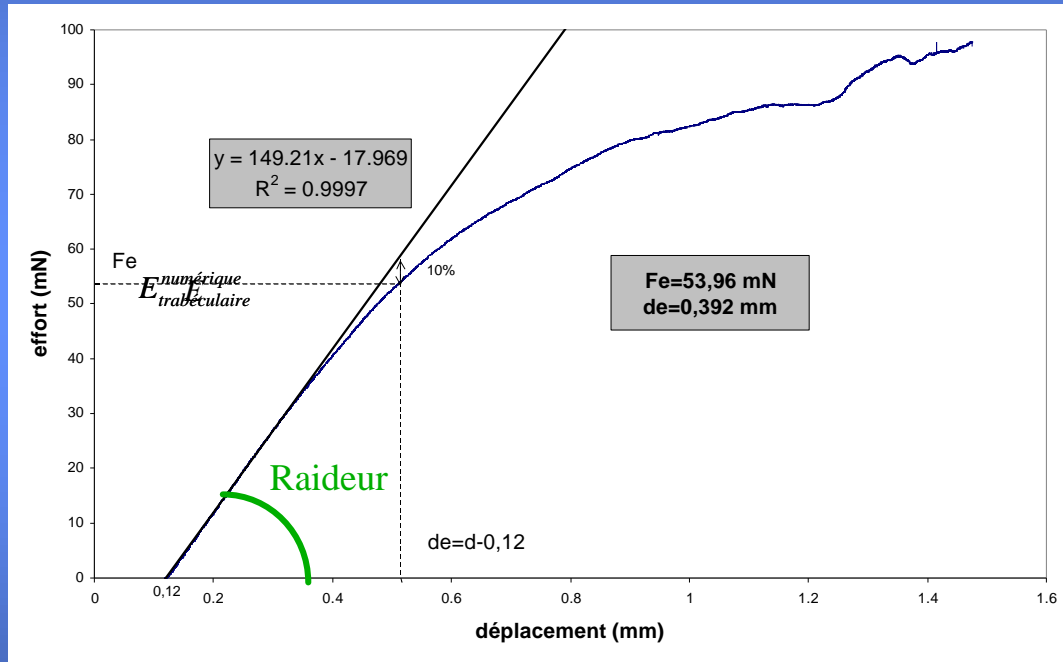


⇒ Caractérisation en Flexion



Tomo

MEF

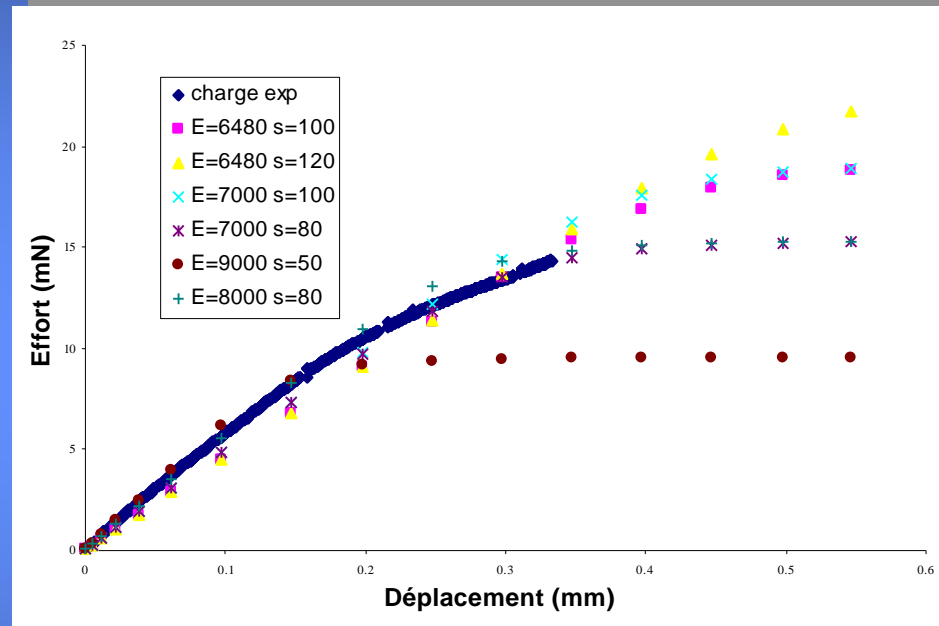
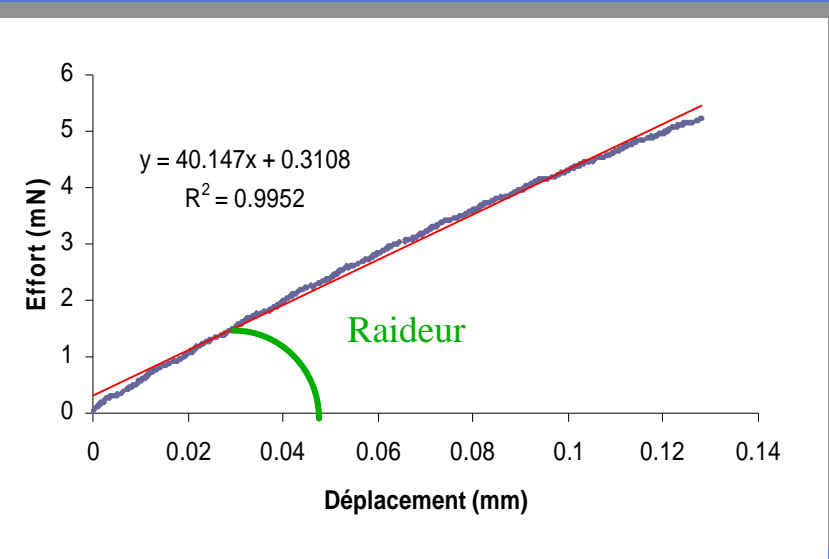


Essai Mécanique

→ $E_{\text{trabéculaire}}^{\text{numérique}}$

Caractérisation du tissu trabéculaire

⇒ Lois élastique et élasto-plastique



Identification avec Loi Elastique

Identification avec Loi Elasto-plastique

Raideur → $E_{\text{Trabéculaire}}^{\text{numérique}}$

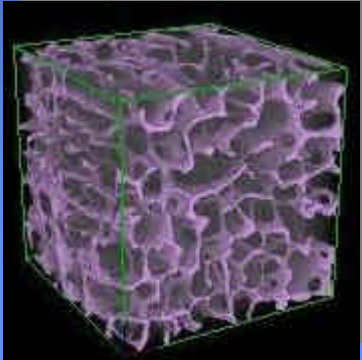
Fe → $\sigma_{\text{e trabéculaire}}$

Résultats

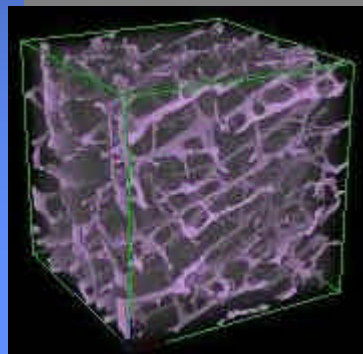
Acquisition Images 3D Haute définition

⇒ Tomographie (10 μm) : 44 échantillons cubiques (Médiaux et latéraux confondus)

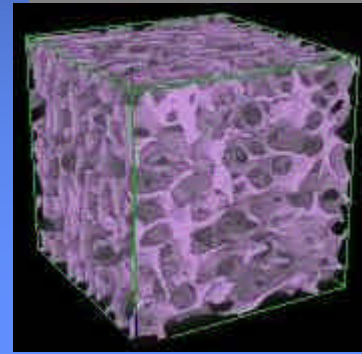
⇒ IRM (78 μm) : 34 échantillons cubiques (Médiaux et latéraux confondus)



