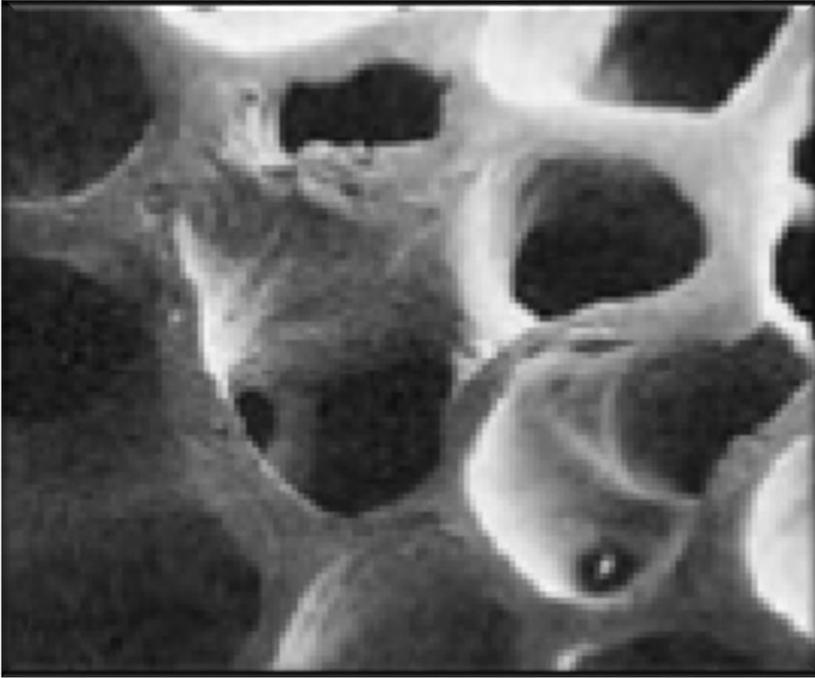


Caractérisation morphologique et topologique du tissu osseux

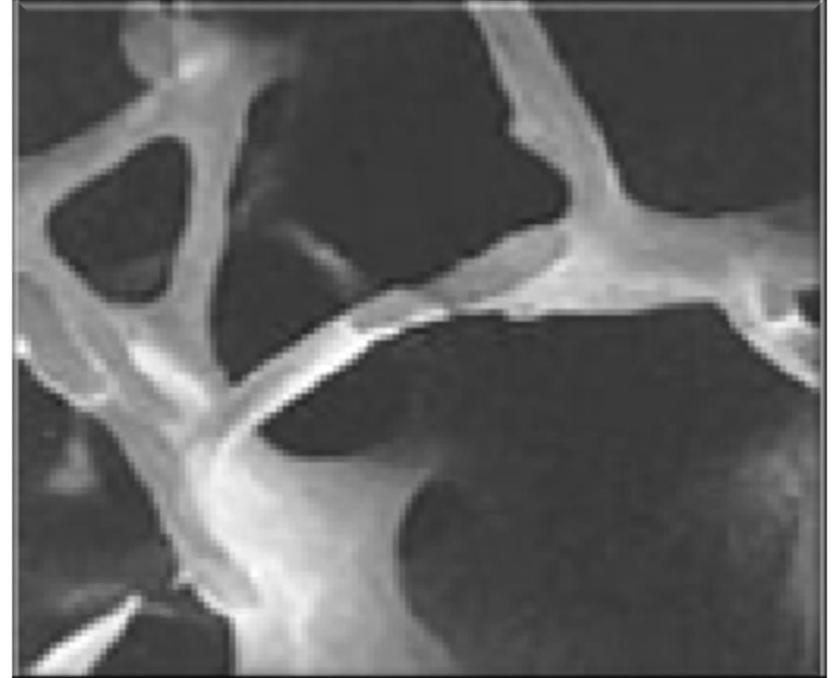
Rachid JENNANE

Laboratoire I3MTO
Université d'Orléans
CHR-Orléans

L'Ostéoporose



Os sain

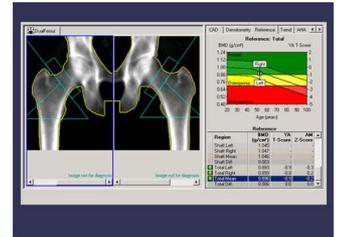


Os avec ostéoporose

- Baisse de densité minérale osseuse
- Altérations du tissu osseux ?

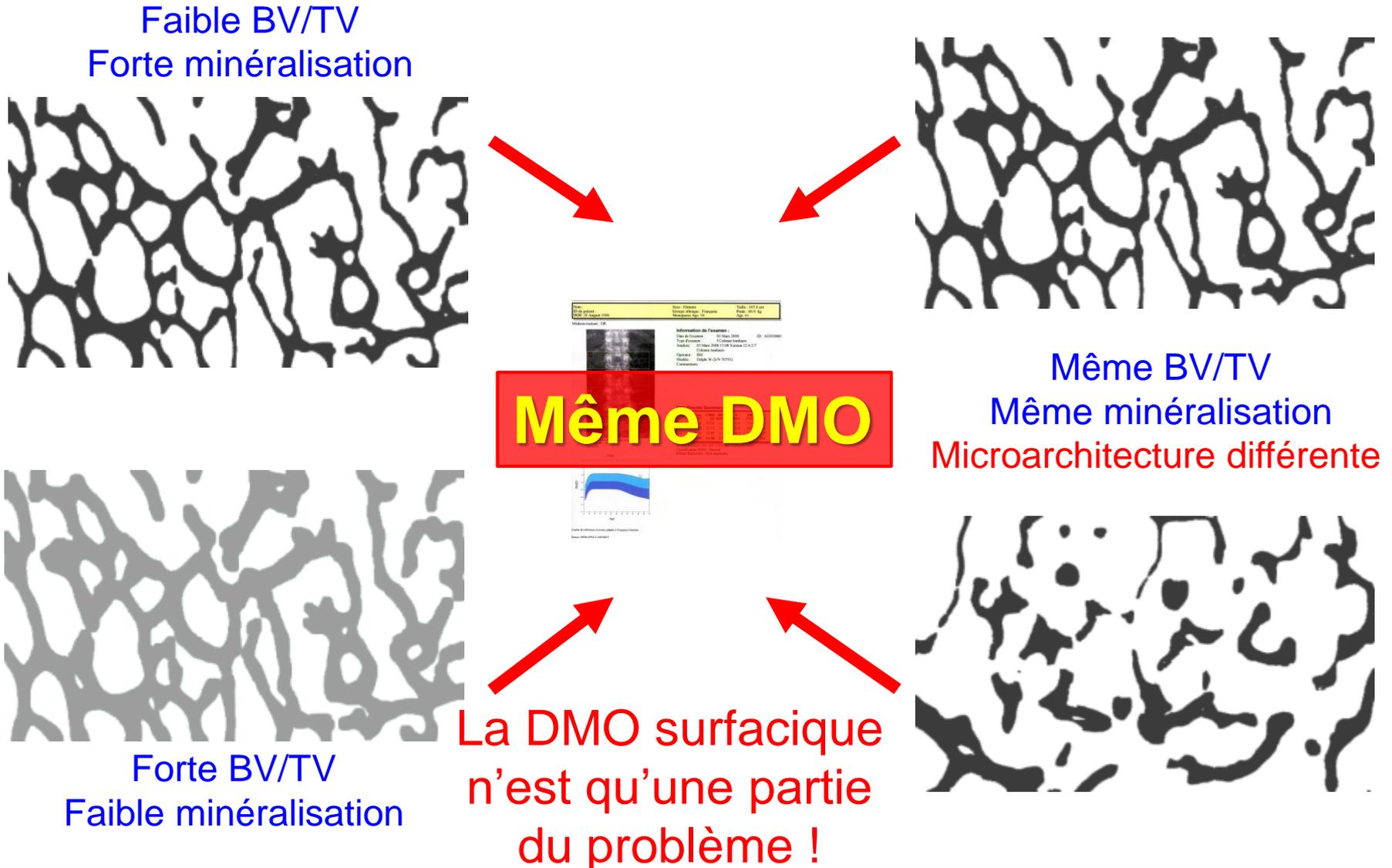
Examen clinique

- La DXA (*Dual energy X-ray Absorptiometry*) = Atténuation de rayons X de deux énergies différentes
- Mesure du T-Score

