

La microtomographie par rayons X

Principes, outils, applications à la physiologie
des arbres

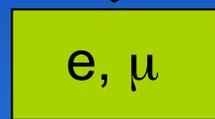
Eric BADEL¹ et Christine GIROUSSE²

¹ UMR PIAF, INRA-UBP 5 chemin de Beaulieu, Clermont Ferrand

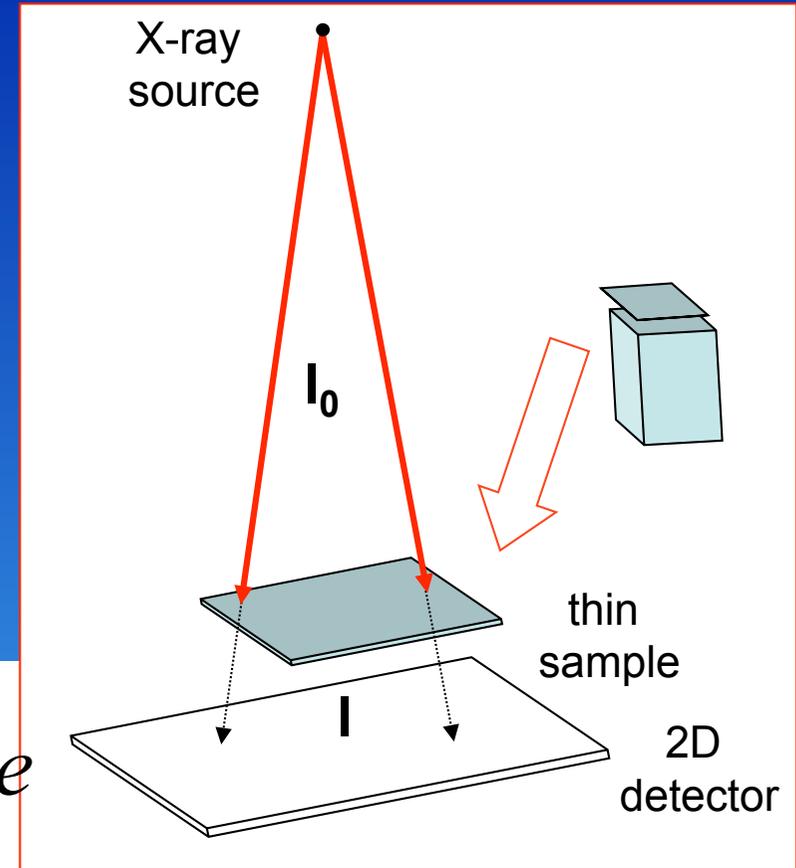
² UMR GDEC, INRA-UBP 5 chemin de Beaulieu, Clermont Ferrand

Projection simple 2D : la radiographie X

Röntgen 1895



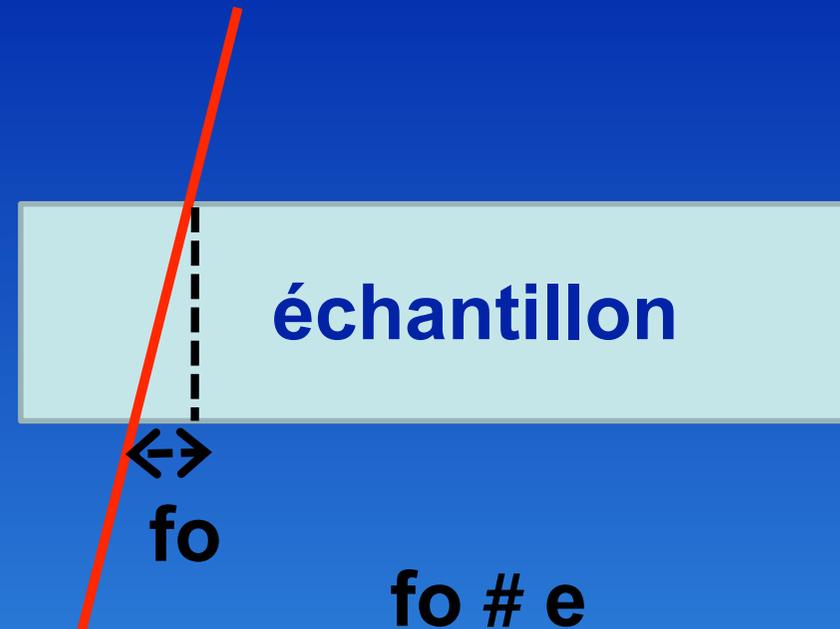
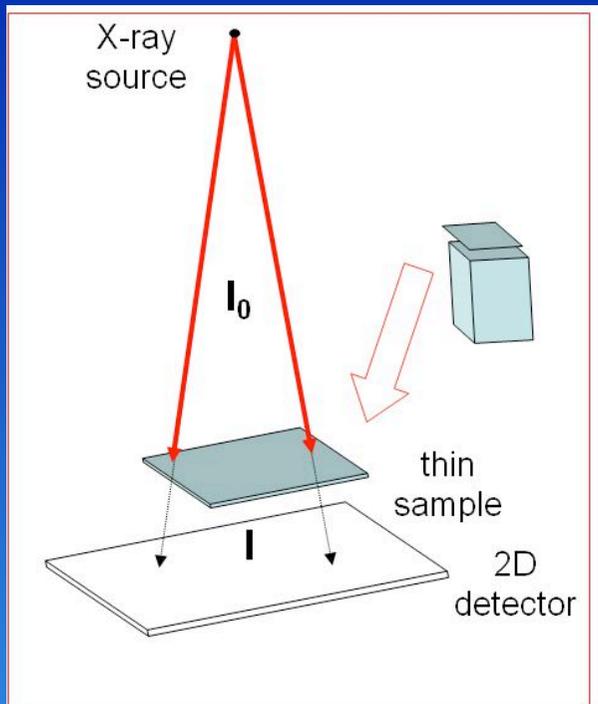
$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\mu e$$