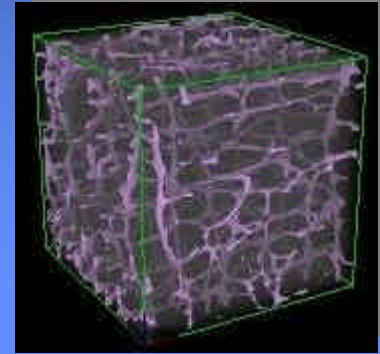
M47- F 86 ans



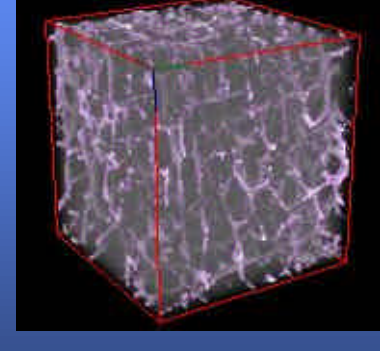
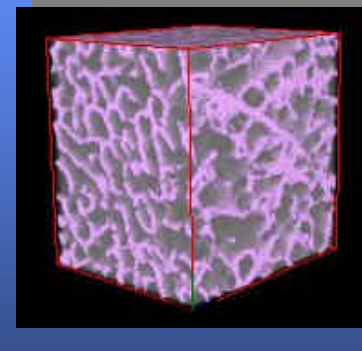
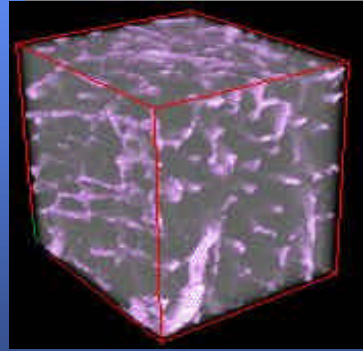
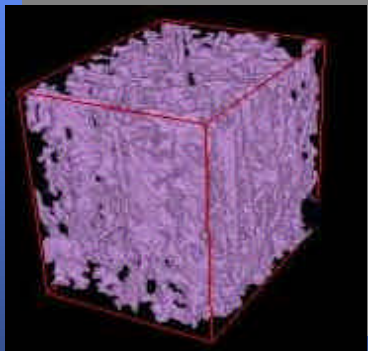
M59 - H 79 ans



M60 - F 65 ans

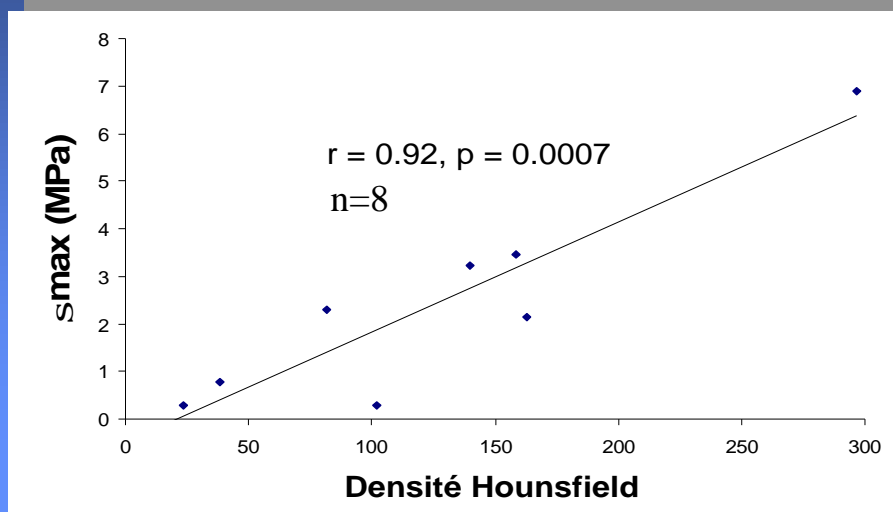


M61 - F 65 ans



Résultats sur Calcanéums entiers

⇒ Corrélation entre la contrainte maximale de compression σ et la densité Hounsfield HU



- Mécanique : sur cube médial
- Scanner X : sur calcanéum entier
- IRM *ex vivo* : sur calcanéum entier

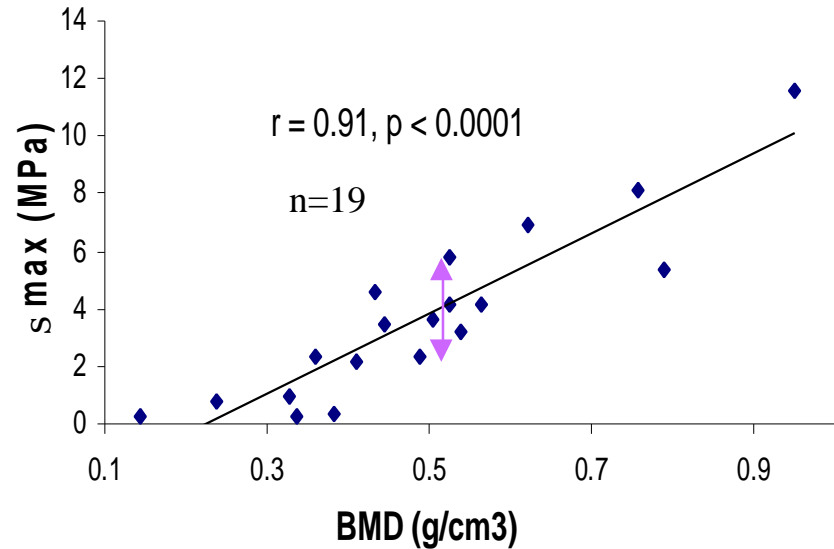
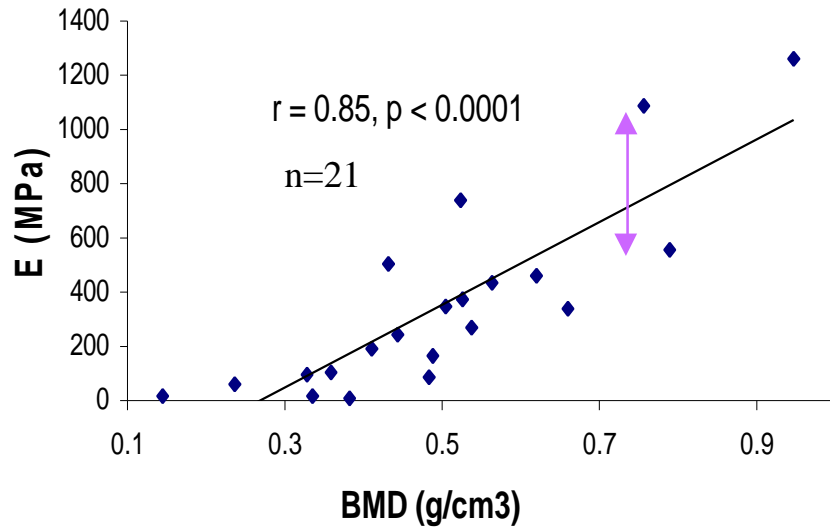
⇒ Corrélations paramètres Histo - IRM *ex Vivo*

Paramètres	Corrélations		
	n	r	p
<i>Densité volumique</i>			
BV/TV (%)	7	0.70	0.04
<i>Structure</i>			
TbTh (μm)	7	0.69	0.04
TbN (mm^{-1})	7	0.68	0.05
TbSp (μm)	7	0.87	0.005

Coefficients de corrélation de Pearson (r) et probabilité associée.

Résultats sur Calcaneums entiers

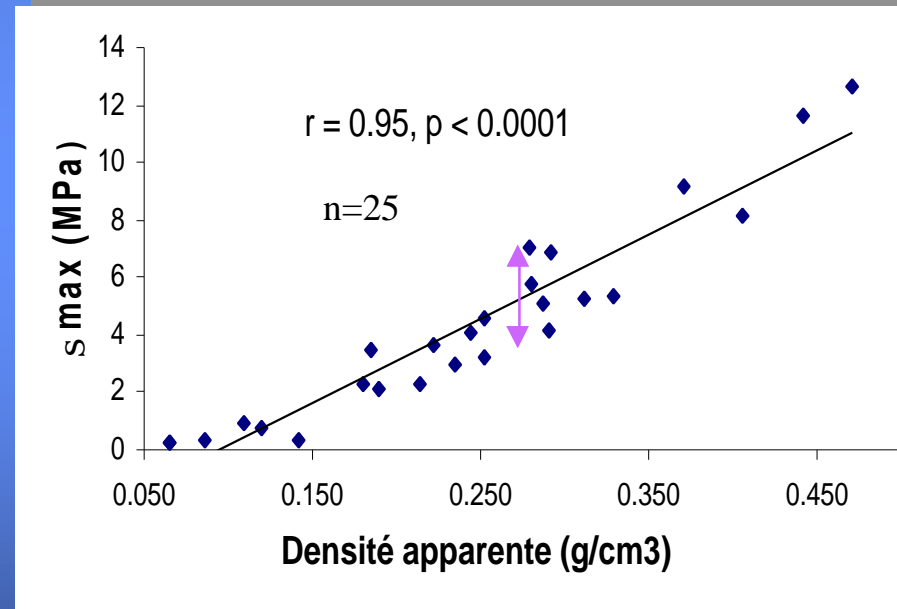
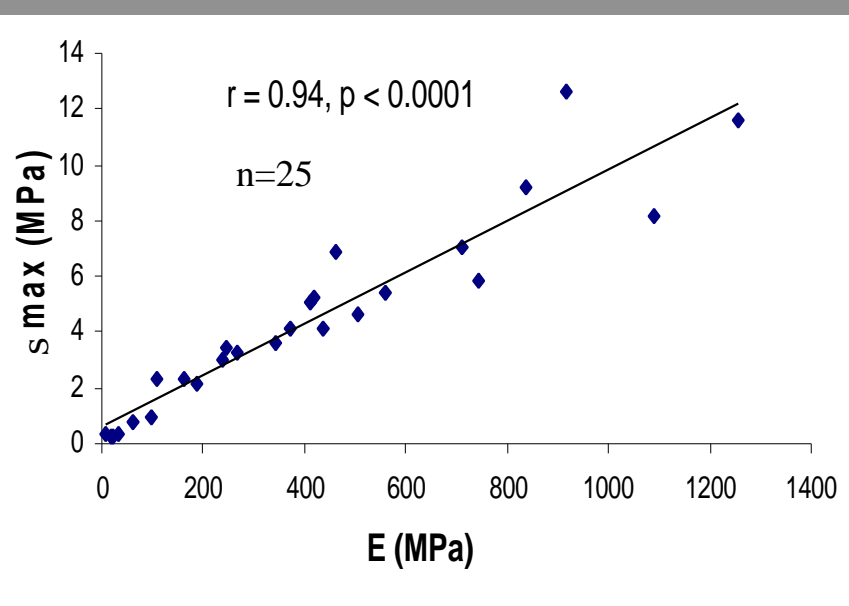
⇒ Corrélations entre le Module d'Young, σ_{\max} et le BMD mesuré par DXA :