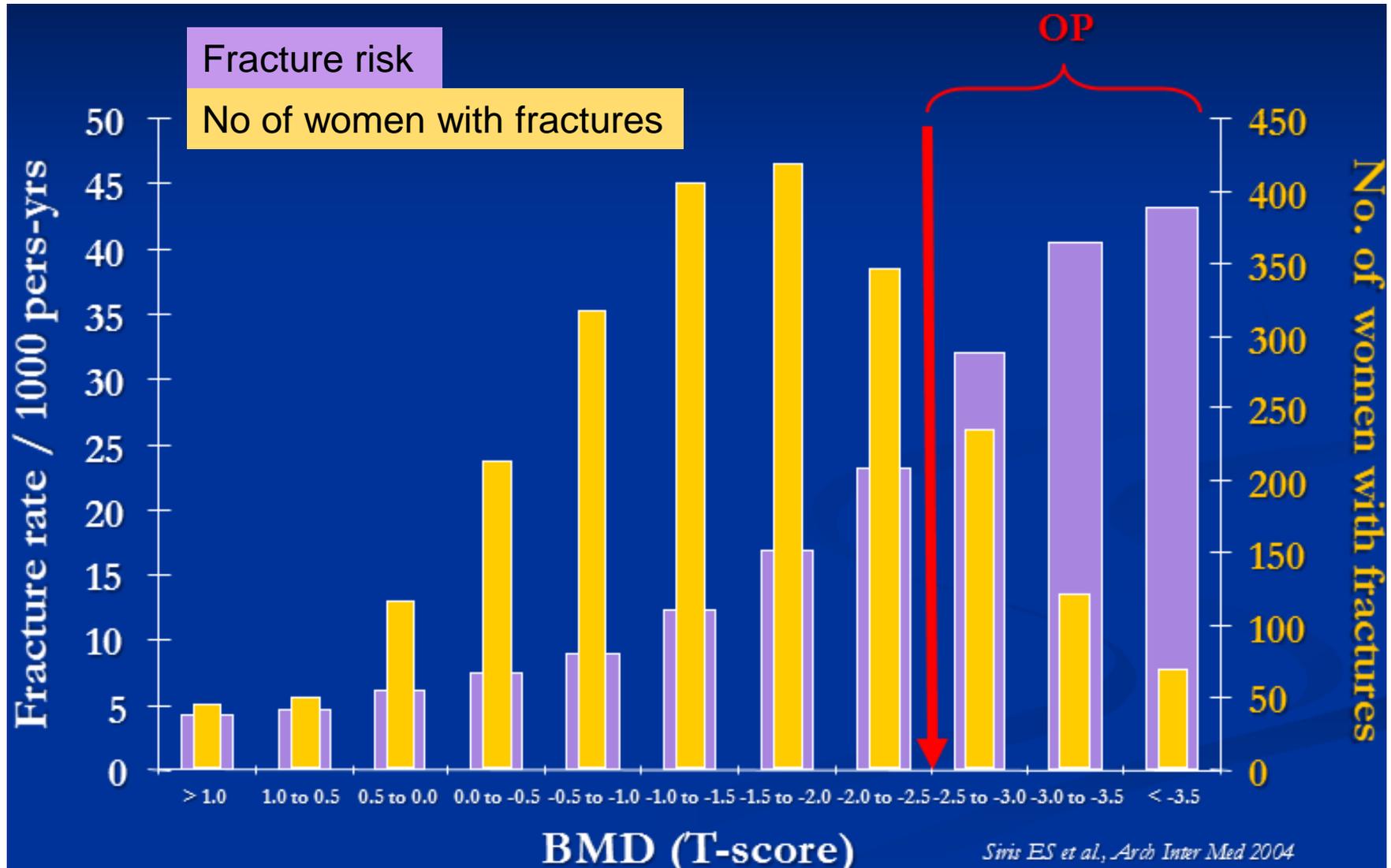


Normalité	T-score ≥ -1
Ostéopénie	$-1 > \text{T-score} > -2,5$
Ostéoporose	T-score $\leq -2,5$
Ostéoporose sévère ou confirmée	T-score $\leq -2,5$ et présence d'une ou plusieurs fractures

Pourquoi étudier la microarchitecture ?



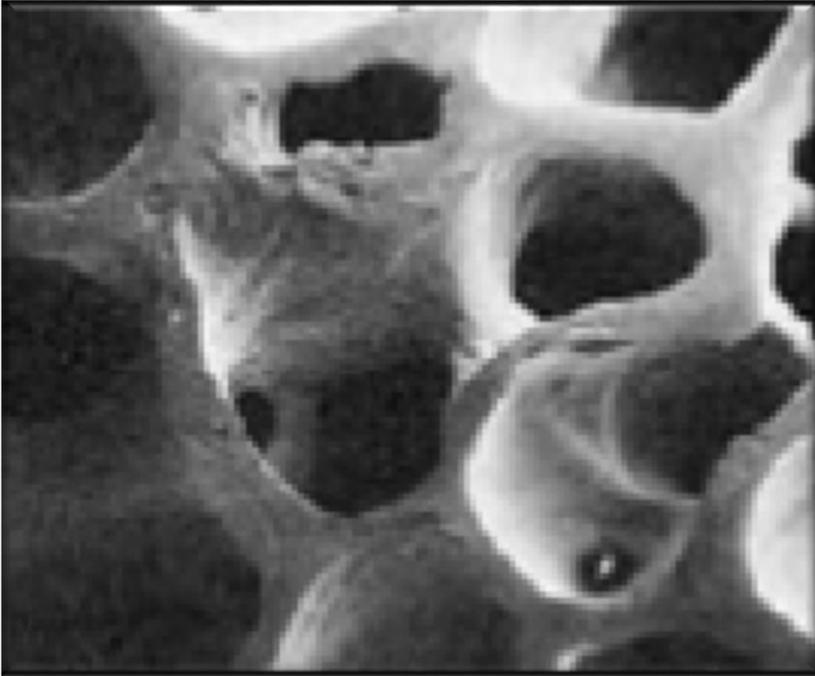
Pourquoi améliorer le diagnostic de l'ostéoporose ?



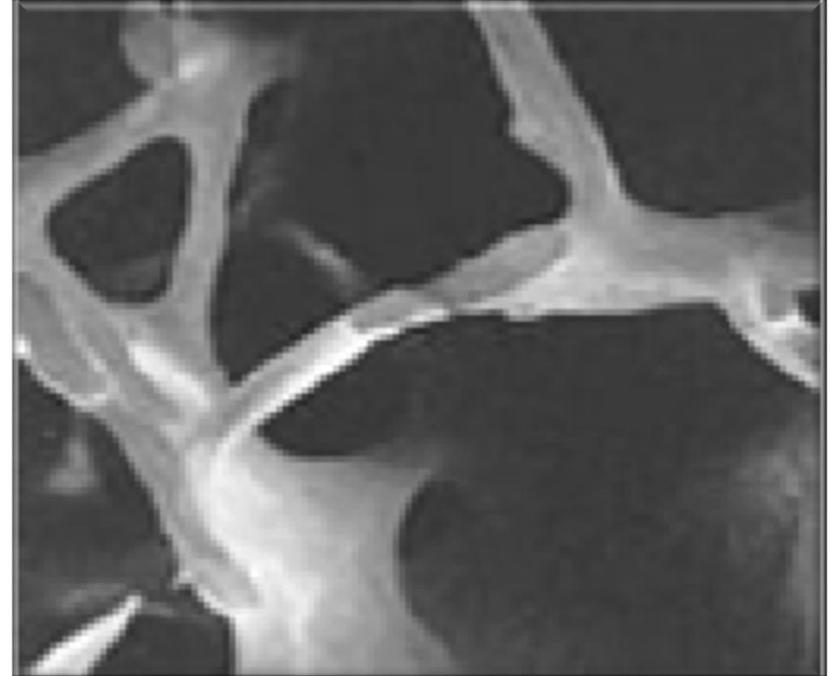
Challenges

■ ■ ■

L'Ostéoporose



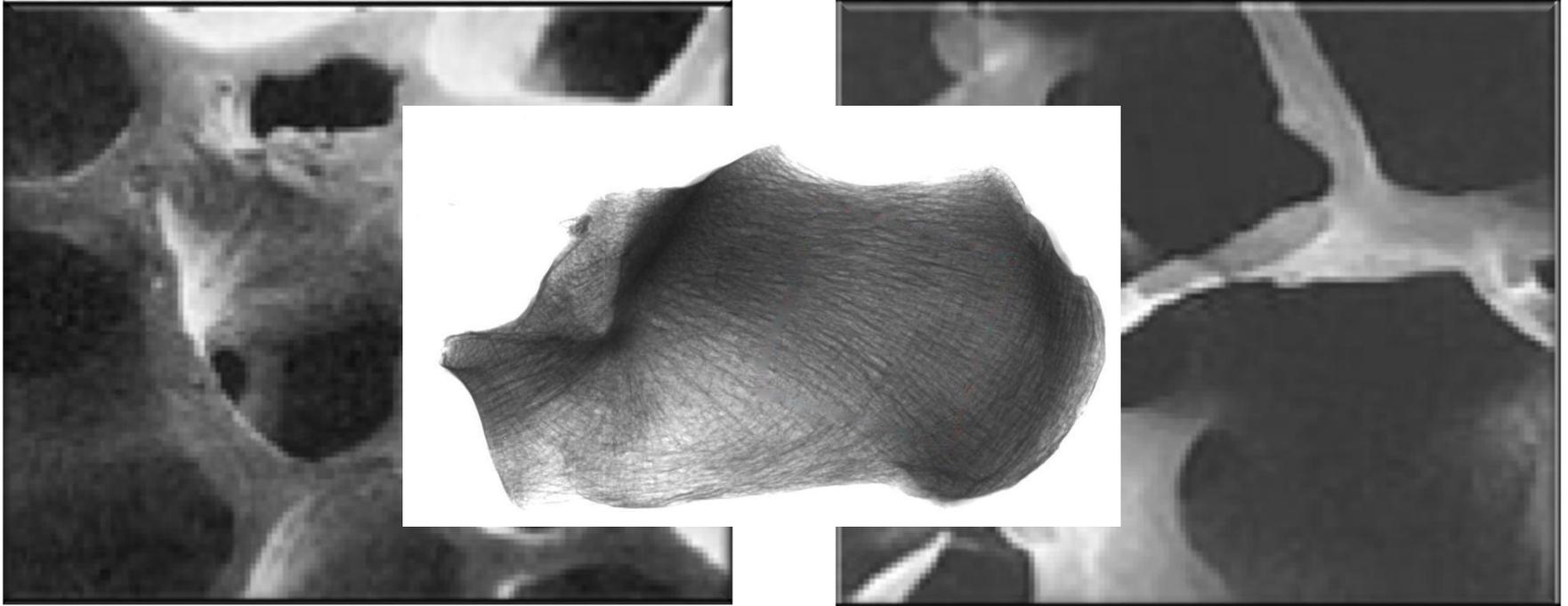
Os sain



Os avec ostéoporose

- Baisse de densité minérale osseuse
- Altérations du tissu osseux ?