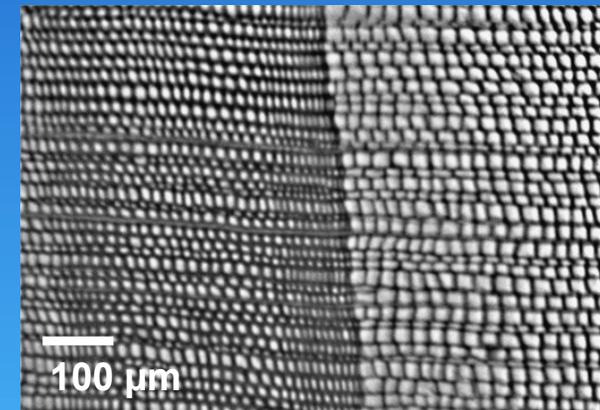
Absorption μ fonction de :

- la composition atomique
- la densité
- l'énergie du rayonnement

Projection simple 2D : la radiographie X



rayon X

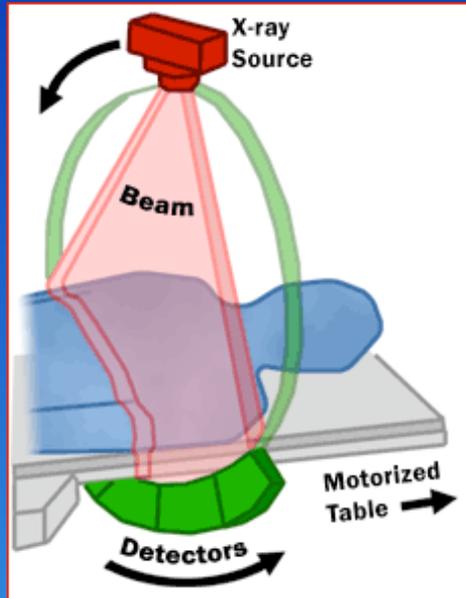


$$\text{résolution pixel} = \frac{\text{résolution détecteur}}{G}$$

- Mesure intégrale dans l'épaisseur
- Résolution spatiale définie par celle du détecteur et le grossissement par le faisceau X

Tomographie à rayons X en 2D

Scanner médical
(submillimétrique)