- Mécanique : sur cube médial
- DXA : sur calcaneum entier

Résultats « Mécanique »

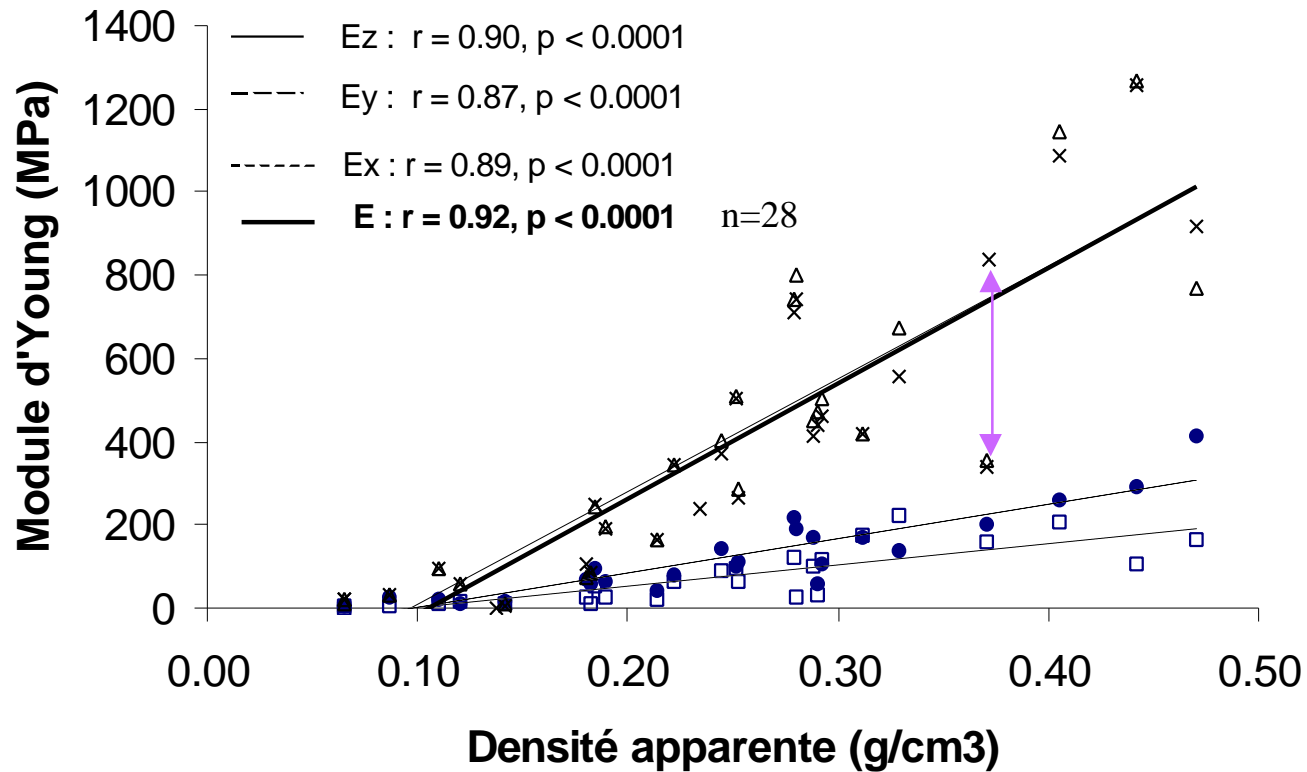
⇒ Corrélations entre la contrainte maximale, le Module d'Young et la densité apparente :



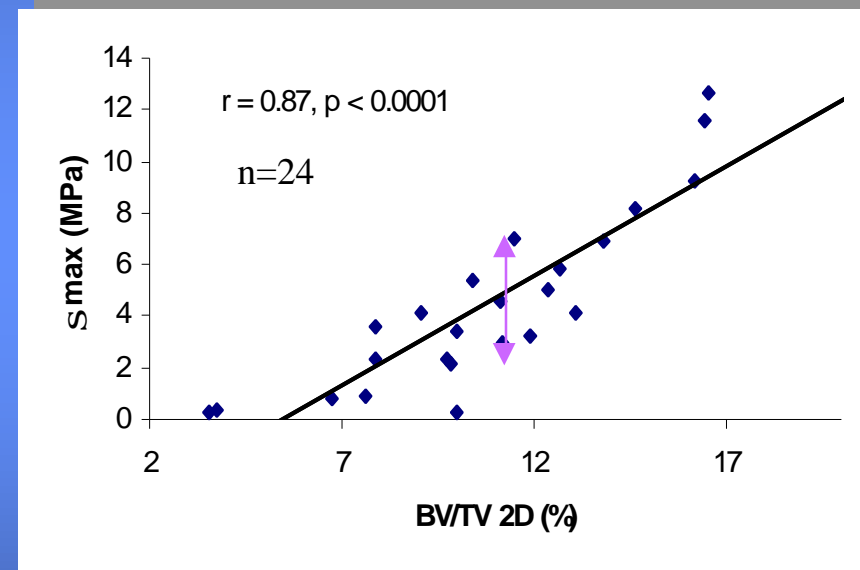
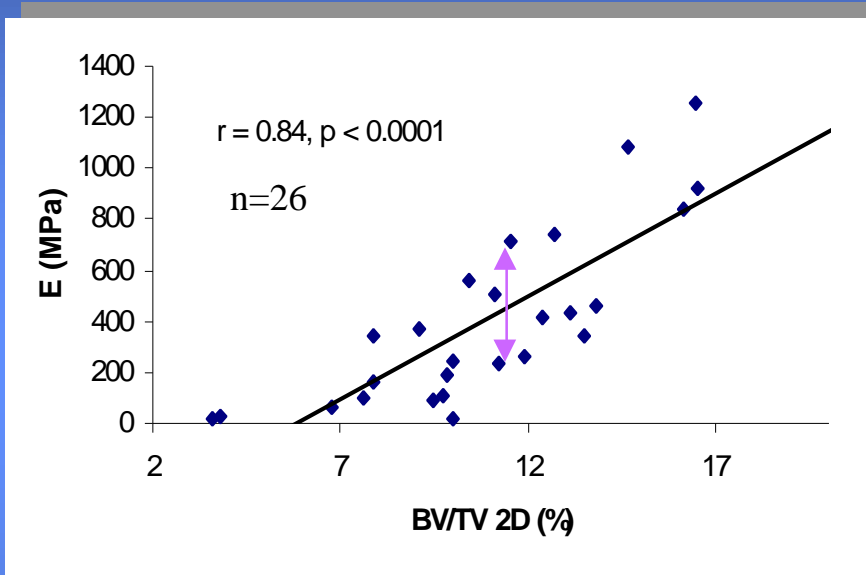
- Mécanique et densité apparente : sur cube médial

Résultats « Mécanique »