L'Ostéoporose

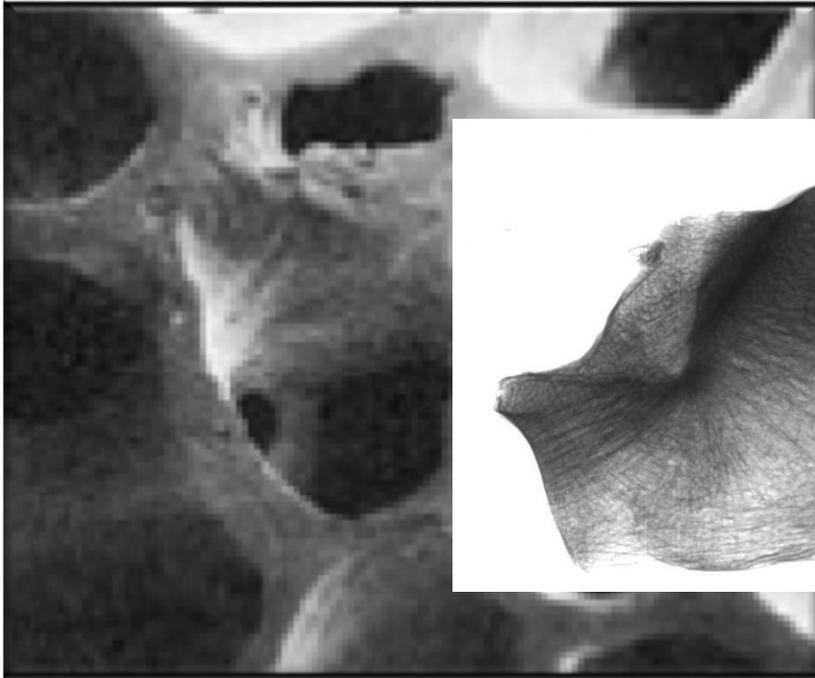


Os sain

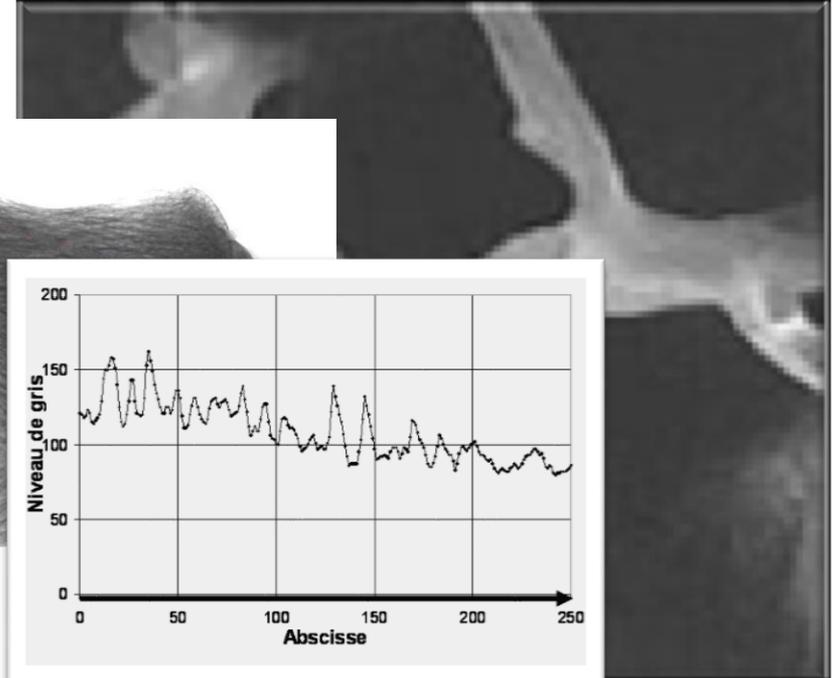
Os avec ostéoporose

- Baisse de densité minérale osseuse
- Altérations du tissu osseux ?

L'Ostéoporose



Os sain



Os avec ostéoporose

- Baisse de densité minérale osseuse
- Altérations du tissu osseux ?

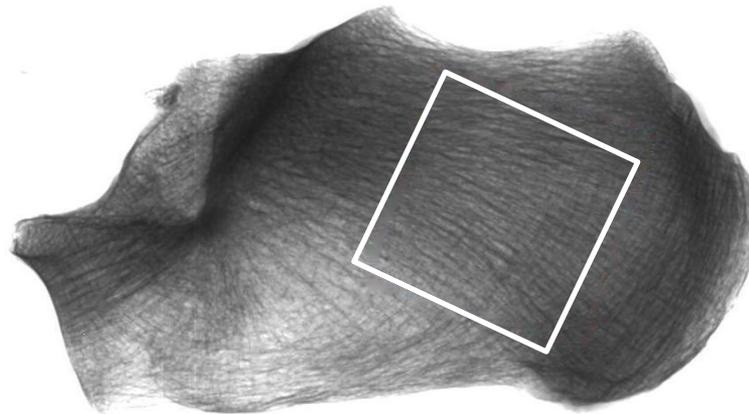
Techniques 1D & 2D

Modèle fractal

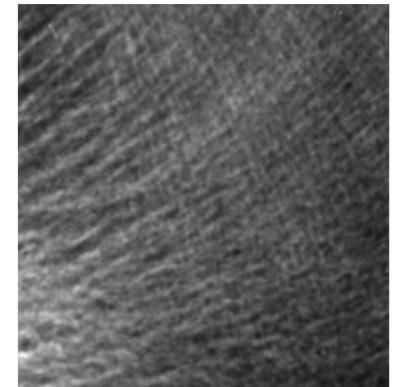
- **Mouvement brownien fractionnaire (mbf)**

- ◆ Centré, gaussien, non stationnaire, incréments stationnaires, self-similaire

$$B_H(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{it\omega} - 1}{(i\omega)^{H+1/2}} dB(\omega)$$

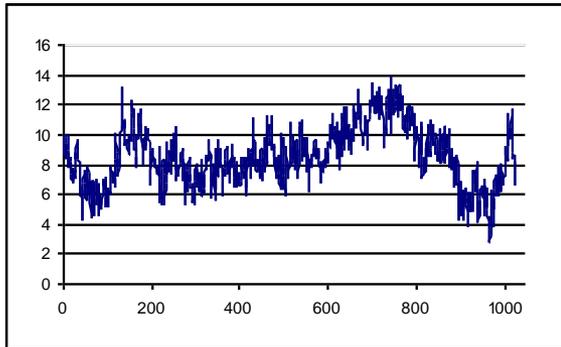


Radiographie d'un calcanéum
avec la région d'intérêt

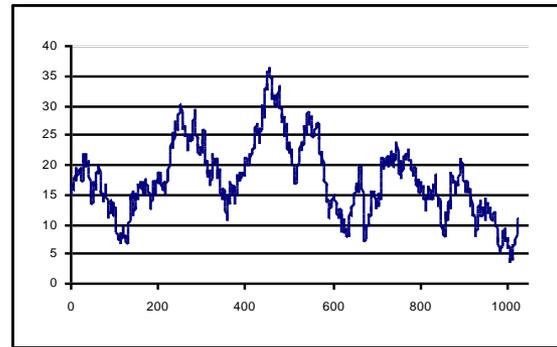
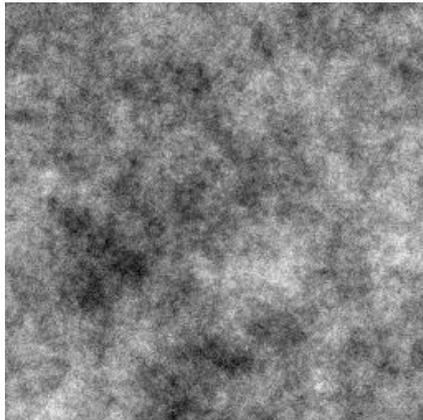


Région d'intérêt

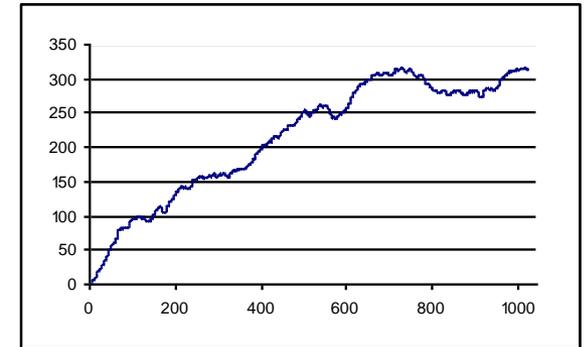
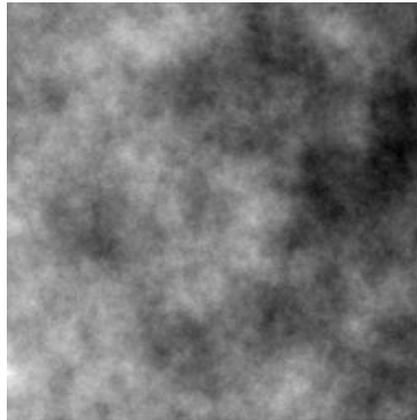
Exemples de réalisations mbf



$H = 0.2$



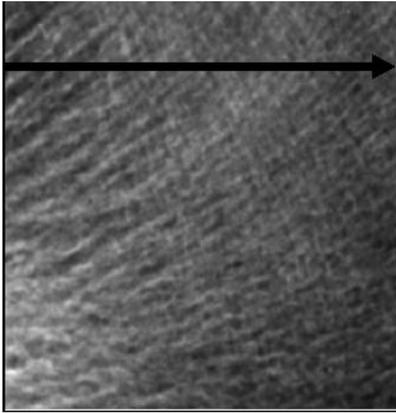
$H = 0.5$



$H = 0.8$

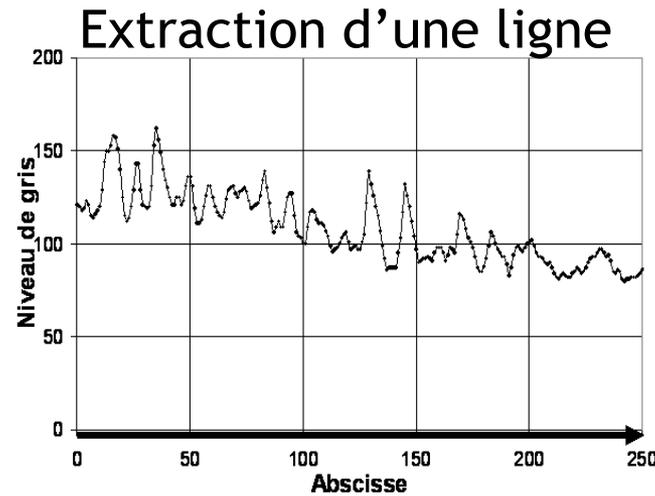


Pourquoi le mbf ?