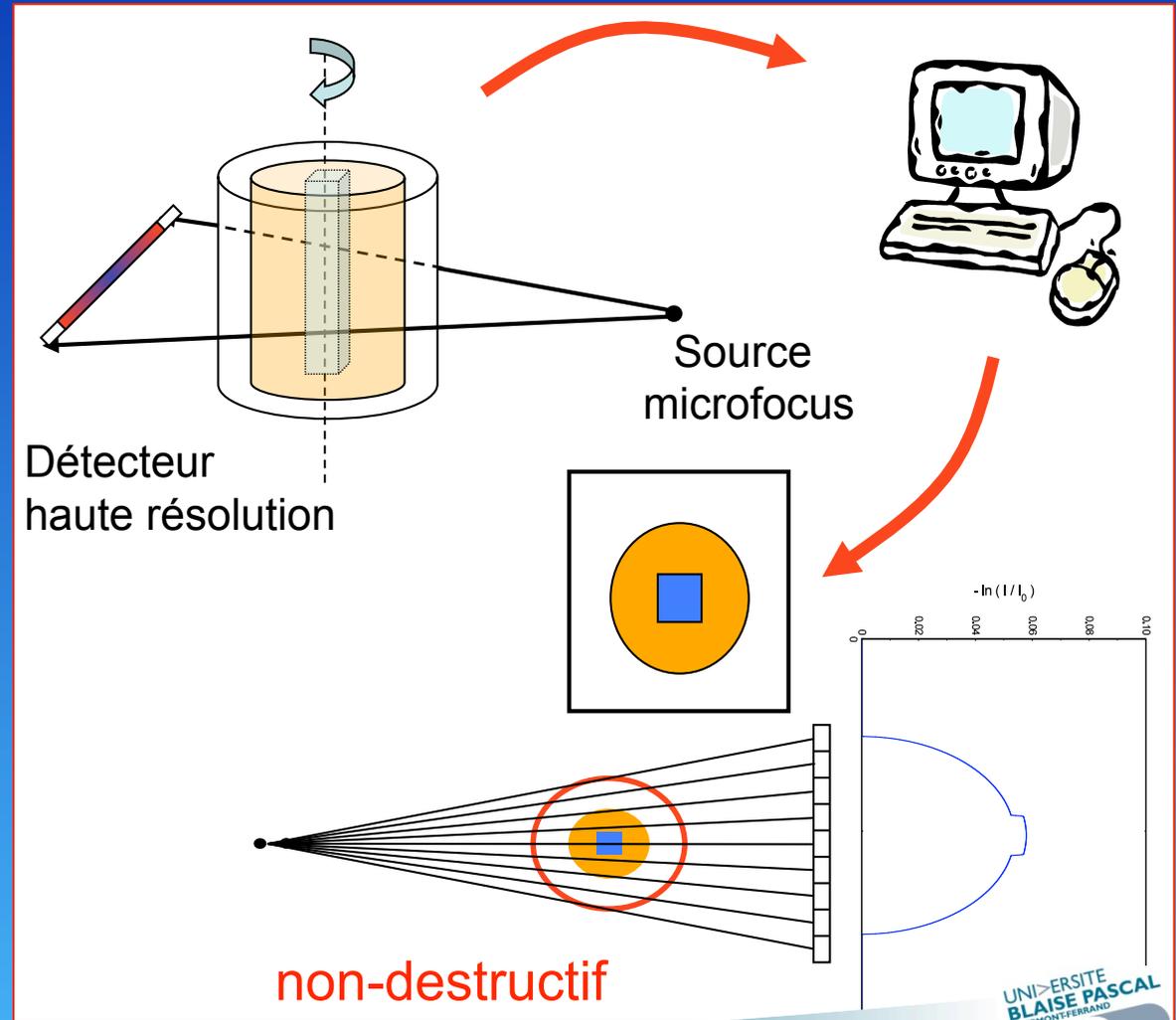


Supreme Council of Antiquities



tomé: coupe

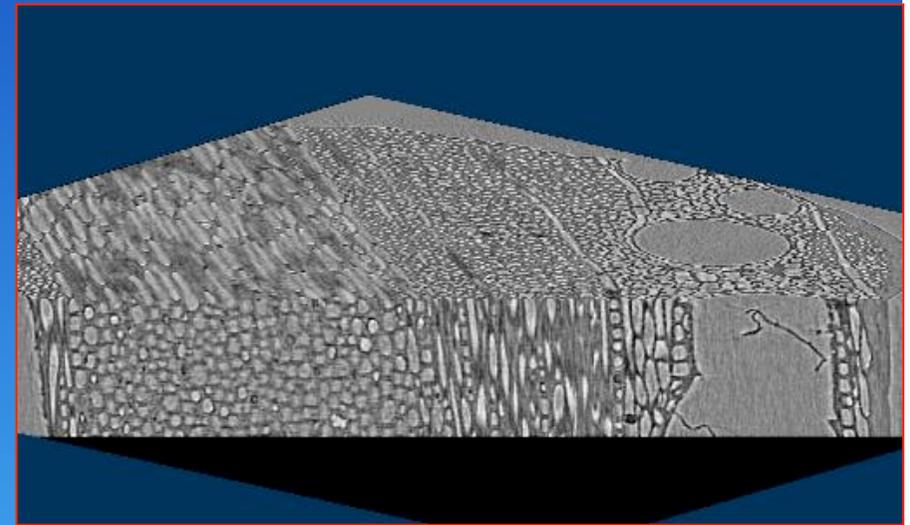
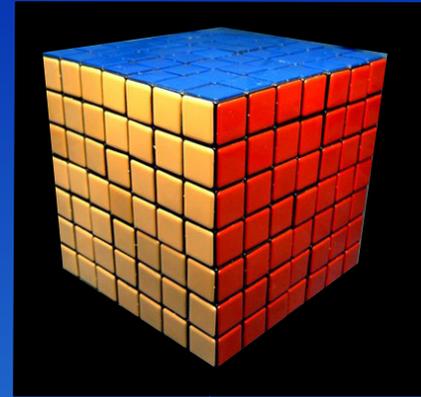
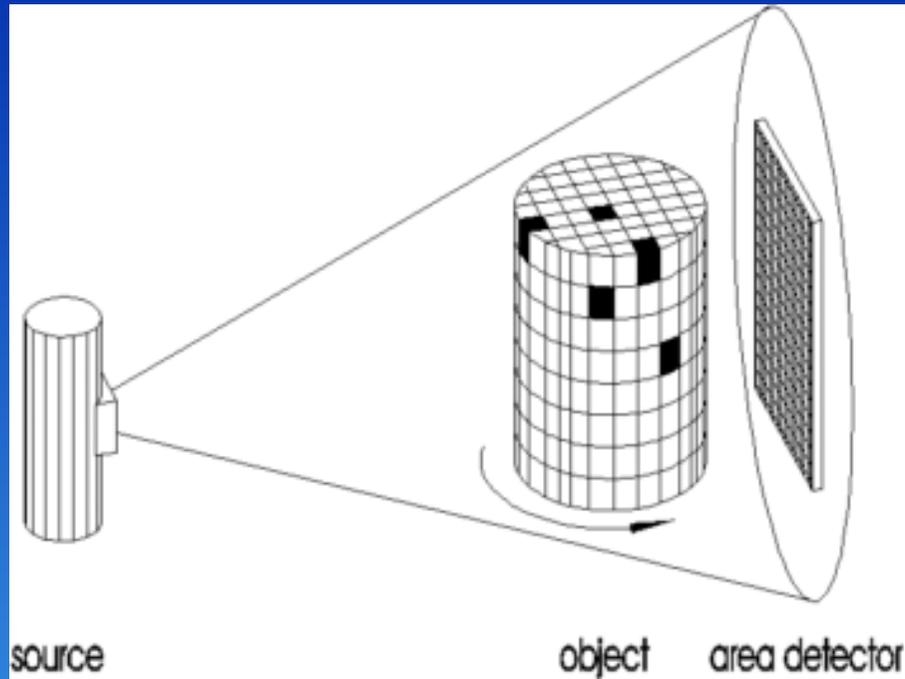
Microtomographie 2D
micrométrique



non-destructif



μtomographie 3D



1000 à 2000 projections sur 360°

Éléments de positionnement de précision
Informatique lourde (clusters de calcul et stockage)

Différents outils disponibles



paillasse

laboratoire

synchrotron

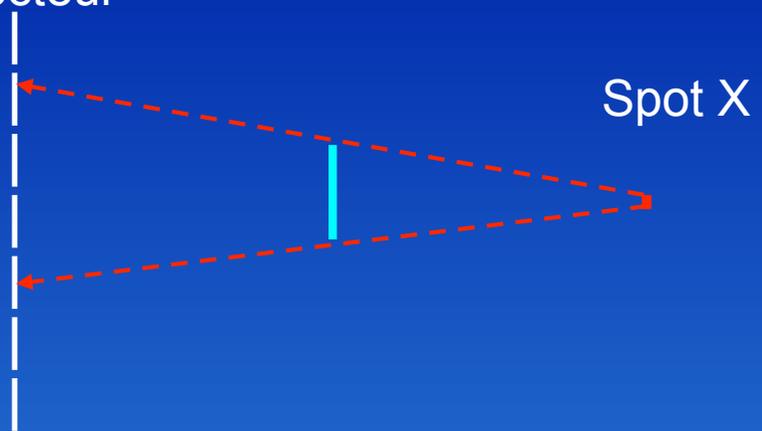
Rayonnement X	polychromatique	polychromatique	monochromatique
Faisceau	divergent	divergent	parallèle
Résolution spatiale	5-10 microns	1 micron	0.3 micron
Taille d'objet maxi	4-5 cm	10 cm	1 mm
Taille des fichiers	16 Go	32 Go	64 Go ou plus
Temps d'acquisition	De quelques minutes à l'heure	De quelques minutes à l'heure	De la seconde à quelques minutes

La résolution spatiale

Attention aux résolutions annoncées par les constructeurs ! La résolution due au grossissement n'est jamais atteinte.