⇒ Corrélations entre les différents Modules d'Young et la densité apparente



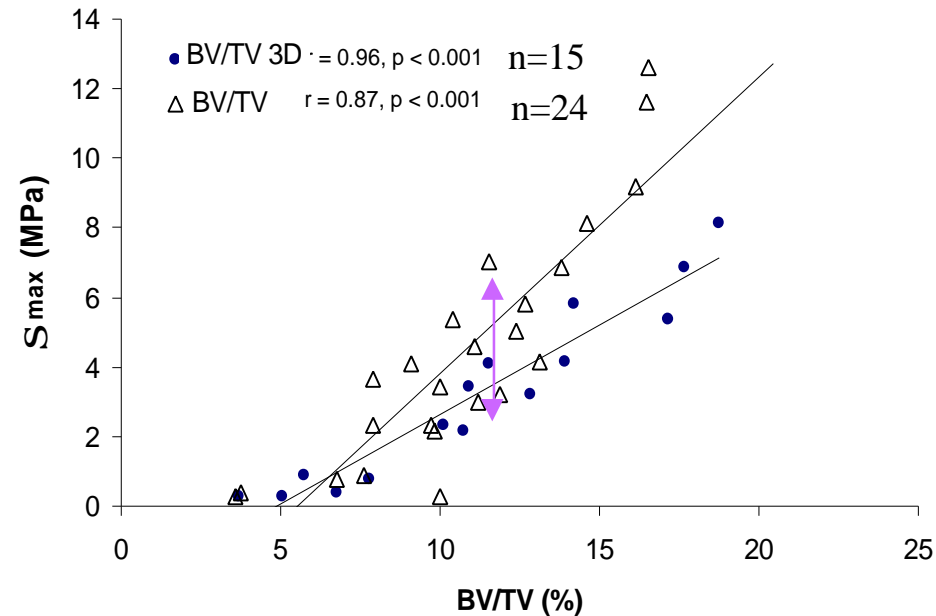
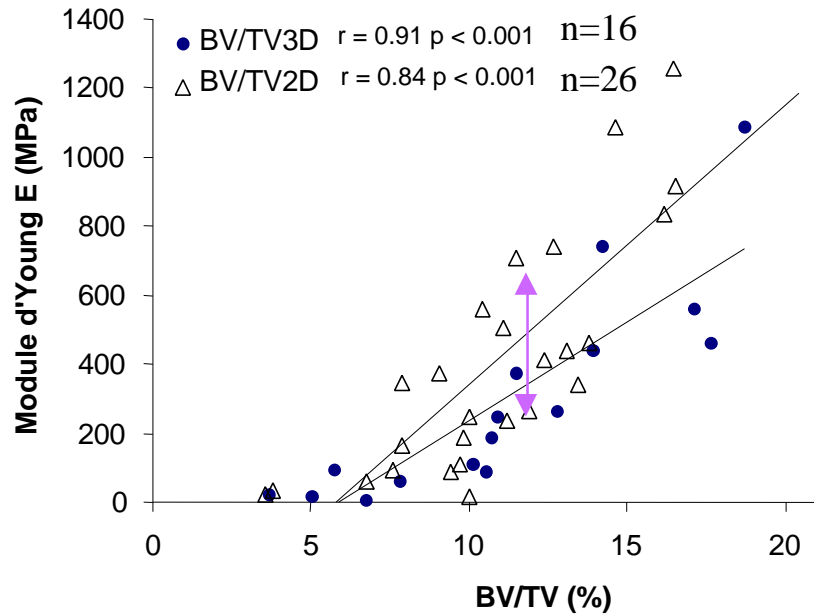
⇒ Corrélations entre les paramètres mécaniques et le volume trabéculaire osseux calculé par histomorphométrie (BV/TV 2D)



- Mécanique : sur cube médial
- 3 Coupes Histomorphométriques sur cube latéral

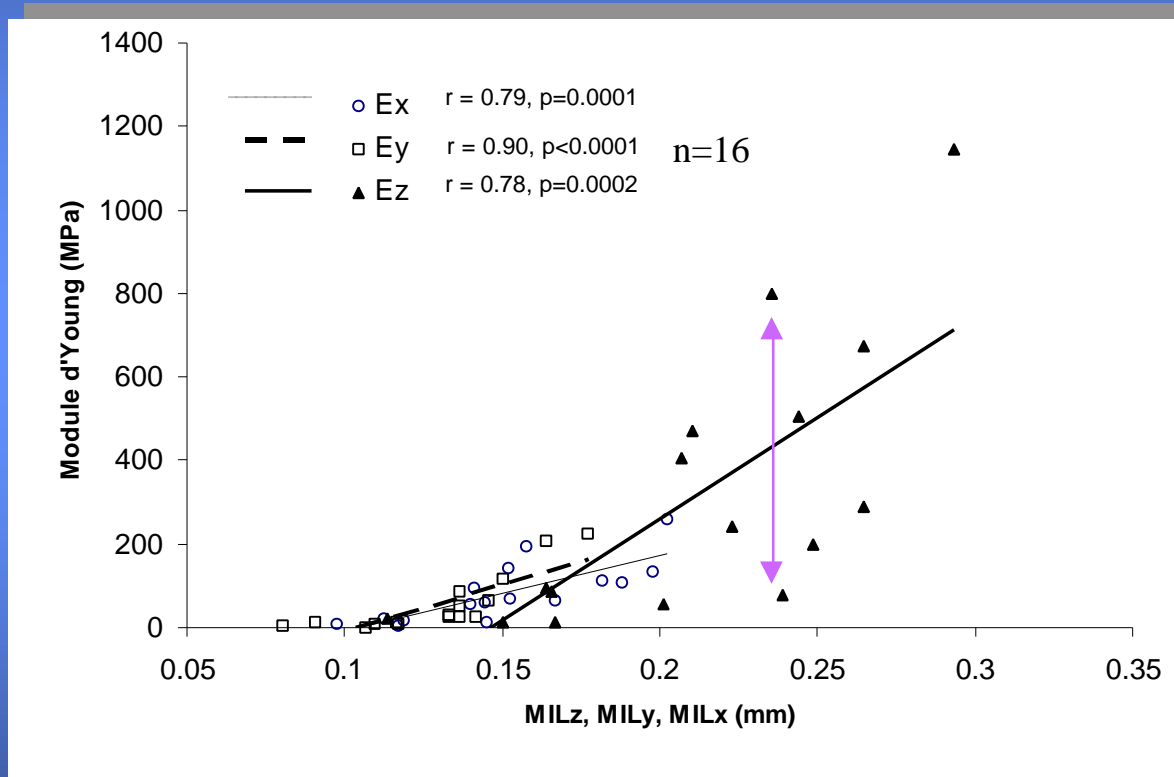


⇒ Corrélations entre les paramètres mécaniques et le BV/TV 2D et 3D (par Tomographie 10 μm)

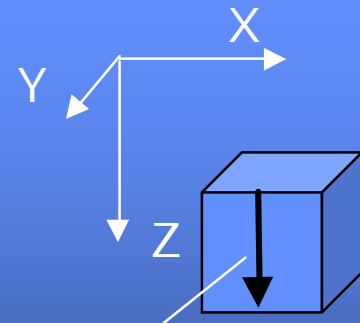


Mécanique - Anisotropie

⇒ Corrélations entre les modules d'Young et l'anisotropie MIL selon les directions X, Y et Z (calculé par Tomographie 10 μm)



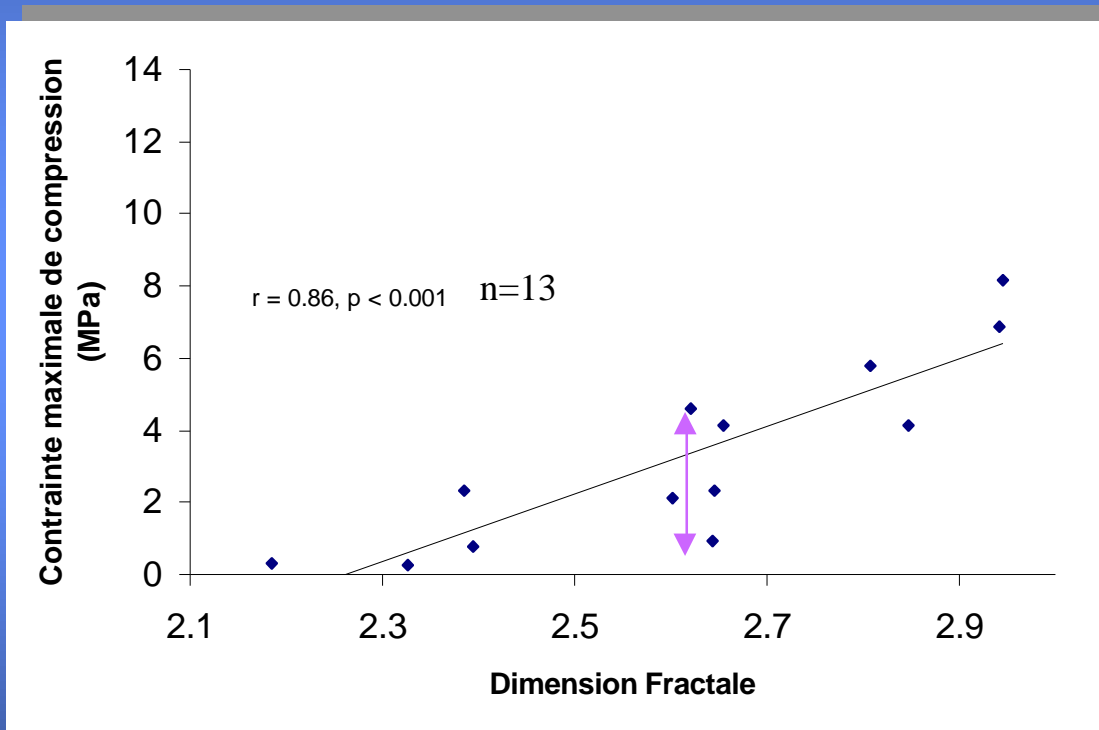
MIL :