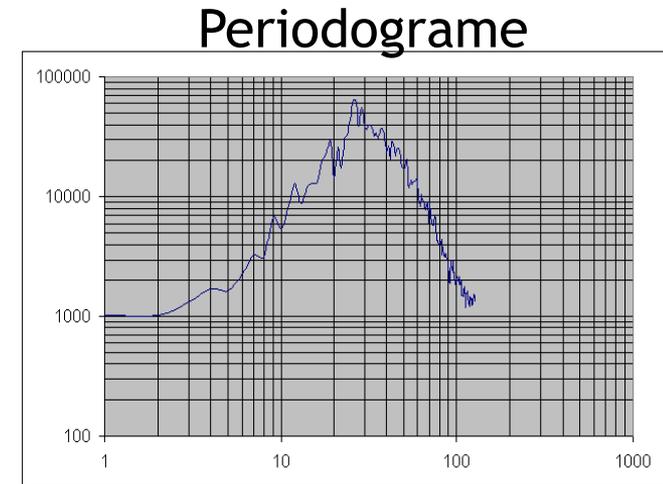


ROI

- Texture
- Complexe
- Contrast
- Anisotrope



Comportement non stationnaire



Comportement en $1/f$

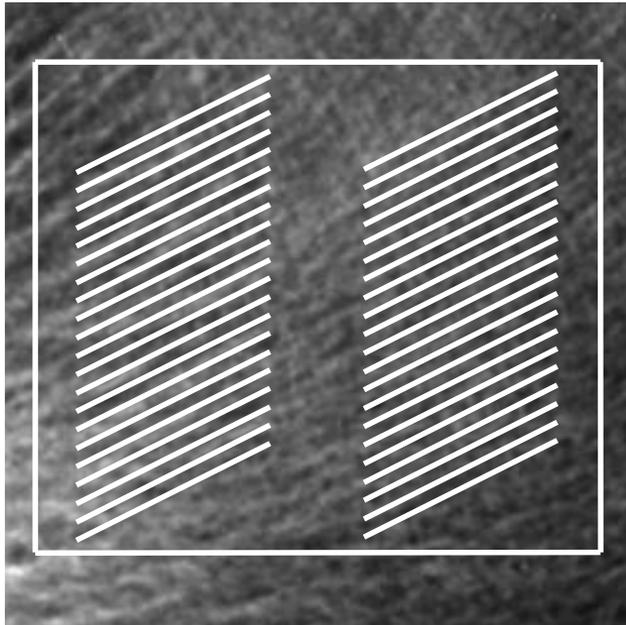
- [Lundahl *et al.*, IEEE-TMI, 1986]
- [Benhamou *et al.*, JBMR, 1994]
- [Jacquet *et al.*, IEEE-EMBS, 1990]
- [Jennane, thesis, 1995]

Analyse

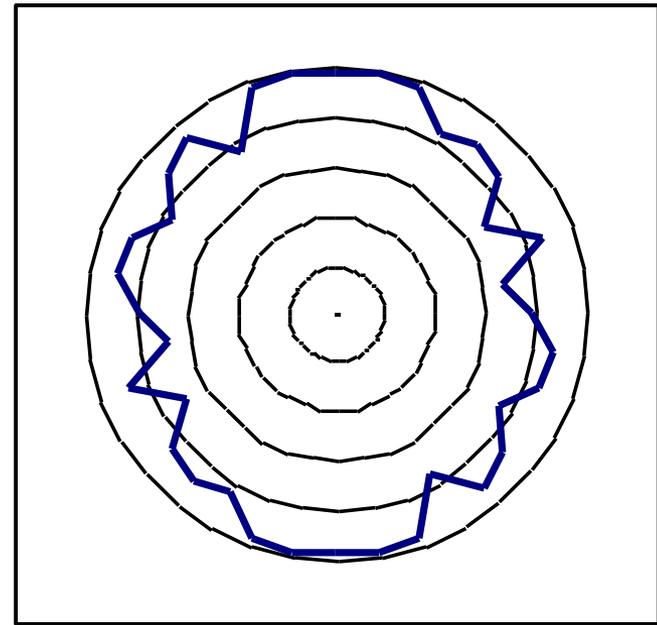
Orientations privilégiées

- Analyse Fractale Orientée (AFO)

- Mesure de la valeur de H dans n directions pour tenir compte des orientations privilégiées

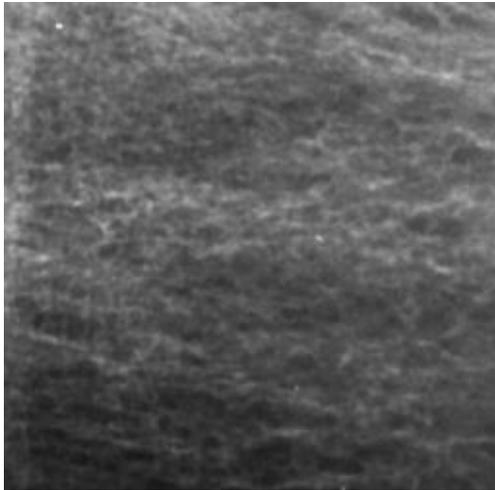


Estimation de la régularité dans différentes directions

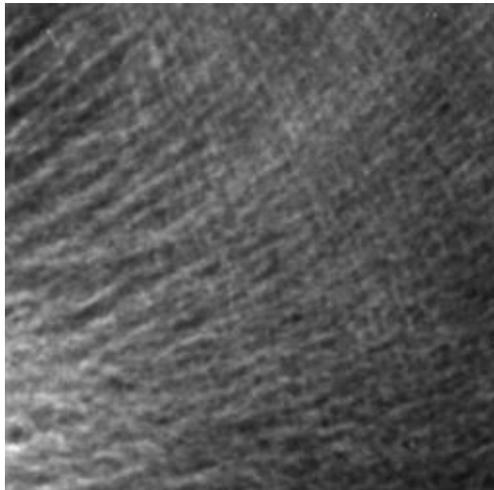
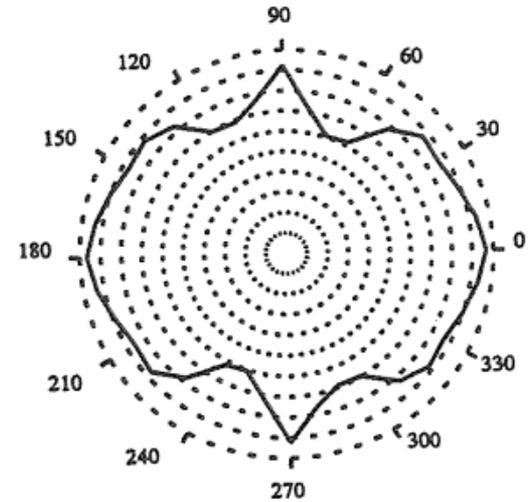


Variation de H en fonction de l'angle d'analyse

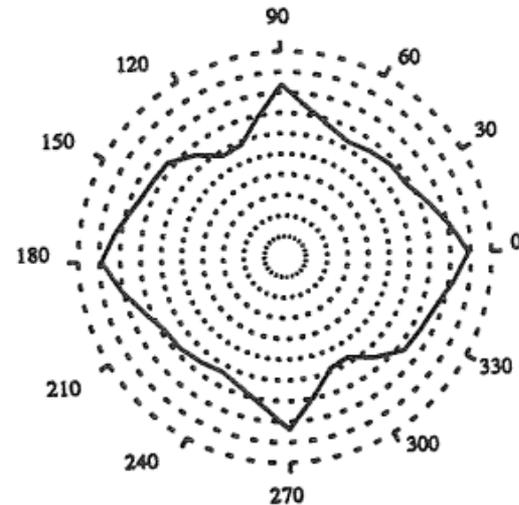
AFO : Résultats



Radius



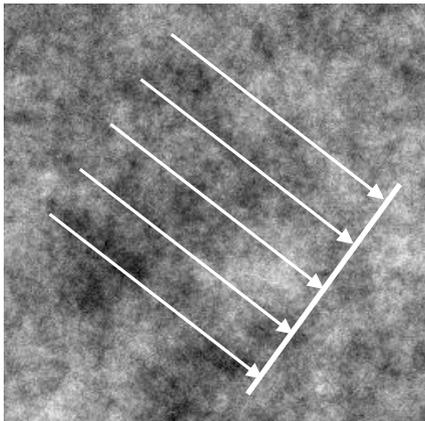
Calcanéum



Anisotropie

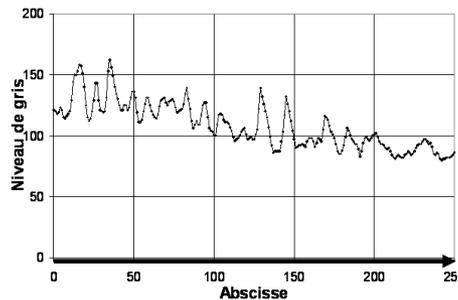
- Méthode des Moyennes Directionnelles (MMD)

- Mesure de la valeur de H par projection de l'image dans différentes orientations



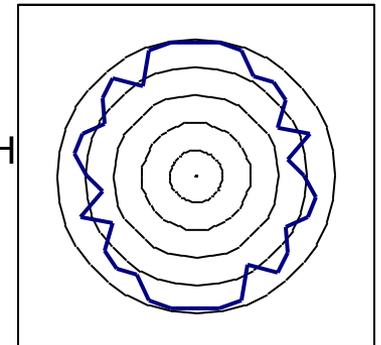
Projection le long d'une direction

Projection



Signal projeté

Estimation de H



Variation de H en fonction de l'angle de projection

$$H_{(n-1)D} = H_{nD} + 0.5$$

nD : Dimension n

♦ [Jennane et al., Med Image Analysis, Elsevier, 2007.]