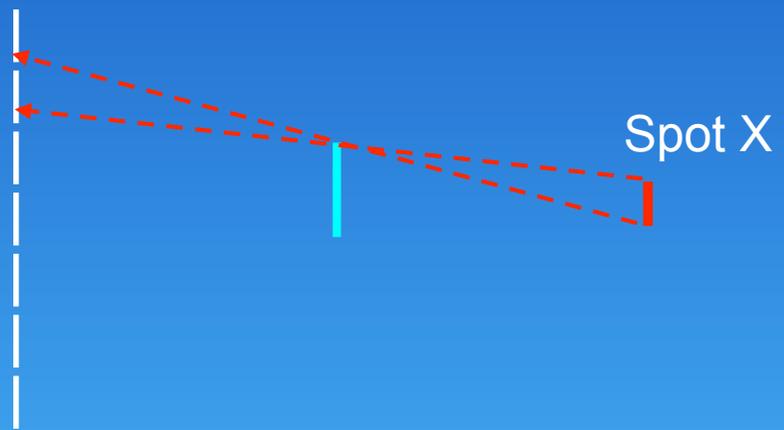
Les choix de détecteur et de source sont donc primordiaux.

détecteur



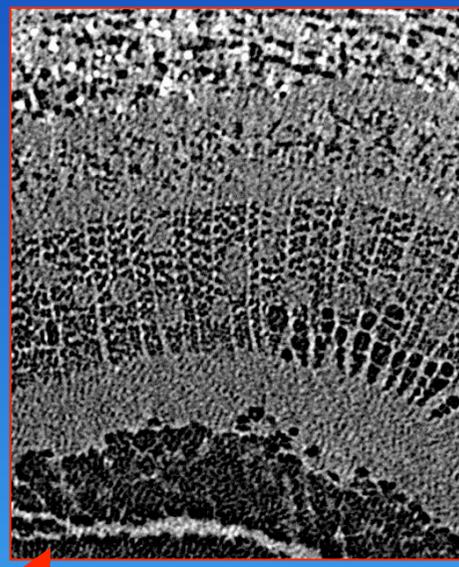
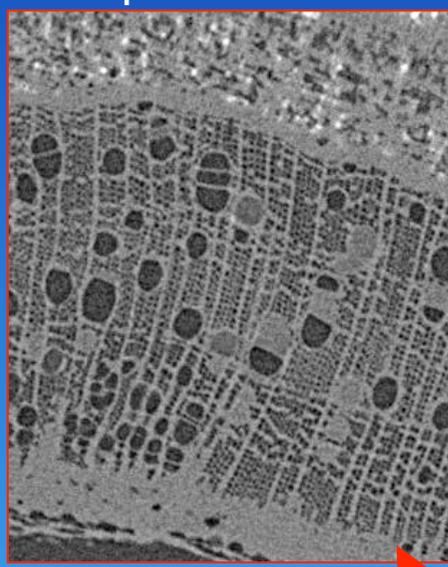
Spot X