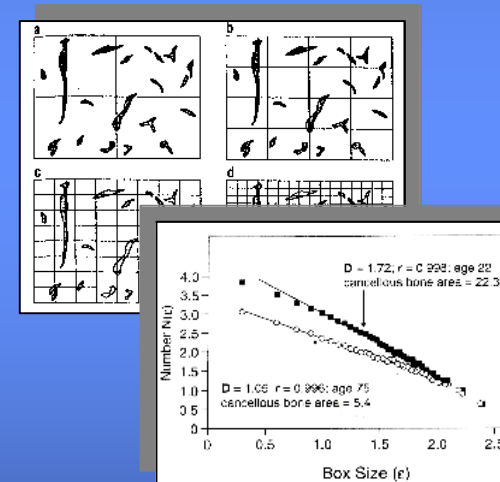
Direction privilégiée des travées

Mécanique - Irrégularité

⇒ Corrélation entre la contrainte maximale σ_{\max} et la dimension fractale D (calculée en 3D par I RM 78 μm)

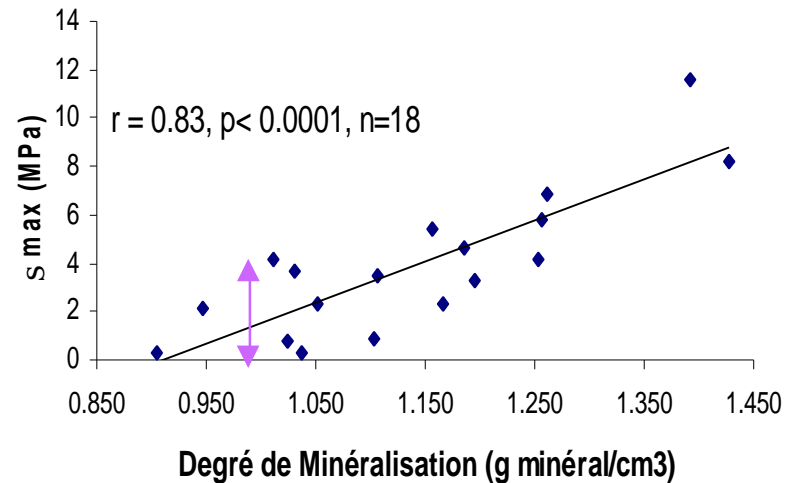
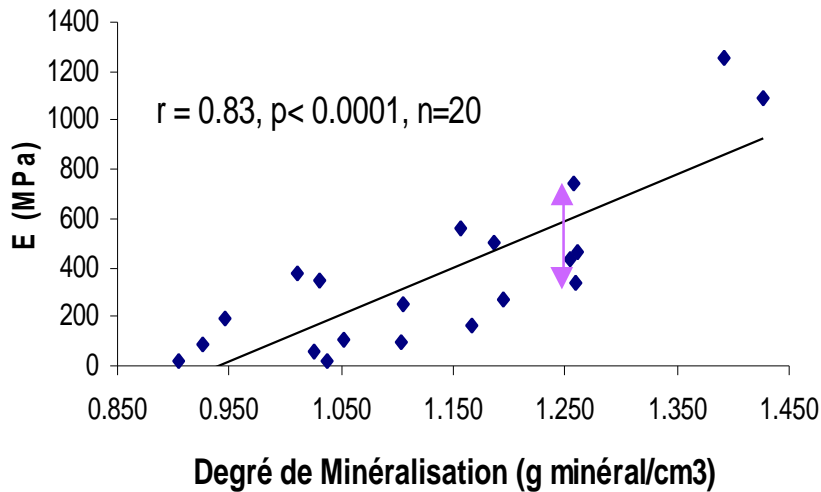


Dimension Fractale D



Mécanique - Microradiographie

⇒ Corrélations entre paramètres Mécaniques mesurés sur échantillons cubiques et Microradiographie sur 1/2 pastille adjacente



- Mécanique : sur cube médial
- Microradiographie : sur 1/2 pastilles inter Medio-Latérale

Mécanique - MEF

⇒ Modèles Hexaédriques (Brique) (Comportement élastique) :

- ✓ Tomographie : Latéraux (27 échantillons en 5.12 mm³, 15 échantillons en 6.6 mm³)
Médiaux (16 échantillons en 5.12 mm³, 13 échantillons en 6.6 mm³)

↓

TOMOGRAPHIE (40 μm)				$E_{trabéculaire}^{num}$			
Côté	n	Volume (mm ³)	E_{app}^{exp} (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecart type	Médiane	Plage
Latéral	27	(5.12 ³)	390	94 000	142 000	37 000	[3 900, 680 000]
Latéral	15	(6.6 ³)	221	126 000	164 000	66 000	[4 300, 524 000]
Médial	16	(5.12 ³)	297	37 000	29 000	27 000	[2 860, 97 500]
Médial	13	(6.6 ³)	218	31 700	23 500	25 000	[2 240, 87 200]

- ✓ IRM : Latéraux (11 échantillons) & Médiaux (10 échantillons)

↓

IRM (78 μm)				$E_{trabéculaire}^{num}$			
Côté	n	Volume max (mm ³)	E_{app}^{exp} (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecart type	Médiane	Plage
Latéral	11	(7.66 ³)	460	26 500	23 350	15 600	[6 500, 72 200]
Médial	10	(7.3 ³)	362	109 200	166 300	24 000	[3 000, 538 000]

Squelettes MEF

⇒ Modèles Poutres :

- ✓ Squelettes et modèles poutres : 8 échantillons suffisamment filaires pour être squeletisés et 7 modèles numériques basé sur les TbTh

⇒ Loi élastique parfaite :

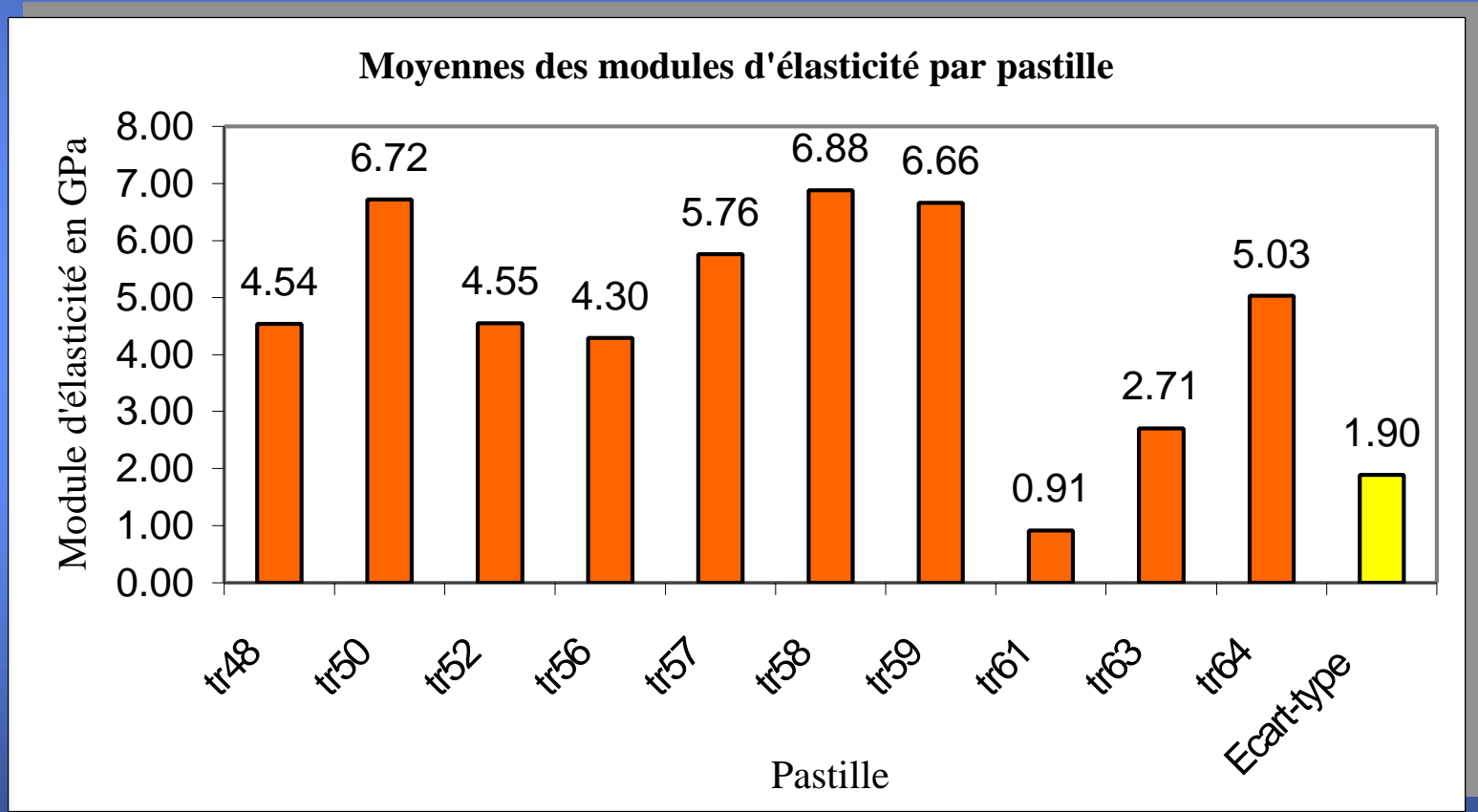
Squelettes (40 µm)				$E_{trabéculaire}^{num}$			
Côté	n	Volume max (mm ³)	E_{app}^{num} (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecart type	Médiane	Plage
Médial	7	(6.6 ³)	36	10 300	7 800	5 500	[4 400, 19 700]