Limite du modèle mbf

$$0 < H < 1$$

...

Modèle n-mBf

• Définition

$$B_H^n(t) - B_H^n(0) = \frac{1}{\Gamma(H + 1/2)} \left\{ \int_{-\infty}^0 \left[(t-u)^{H-1/2} - (-u)^{H-1/2} - \dots - (H-1/2)\dots(H-n+3/2) \frac{t^{n-1}}{(n-1)!} \right] dB(u) + \int_0^t (t-u)^{H-1/2} dB(u) \right\}, n-1 < H < n$$

$$n-1 < H < n$$

- Gaussien, centré, non stationnaire, auto-similaire
- Incréments non stationnaires !!!
- n-th incréments stationnaires

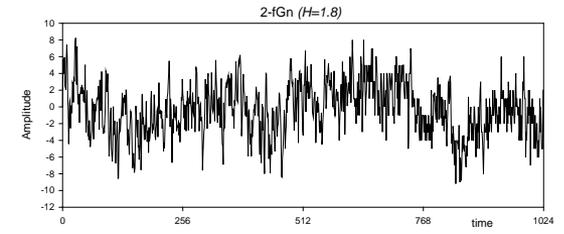
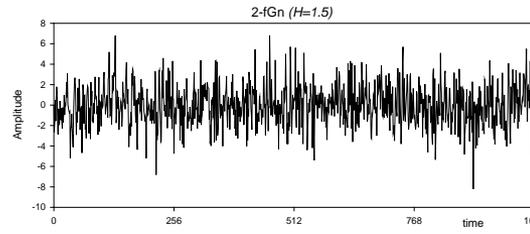
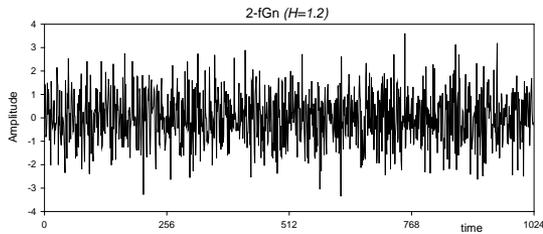
- Exemple, incréments seconds

$$\Delta^2 B_H^2(t) = B_H^2(t+1) - 2B_H^2(t) + B_H^2(t-1)$$

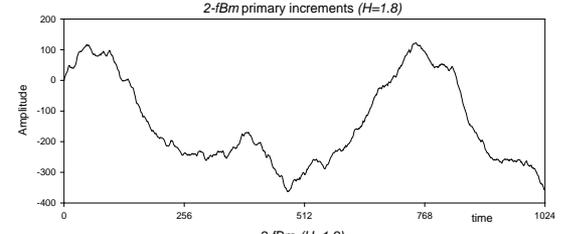
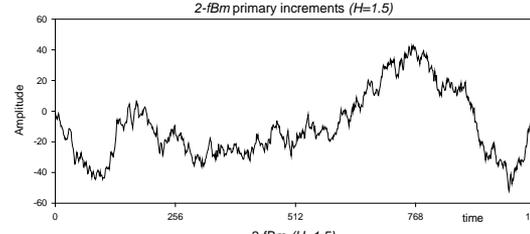
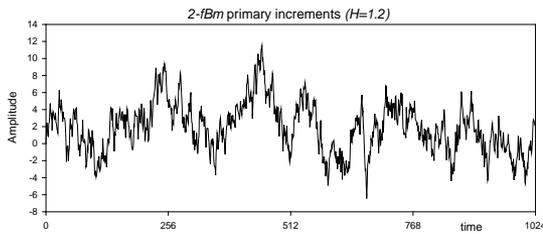
♦ [Perrin, Jennane et al., IEEE Trans. Signal Processing, 2001.]

Exemples de réalisations 2-mBf

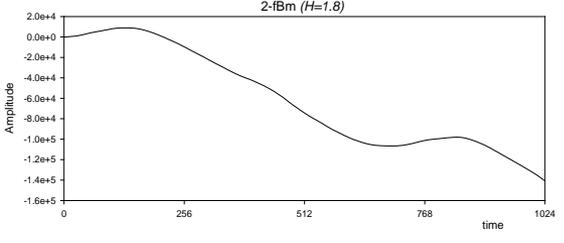
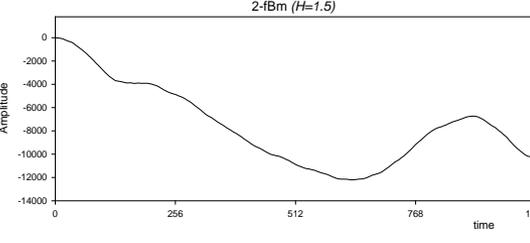
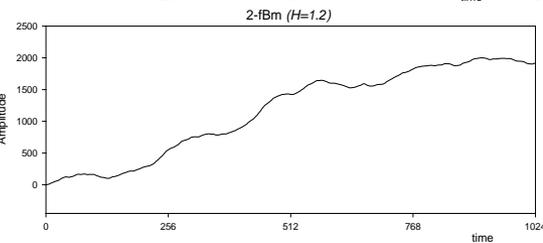
2-bgf



1-bgf



2-mbf



H=1.2

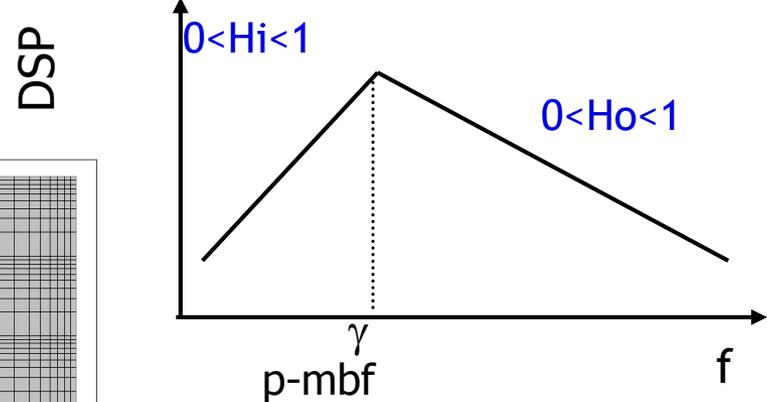
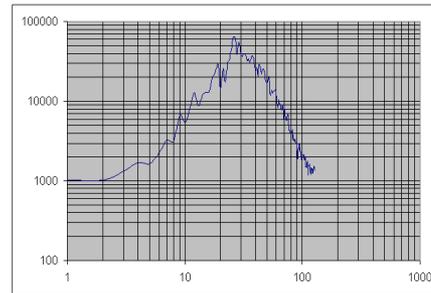
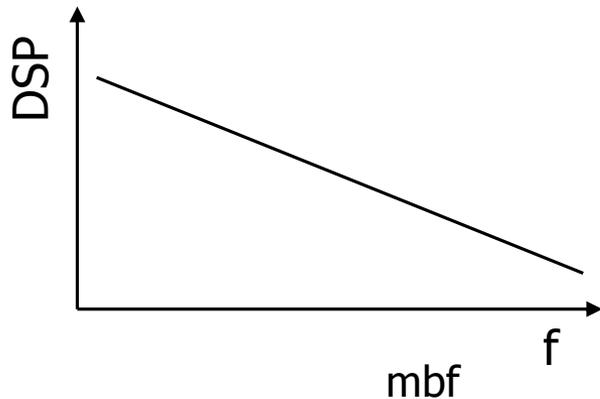
H=1.5

H=1.8

Limite du modèle mbf
1 seul spectre en $1/f^\alpha$

...

Modèle fractal par morceaux



$$B_H(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{it\omega} - 1}{(i\omega)^{H+1/2}} dB(\omega)$$

$$B^{Ho,Hi,\gamma}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F^{Ho,Hi,\gamma}(\omega) (e^{it\omega} - 1) d\beta(\omega)$$

• Propriétés

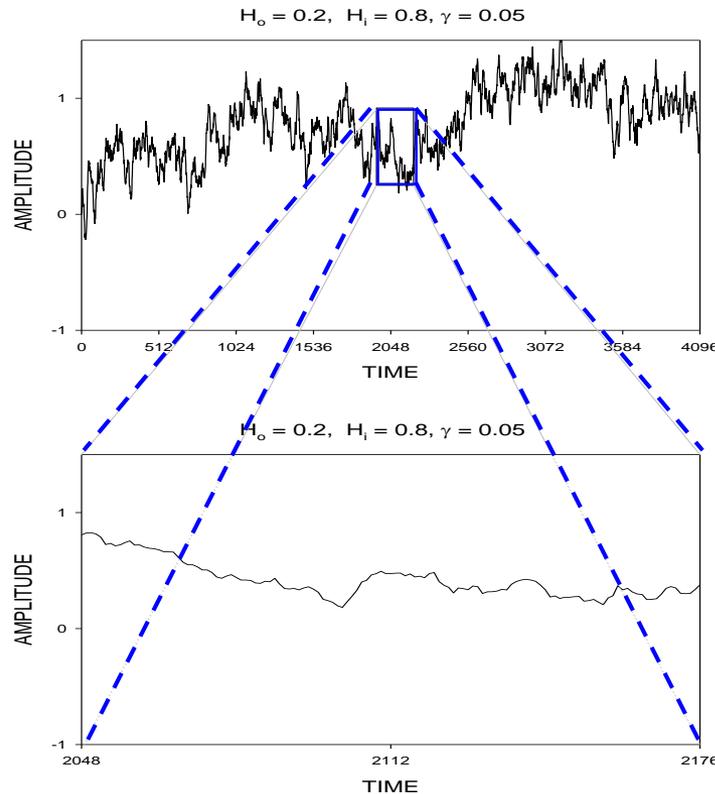
- Gaussien
- Non stationnaire
- incréments stationnaires
- Auto-similaire