$$\text{résolution pixel} = \frac{\text{résolution détecteur}}{G}$$



Spot X

$$f \text{ loupixel} = \text{diamètre du spot} \times G$$

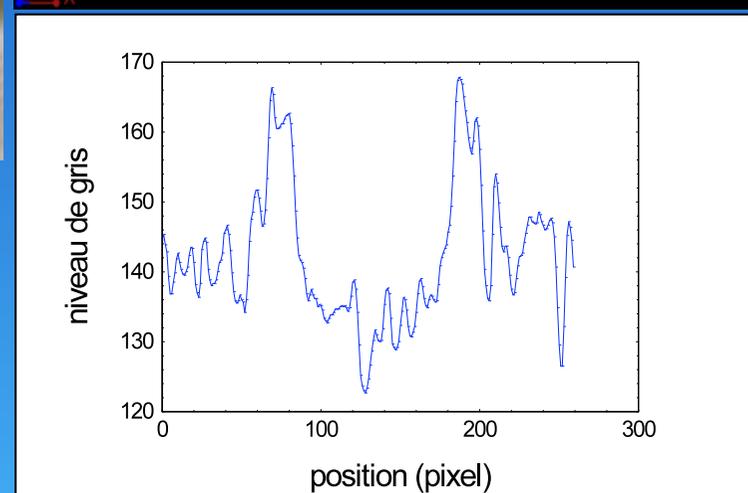
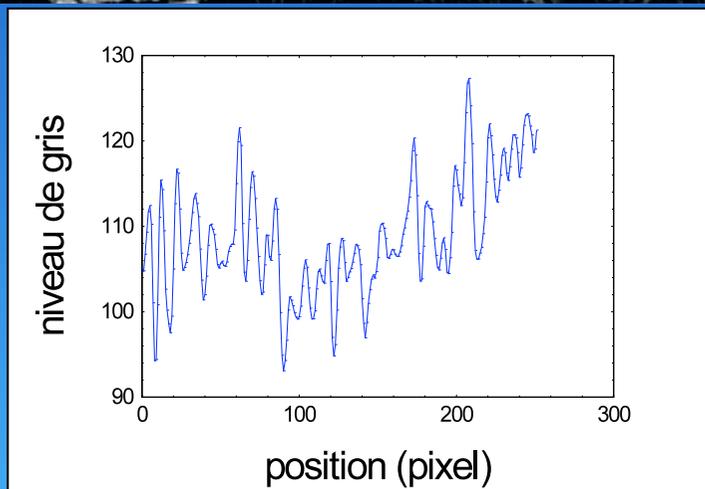
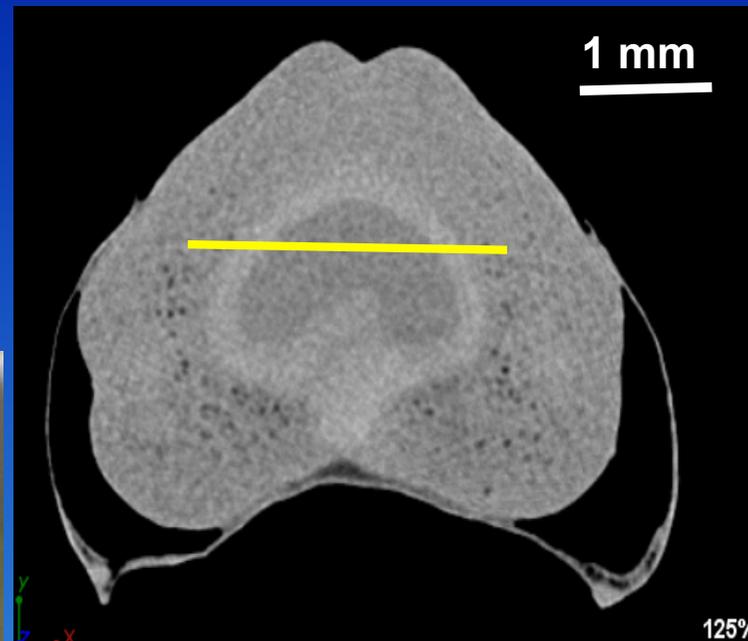
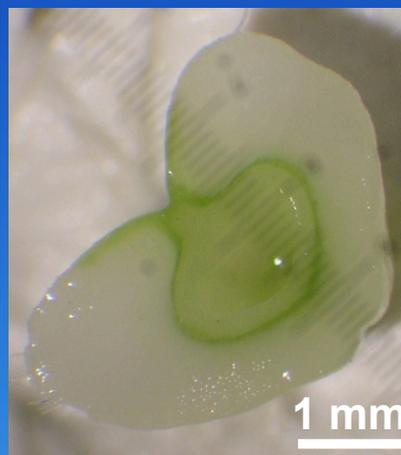
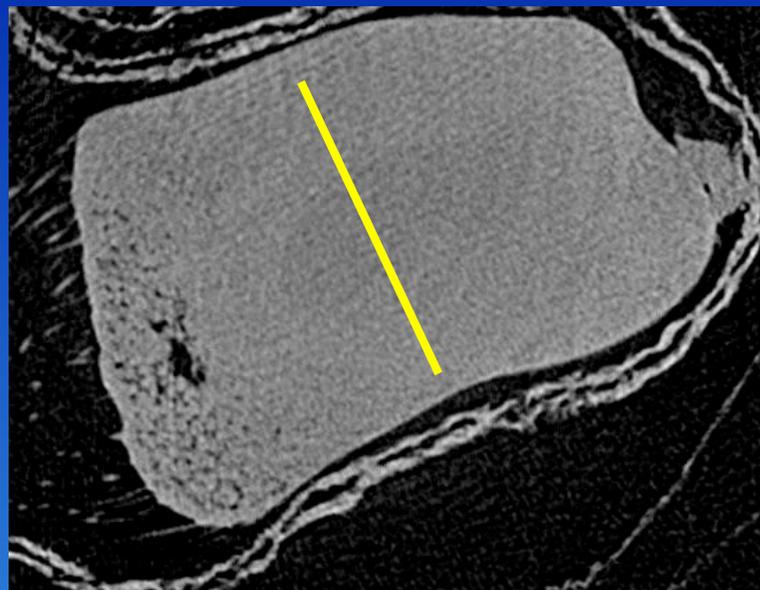


même résolution pixel théorique !!