⇒ Loi élasto-plastique avec léger « écrouissage » :

Squelettes (40 µm)		$E_{trabéculaire}^{num}$			
(MPa)	n	Moyenne (MPa)	Ecart type	Médiane	Plage
$E_{trabéculaire}^{num}$	7	11 100	10 800	4 900	[6 100, 19 700]
$S_{trabéculaire}^{num}$	7	243	210	132	[80, 330]

Travées MEF - Essai élastique

⇒ Valeurs des Modules d'Young (Gpa) déterminées après simulation d'un comportement élastique



Travées MEF - Essai à rupture

⇒ Valeurs des Modules d'Young et des limites élastiques déterminées après simulation d'un comportement élasto-plastique parfait par 1/2 pastilles

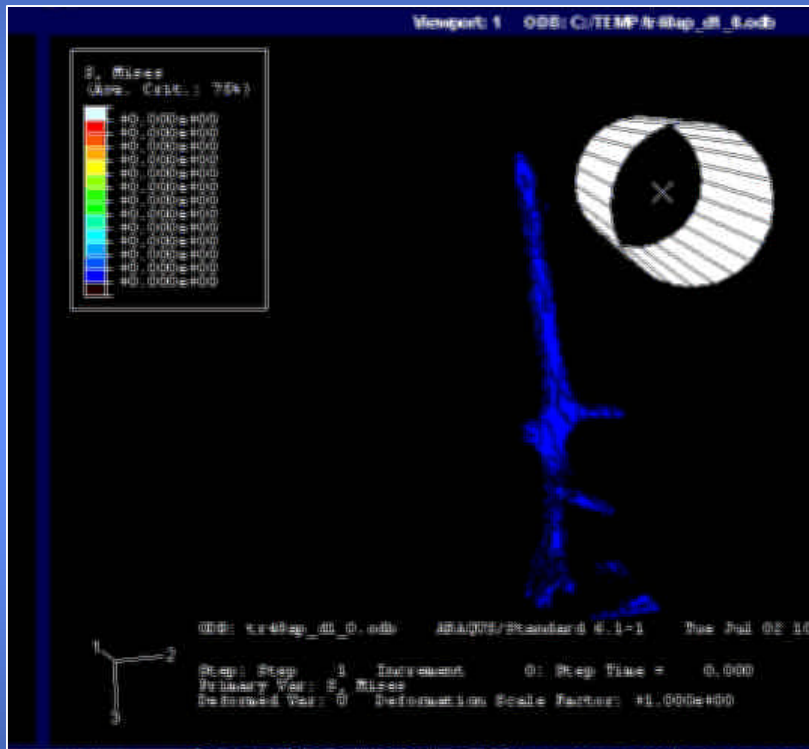
1/2 Pastille	Modules d'Young moyen (MPa)	Limite Elastique moyenne (MPa)
N°56	4454	53
N°57	2250	25
N°59	8803	47
N°61	1120	40
N°63	3247	27
N°64	4800	47

3 travées prélevées par 1/2 pastille

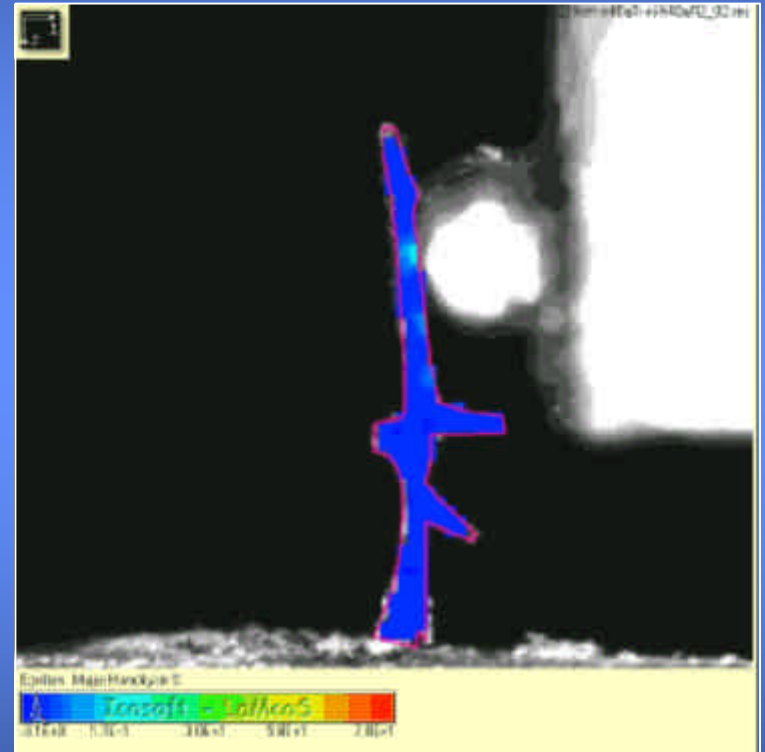
Travées MEF - Corrélation d'images

Corrélation

⇒ Exemple de corrélation d'image au cours d'un essai de microflexion -
Comparaison au modèle éléments finis



Simulation par EF d'un
essai de microflexion



Champ de Déformations
par corrélation d'images

Synthèse

Discussion

Synthèse - Discussion

Sur Calcanéum entier :

- ⇒ Mesures US : Roi difficile à repérer, mesures et corrélations significatives
- ⇒ Mesures DXA : I dem à la Littérature et corrélations significatives avec E
($0.78 < r < 0.85$)
- ⇒ Scanner X : Densité HU pour n=10, pas de calcul de BMC
- ⇒ IRM *in vivo* : Corrélations significatives avec histo, mais n=8
- ⇒ Sur Echantillon cubique :
- ⇒ Histomorphométrie : Mesures sur cube latéral uniquement
 - ➔ Biais / Techniques employées sur échantillon médial, même si corrélations significatives entre Med-Lat, avec l'IRM 78 μm et la $\mu\text{Tomographie}$ 10 μm .
- ⇒ IRM : - Influence de la moelle, Echantillons taillés pour limiter les effets de bords
 - ✓ Résolution proche des TbTh
 - ✓ Segmentation délicate
 - ✓ mais corrélations significatives entre paramètres méca et architecturaux

Synthèse - Discussion

Sur Calcanéum entier :

⇒ Mesures US : Roi difficile à repérer, mesures et corrélations significatives

⇒ Mesures DXA : I dem à la Littérature et corrélations significatives avec E
($0.78 < r < 0.85$)

⇒ Scanner X : Densité HU pour n=10, pas de calcul de BMC

⇒ IRM *in vivo* : Corrélations significatives avec histo, mais n=8

⇒ Sur Echantillon cubique :

⇒ Histomorphométrie : Mesures sur cube latéral uniquement

→ Biais / Techniques employées sur échantillon médial, même si corrélations significatives entre Med-Lat, avec l'IRM 78 μm et la $\mu\text{Tomographie}$ 10 μm .