$$F^{Ho,Hi,\gamma}(\omega) = \frac{1_{[0,\gamma)}(\omega)}{(i\omega)^{Ho+1/2}} + \gamma^{Hi-Ho} \frac{1_{[\gamma,+\infty)}(\omega)}{(i\omega)^{Hi+1/2}}$$

$$Ho, Hi \in]0,1[$$

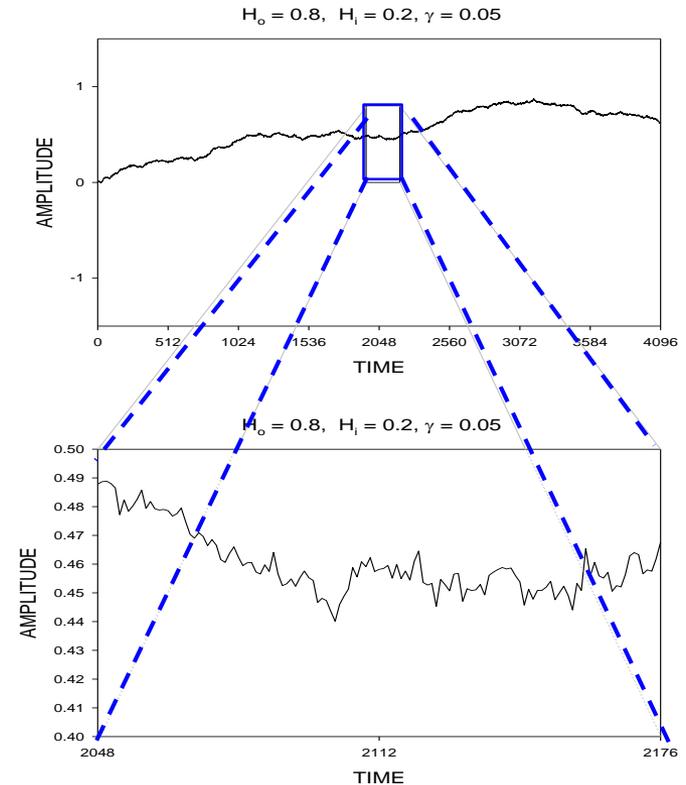
- ◆ [Perrin, Jennane et al., IEEE Trans. on Signal Proces[sing], 2005.]
- ◆ [Harrar, Hamami, Jennane, BSPC, Elsevier, 2013]

Exemples de réalisations p-mBf



$H_o=0.2 ; H_i=0.8 ; \gamma =0.05$

- Zoom avant
- Similaire à un mbf de paramètre H_i

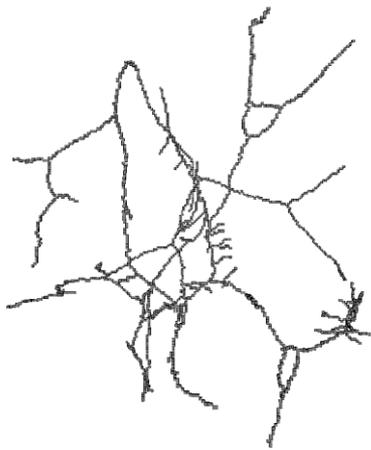


$H_o=0.8 ; H_i=0.2 ; \gamma =0.05$

- Zoom arrière
- Similaire à un mbf de paramètre H_o

Techniques 3D

Squelettisation



Squelette filaire



Squelette surfacique

Classification

$$\Omega = \Omega_{pt} \cup \Omega_{pl}$$

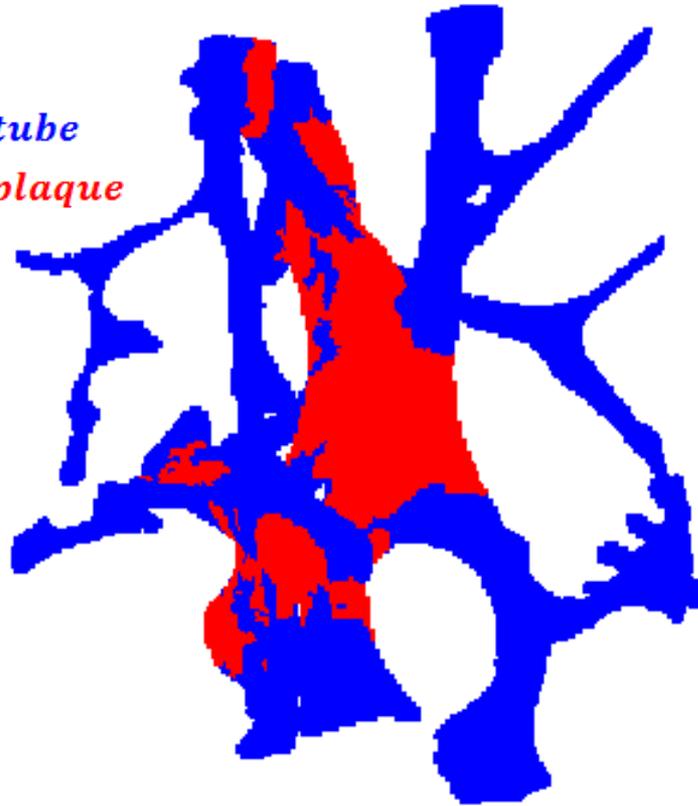
$$\beta_0(\Omega(m)) = 1, \beta_1(\Omega(m)) = 1,$$

$$\beta_0(\Omega(m)) = 2, \beta_1(\Omega(m)) = 1,$$

...

tube

plaque



- Prise en compte de la mixité des formes

Classification

$$\Omega = \Omega_{pt} \cup \Omega_{pl}$$

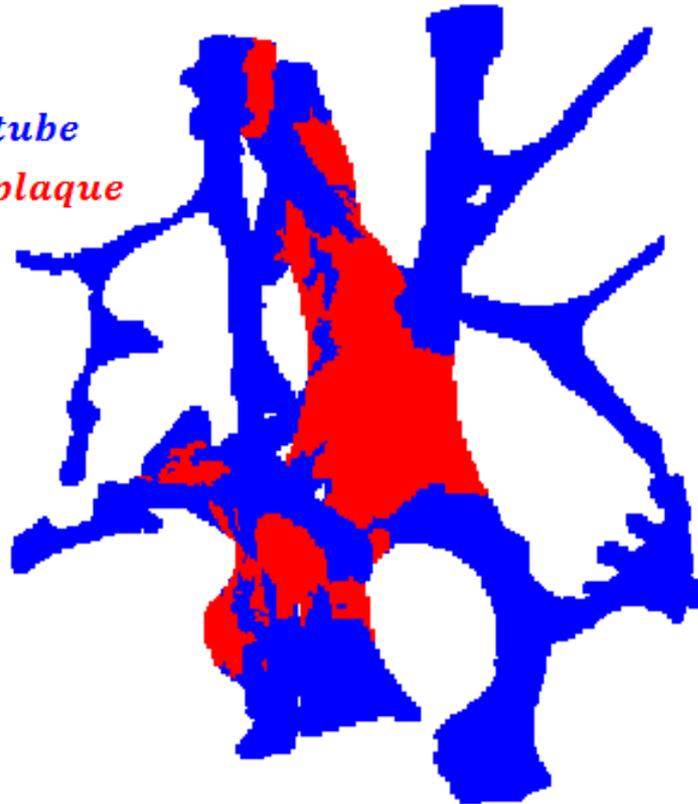
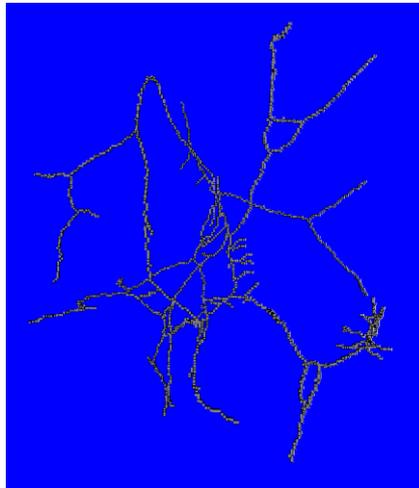
$$\beta_0(\Omega(m)) = 1, \beta_1(\Omega(m)) = 1,$$

$$\beta_0(\Omega(m)) = 2, \beta_1(\Omega(m)) = 1,$$

...

tube

plaque



– Guidage du processus de squelettisation

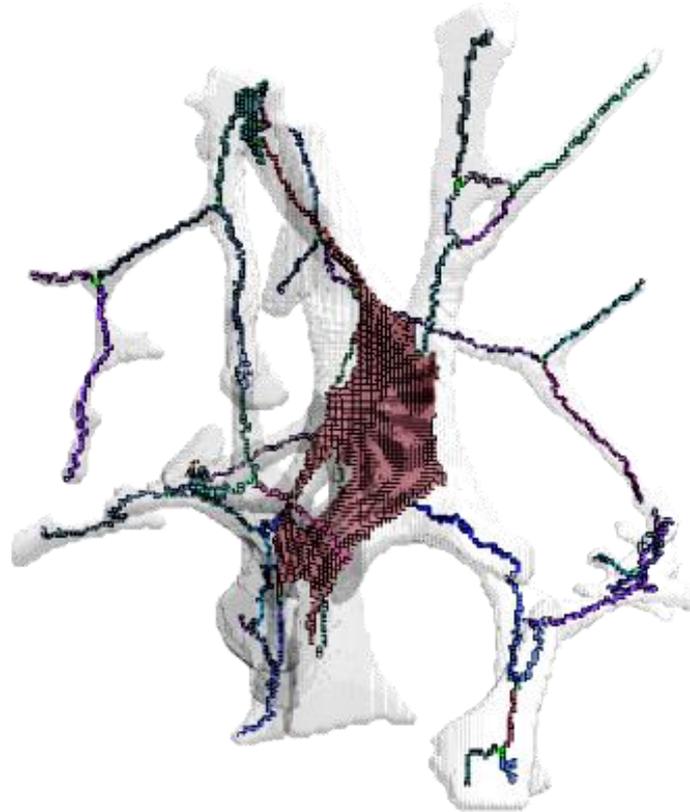
Squelettisation hybride



– Simplification du milieu (squelette hybride)

- ◆ [Jennane et al., Med Physiques, 2012.]
- ◆ [Jennane et al., Med Syst, Elsevier, 2010.]