⇒ IRM : - Influence de la moelle, Echantillons taillés pour limiter les effets de bords

✓ Résolution proche des TbTh

✓ Segmentation délicate

✓ mais corrélations significatives entre paramètres méca et architecturaux

Synthèse - Discussion

⇒ Sur Echantillon cubique :

⇒ MicroTomographie à 10 μm :

- ✓ Différence de taille entre échantillons réels et volumes imagés
- ✓ Différences significatives M / L mais corrélations significatives entre paramètres architecturaux

⇒ Essais Mécaniques :

- ✓ Influence du prélèvement (repérage des directions trabéculaires par radio)
- ✓ Paramètres méca en accord avec la littérature
- ✓ Corrélations significatives avec paramètres structuraux et architecturaux

⇒ Sur Travées :

⇒ Tomographie à 20 μm :

- ✓ Tomographie sur travée sèche
- ✓ Méthode précise, bon contraste et seuillage
- ✓ 1 Travée imagée à 2 μm à l'ESRF → Analyse + fine de la structure

⇒ Essais Mécaniques :

- ✓ Bonne reproductibilité dans le domaine élastique
- ✓ anisotropie assez forte
- ✓ Champ de déformations par corrélation → Quantification degré d'endommagement

Synthèse - Discussion

⇒ Sur Echantillon cubique :

⇒ MicroTomographie à 10 μm :

- ✓ Différence de taille entre échantillons réels et volumes imagés
- ✓ Différences significatives M / L mais corrélations significatives entre paramètres architecturaux

⇒ Essais Mécaniques :

- ✓ Influence du prélèvement (repérage des directions trabéculaires par radio)
- ✓ Paramètres méca en accord avec la littérature
- ✓ Corrélations significatives avec paramètres structuraux et architecturaux

⇒ Sur Travées :

⇒ Tomographie à 20 μm :

- ✓ Tomographie sur travée sèche
- ✓ Méthode précise, bon contraste et seuillage
- ✓ 1 Travée imagée à 2 μm à l'ESRF → Analyse + fine de la structure

⇒ Essais Mécaniques :

- ✓ Bonne reproductibilité dans le domaine élastique
- ✓ anisotropie assez forte
- ✓ Champ de déformations par corrélation → Quantification degré d'endommagement

⇒ Modélisation Eléments Finis :

- ✓ Limitation en terme de volume
- ✓ Limites du modèle Brique pour faible VTO (<12%)
- ✓ Squelettisation et modèles poutre prometteur mais à améliorer
- ✓ Analyse des déformations locales possible
- ✓ Mais globalement propriétés intrinsèques du tissu trabéculaire à prendre en compte

⇒ Proposition d'un schéma de prédiction du risque fracturaire

- ✓ Campagne d'essais ciblée populations « normale » et « ostéoporotique » + Scanner X + DXA + paramètres de qualité osseuse
- ✓ IRM clinique ou expérimental pour estimer l'architecture +/- fine
- ✓ Construction d'un modèle Elément Finis (de type hybride)
 - Déduction d'un Module d'Young Tissulaire et/ou d'une contrainte élastique limite σ_e
- ✓ Recherche de corrélations entre paramètres Méca et Paramètres Structuraux - Architecturaux et de qualité osseuse (courbure, lamelles...)
- ✓ Evaluation du risque fracturaire

⇒ Modélisation Eléments Finis :

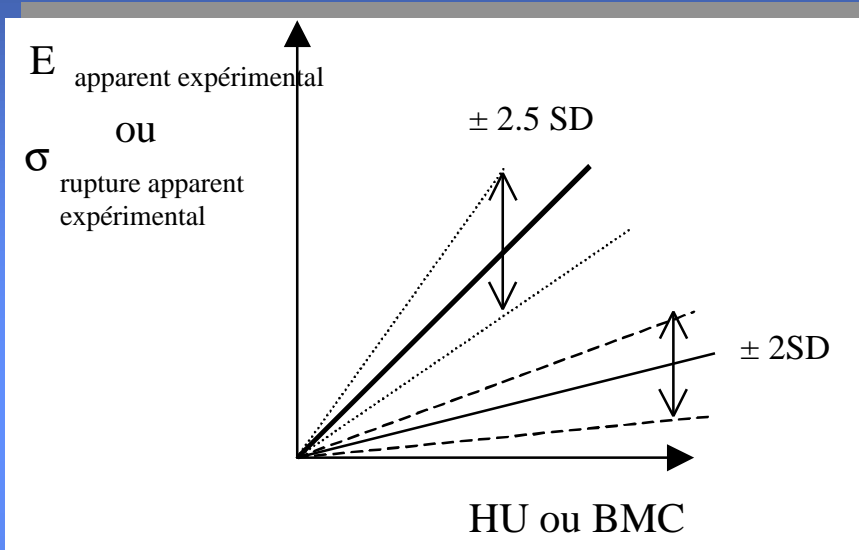
- ✓ Limitation en terme de volume
- ✓ Limites du modèle Brique pour faible VTO (<12%)
- ✓ Squelettisation et modèles poutre prometteur mais à améliorer
- ✓ Analyse des déformations locales possible
- ✓ Mais globalement propriétés intrinsèques du tissu trabéculaire à prendre en compte

⇒ Proposition d'un schéma de prédiction du risque fracturaire

- ✓ Campagne d'essais ciblée populations « normale » et « ostéoporotique » + Scanner X + DXA + paramètres de qualité osseuse
- ✓ IRM clinique ou expérimental pour estimer l'architecture +/- fine
- ✓ Construction d'un modèle Elément Finis (de type hybride)
 - Déduction d'un Module d'Young Tissulaire et/ou d'une contrainte élastique limite σ_e
- ✓ Recherche de corrélations entre paramètres Méca et Paramètres Structuraux - Architecturaux et de qualité osseuse (courbure, lamelles...)
- ✓ Evaluation du risque fracturaire

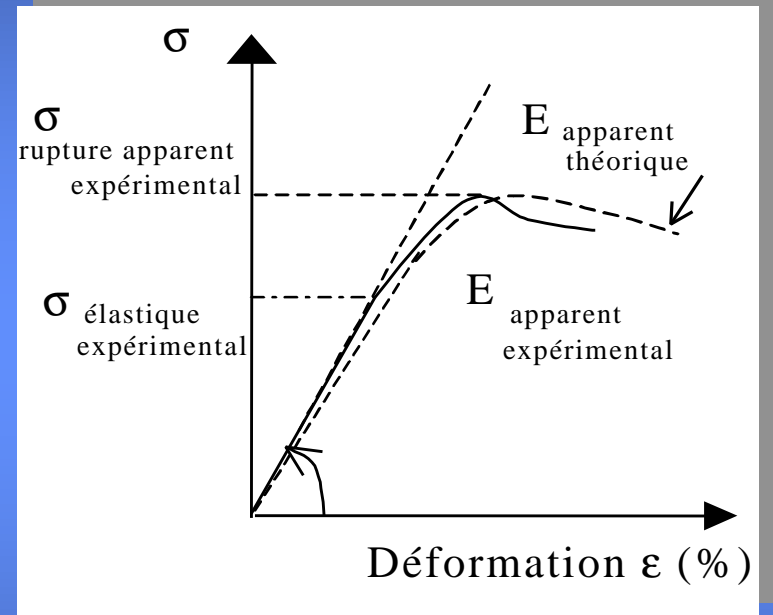
Schéma prédictif

⇒ Phase 1



Paramètres mécaniques fonctions de paramètres cliniques

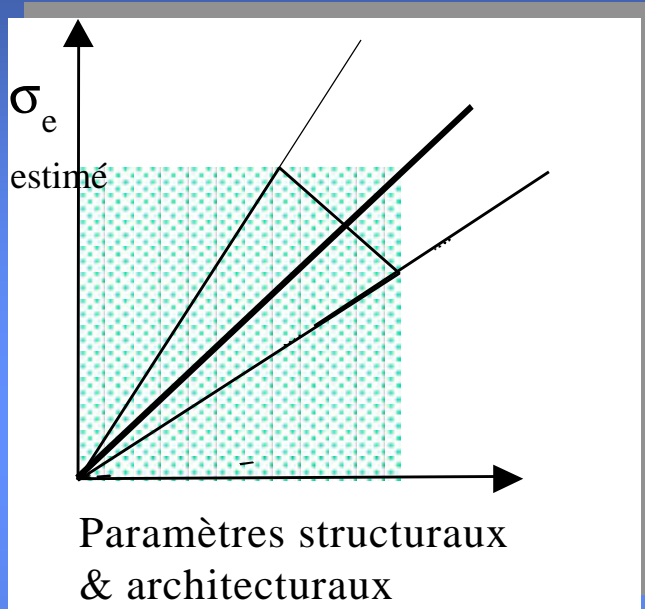
⇒ Phase 2



Courbe Expérimentale (Compression ou Microflexion)