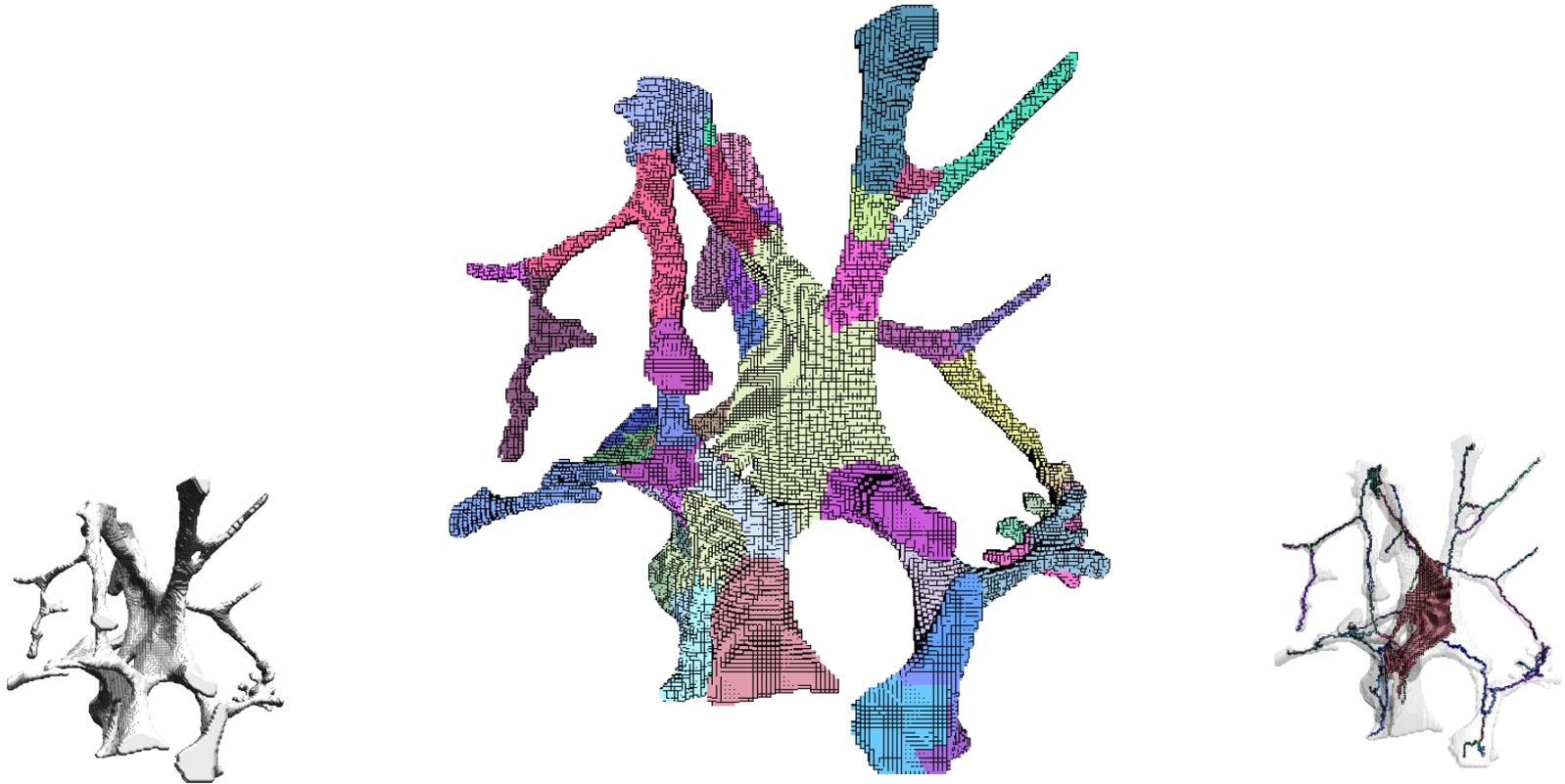
Labellisation



– Jonctions plaque-poutre, poutre-poutre, etc.

- ◆ [Jennane et al., Med Physiques, 2012.]
- ◆ [Jennane et al., Med Syst, Elsevier, 2010.]

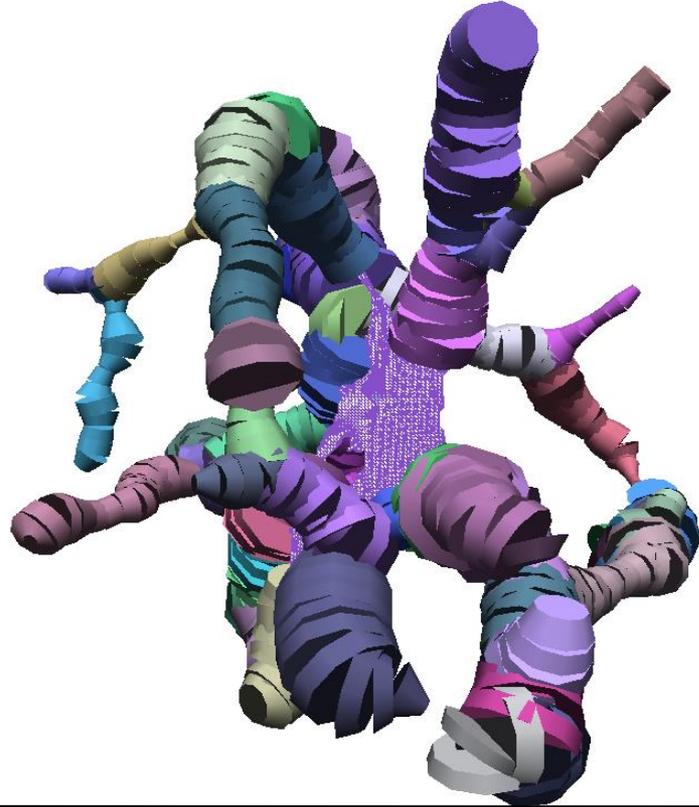
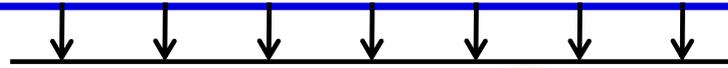
Segmentation



– De nombreux paramètres morphologiques et topologiques

- ◆ [Jennane et al., Med Physiques, 2012.]
- ◆ [Jennane et al., Med Syst, Elsevier, 2010.]

Biomécanique



Estimation virtuelle
de la rigidité
mécanique osseuse
à l'aide de modèles
simples

$$E_{app} = \frac{\sum RF / l^2}{\Delta l / l}$$

– Transformation en éléments mécaniques
« Poutres-Coques »

- ◆ [Jennane et al., Med Syst., Elsevier, 2011.]
- ◆ [Aufort, Jennane et al., EUSIPCO, 2007.]

Résultats

Etudes cliniques

Sur radiographies numériques

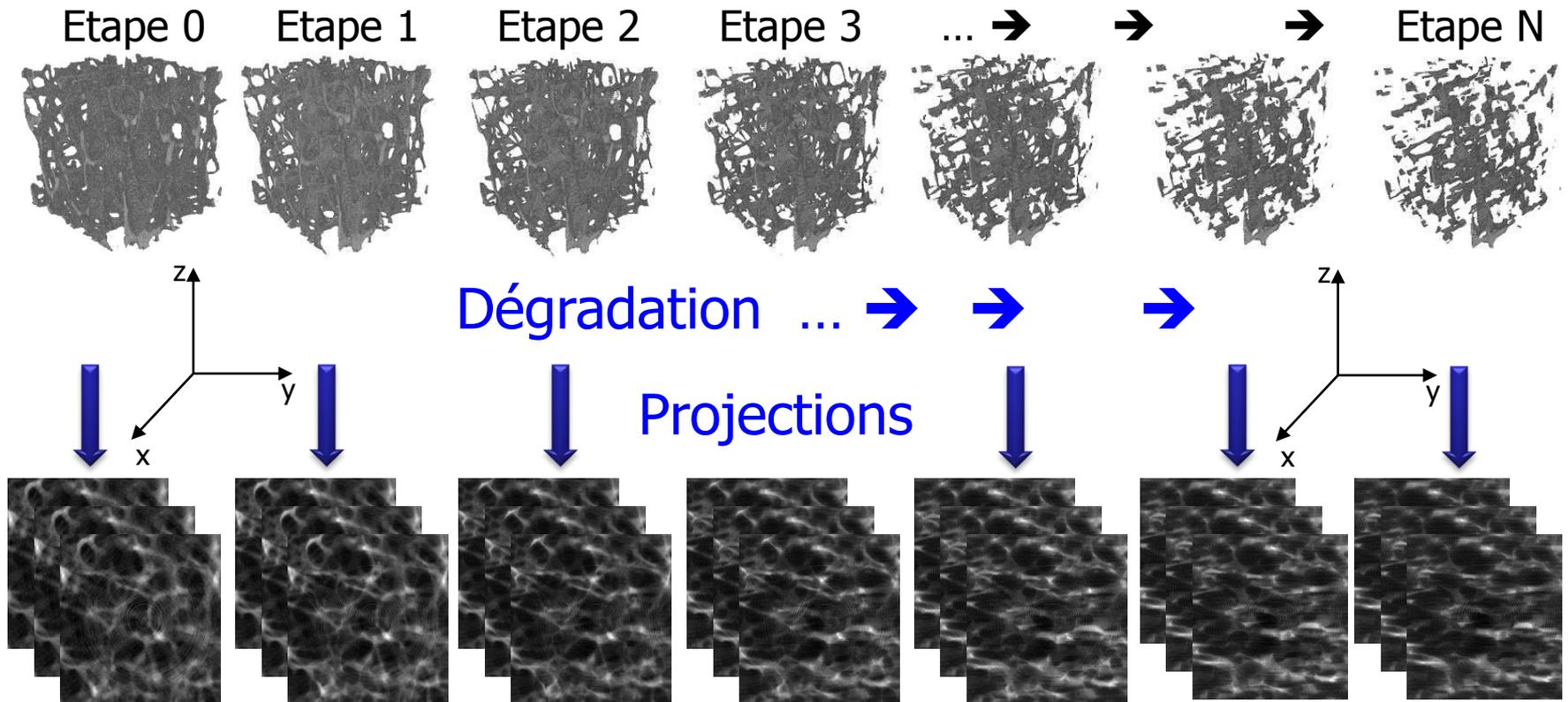
- Etude 1
 - 39 ostéoporotiques, 70 témoins
- Etude 2
 - 116 femmes post ménopausées sans fractures
 - 27 femmes post ménopausées avec fractures

	Etude 1	Etude 2
Techniques	Test de Student Valeurs de t ($ t > 2.01$)	Test de Man et Whitney Valeurs de p ($p < 0.05$)
Analyse Fractale Orientée	-3.62	0.001
Matrices de co-occurrence	-7.34	<0.0001
Matrices de longueurs de plages	3.00	<0.0001

- ◆ [Benhamou, Jennane et al., Osteoporosis International, 2006.]
- ◆ [Harba, Jennane et al., ITBM, 1999.]

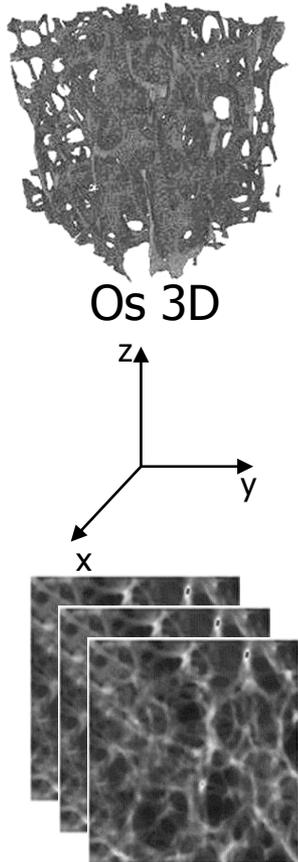
Corrélations 2D-3D

- Images tomographiques du synchrotron de Stanford
- 7 radius humains, résolution 17 μm



Projections après traitement dans les 3 directions orthogonales

Corrélations 2D-3D: Résultats



- Paramètres 3D conventionnels
 - BV/TV: Bone Volume/Trabecular Volume
 - Tb.Th: Trabecular Thickness
 - Tb.Sp: Trabecular Spacing
 - Tb.N: Trabecular Number
 - Conn.D: Connectivity Density

	BV/TV	Tb.Th	Tb.Sp	Tb.N	Conn.D
Hx	0.925±0.021	0.727±0.391	-0.953±0.041	0.967±0.013	0.563±0.279
Hy	0.991±0.007	0.858±0.317	-0.788±0.069	0.956±0.015	0.316±0.397
Hx	0.982±0.011	0.807±0.351	-0.881±0.055	0.991±0.006	0.461±0.341

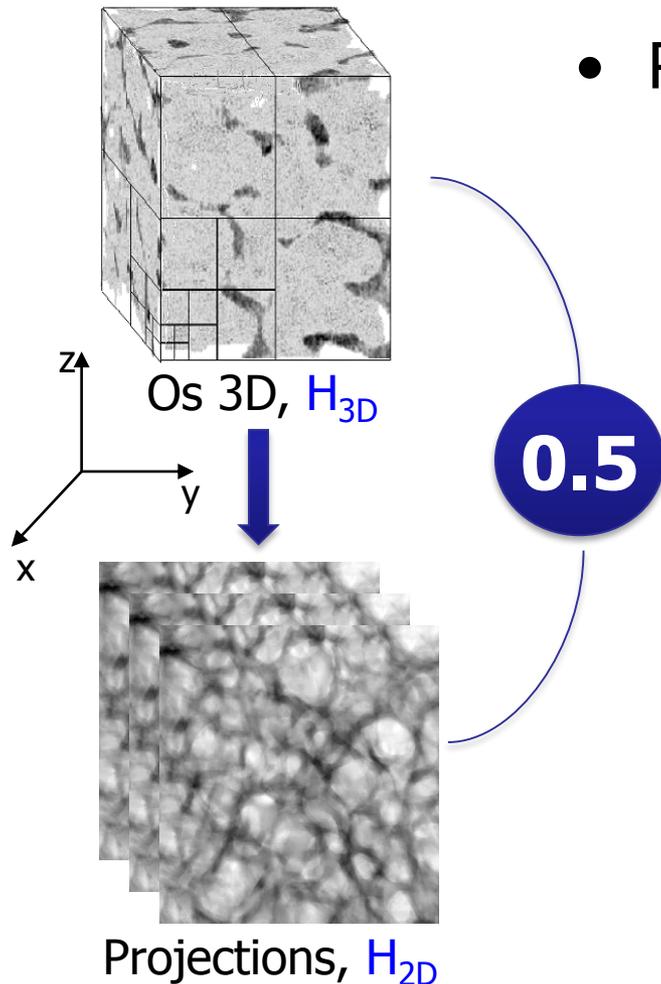
Projections, Hx, Hy, Hz

Coefficients de corrélation entre (Hx, Hy, Hz)
et (BV/TV, Tb.Th, Tb.Sp, Tb.N, Conn.D)

- ♦ [Jennane et al., IEEE-Trans. Med. Ima, 2001.]
- ♦ [Pothuau et al., JBMR, 2000.]

Liens 2D-3D : Résultats

- 21 carottes osseuses de têtes fémorales
- Résolution 12 μm



• Théorème

$$H_{3D} = H_{2D} - 0.5$$

	$H_{2D} - H_{3D}$ Suivant x	$H_{2D} - H_{3D}$ Suivant y	$H_{2D} - H_{3D}$ Suivant z
Moyenne	0.521	0.501	0.482
Std	0.049	0.044	0.036

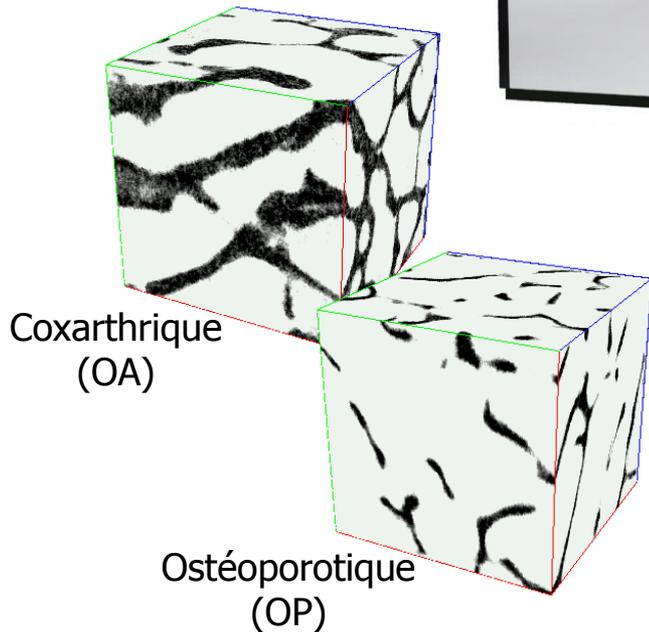
Moyennes et écarts types le long des axes orthogonaux

♦ [Jennane et al., Medical Image Analysis, 2007.]

Biomécanique : Résultats

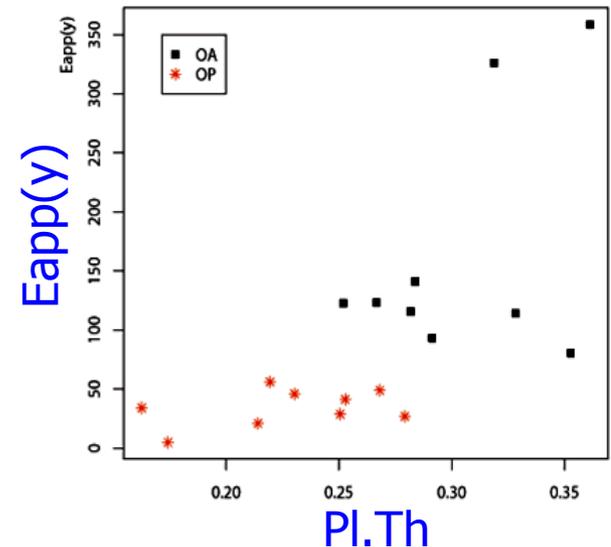


	Retained Features	% of well classified subjects			
		without cross-validation		with cross-validation	
		OA	OP	OA	OP
MIL	BV/TV	78	78	78	78
LSGA	Ro.Th	89	78	89	78
HSGA	Pl.Th	78	78	78	78
LSGA_M	Ro.S	100	67	100	67
LSGA_MS	Ro.S	100	67	100	67
HSGA_M	Pl.Th	89	78	78	78
HSGA_MS	Pl.Th, Eapp(y)	100	100	89	100



2 populations :

- 9 coxarthriques et 9 ostéoporotiques
- résolution 12 μm , taille 400^3 voxels



Courbe de Fisher

- ◆ [Jennane et al., Med Syst, Elsevier 2009]
- ◆ [Aufort, Jennane et al., EUSIPCO, 2009]

Caractérisation morphologique et topologique du tissu osseux

Rachid JENNANE

Laboratoire I3MTO
Université d'Orléans
CHR-Orléans