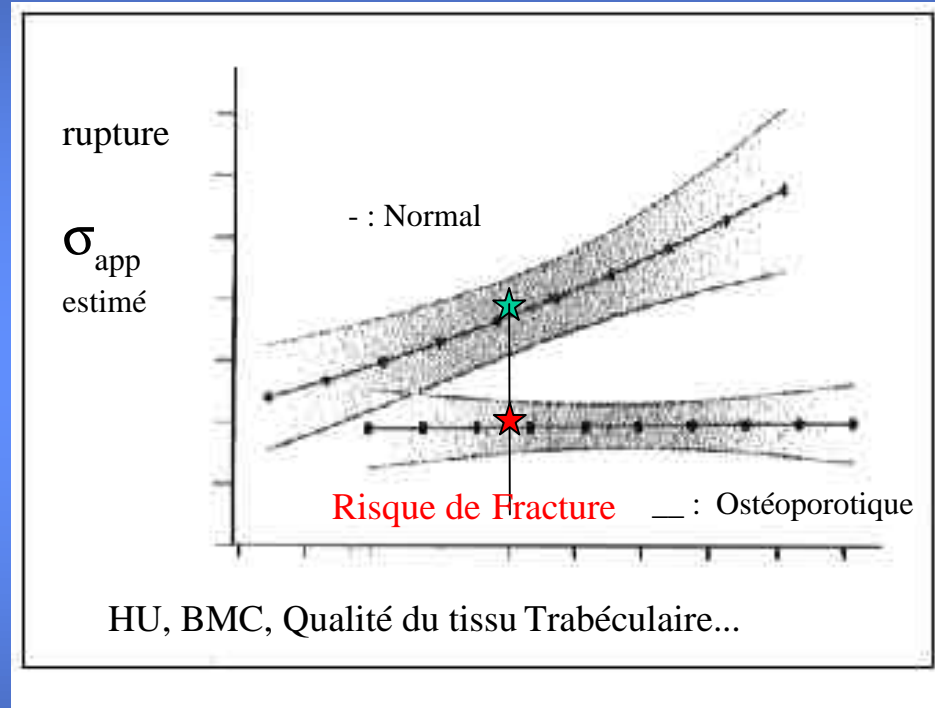
Schéma prédictif

⇒ Phase 3



Paramètres mécaniques fonctions de paramètres structuraux, architecturaux ou de qualité osseuse

⇒ Phase 4



Réduction de l'intervalle de confiance pour une meilleur prédiction du risque

Conclusions

Conclusions

⇒ Etudes classiques sur une série conséquente de calcanéums (31)

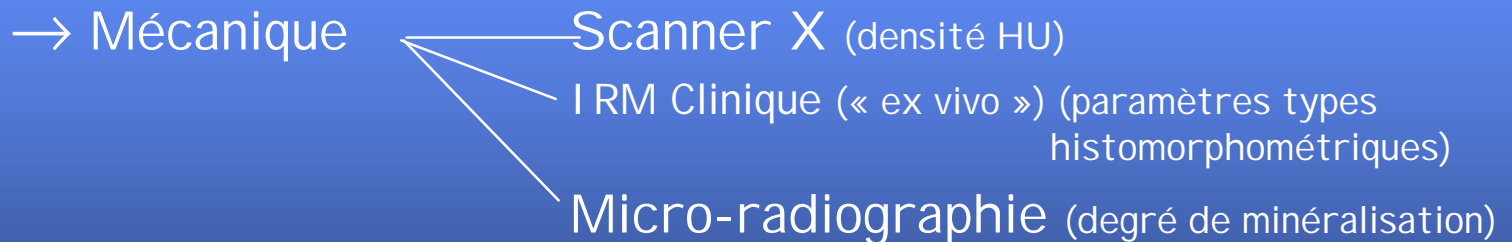
- ✓ Corrélations de paramètres



- ✓ Accord avec données de la littérature mais forte dispersion

⇒ Etudes Novatrices (n= 8 à 20) (Clinique)

- ✓ Corrélations de paramètres



- ✓ Corrélations significatives mais séries relativement faibles

Conclusions

⇒ Etudes originales

✓ Apport des techniques d'imagerie haute résolution :

→ Corrélations (n=16 à 19)

- Mécanique  Tomographie (μ CT)
IRM « expérimental »

- Corrélations simples significatives mais peu d'apport des paramètres 3D classiques ou directs dans l'estimation des propriétés mécaniques.

✓ MEF : (n=10 à 27)

→ Modélisation fidèle de l'architecture 3D mais limitation du fait des capacités de calcul

→ Intérêt de la méthode de squelettisation (simplicité, gain de temps de calcul)

→ Evaluation assez correcte des propriétés mécaniques tissulaires

Conclusions

⇒ Etudes originales

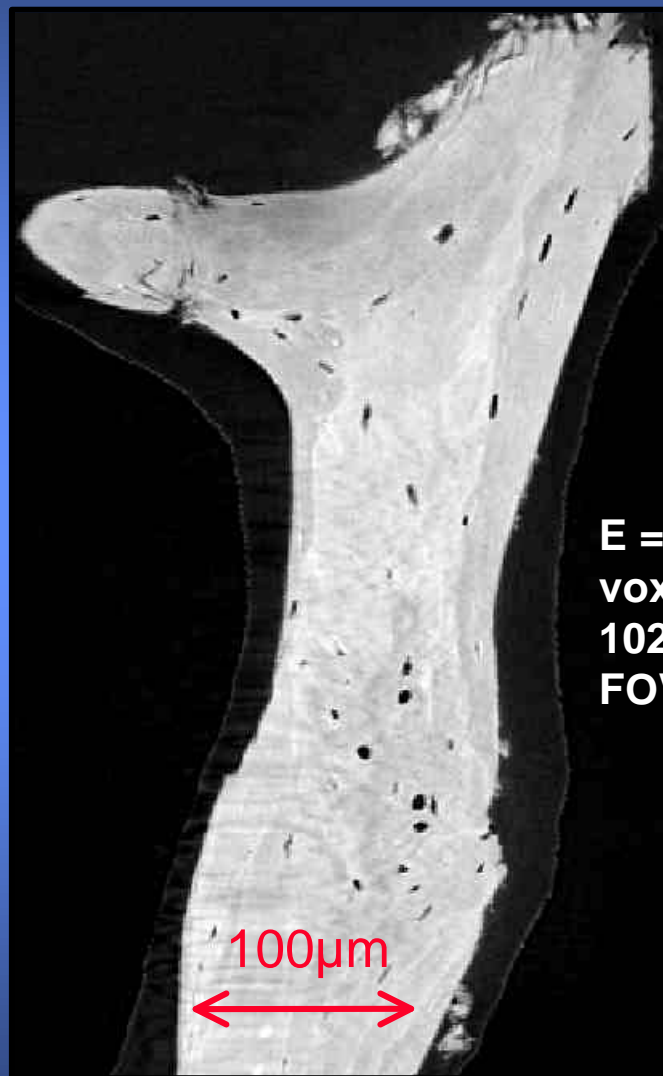
✓ Travées (n=30)

- Estimation correcte des propriétés mécaniques ($E_{\text{trabéculaire}}$ et $\sigma_{\text{trabéculaire}}$)
- Etude des champs de déformations par corrélation d'image & à relier au d° d'endommagement du tissu

✓ Proposition d'une méthodologie d'évaluation du risque fracturaire personnalisée prenant en compte :

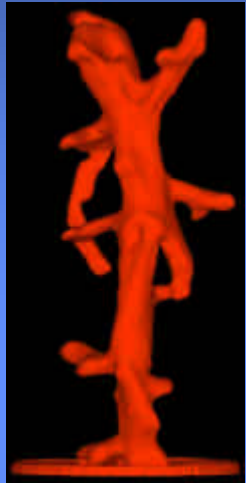
- la densité, l'élasticité et l'architecture de l'os spongieux, ainsi que la qualité du tissu trabéculaire (minéralisation, texture, irrégularité, facteurs du remodelage ...)
- Nécessité de compléter les séries d'essais en laboratoire en relation avec les données issues de la clinique (qualité du tissu osseux) et facteur de risque fracturaire.

1,5mm



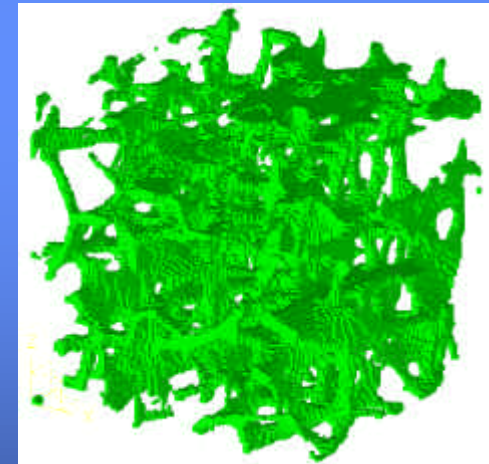
E = 8 KeV,
voxel size = 1.8 μm
1024 x 1024
FOV = 1.8 mm

H. Follet,
F. Peyrin



Caractérisation Biomécanique et Modélisation 3D par Imagerie X et IRM haute résolution de l'os spongieux humain : Evaluation du risque fracturaire

Hélène Follet



Directeur de Thèse : Pr C. Rumeilhart