Résolution détecteur → temps d'acquisition
Petit spot → petit flux



La résolution quantitative



Évolution du développement du grain de blé (C. Girousse)

Les contraintes d'acquisition

- Les balances:
résolution spatiale - champ d'observation - rapport signal / bruit - temps d'acquisition
- Le champ d'observation (taille du détecteur)
- Le rayonnement ionisant (ionise, chauffe, etc)
- La stabilité de l'échantillon durant l'acquisition (ex : le retrait hydrique des échantillons)



10 mm

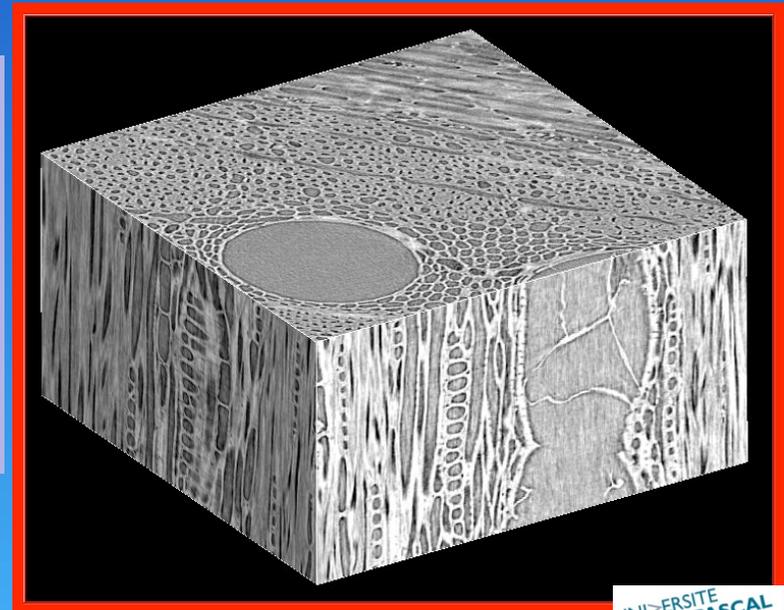
voxel: 30 μ m

Échantillon
60 mm

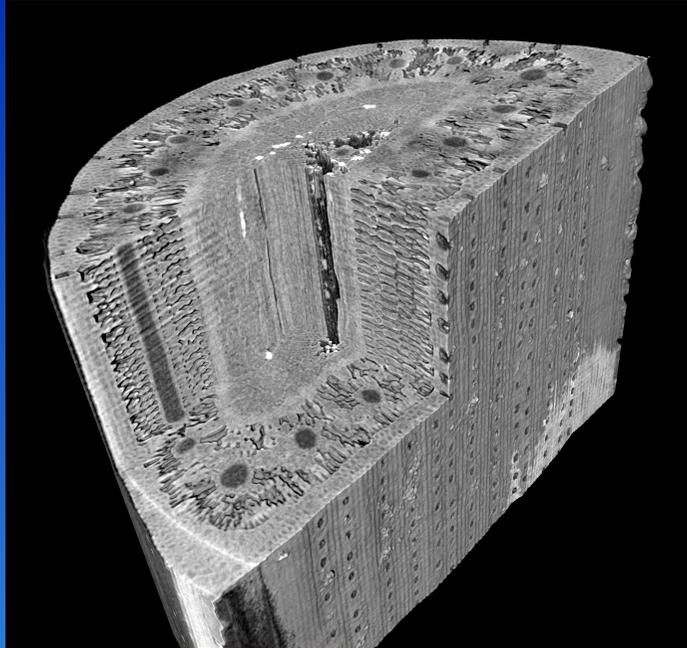
100 μ m

voxel: 0.8 μ m

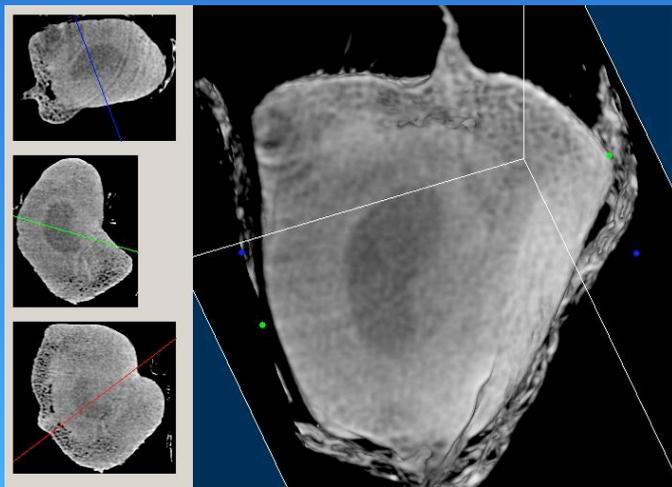
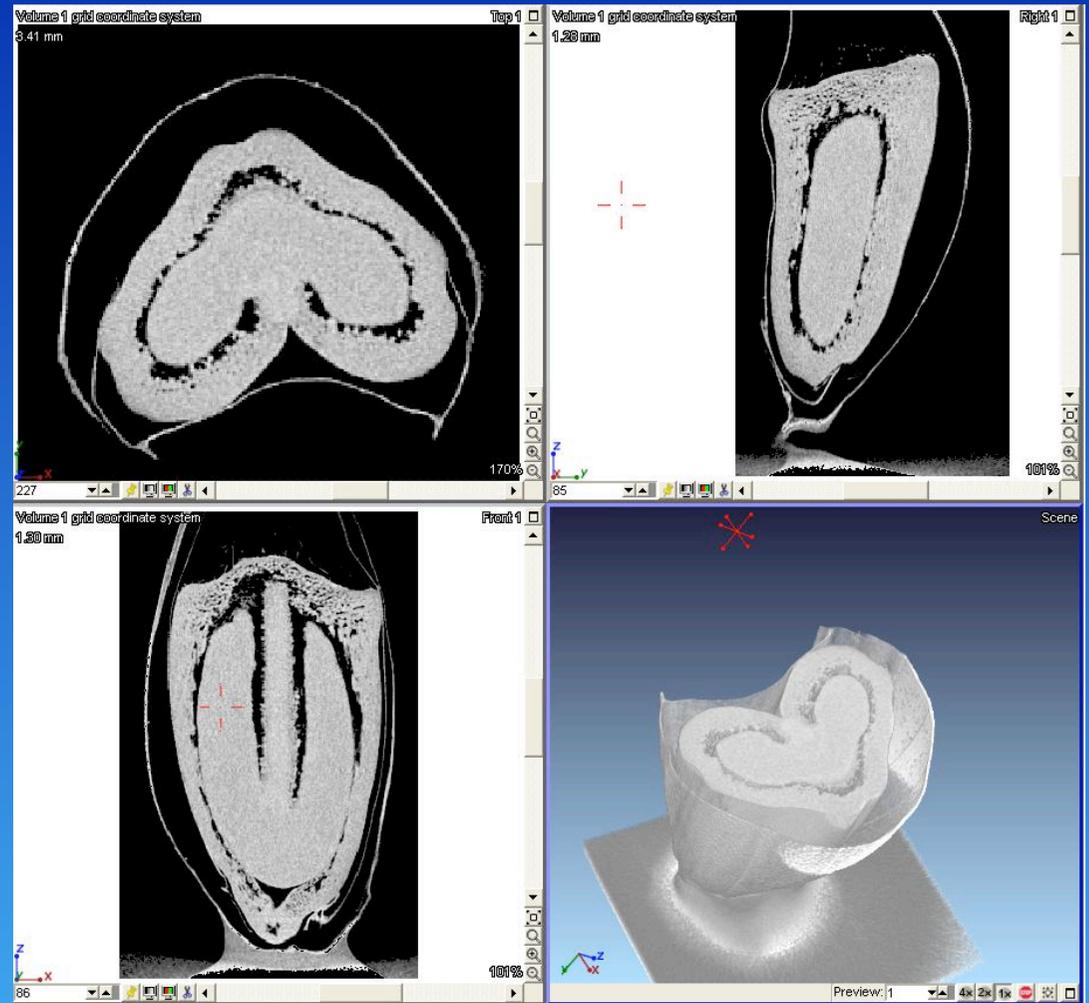
Échantillon
2 mm



Exemples de visualisation 3D



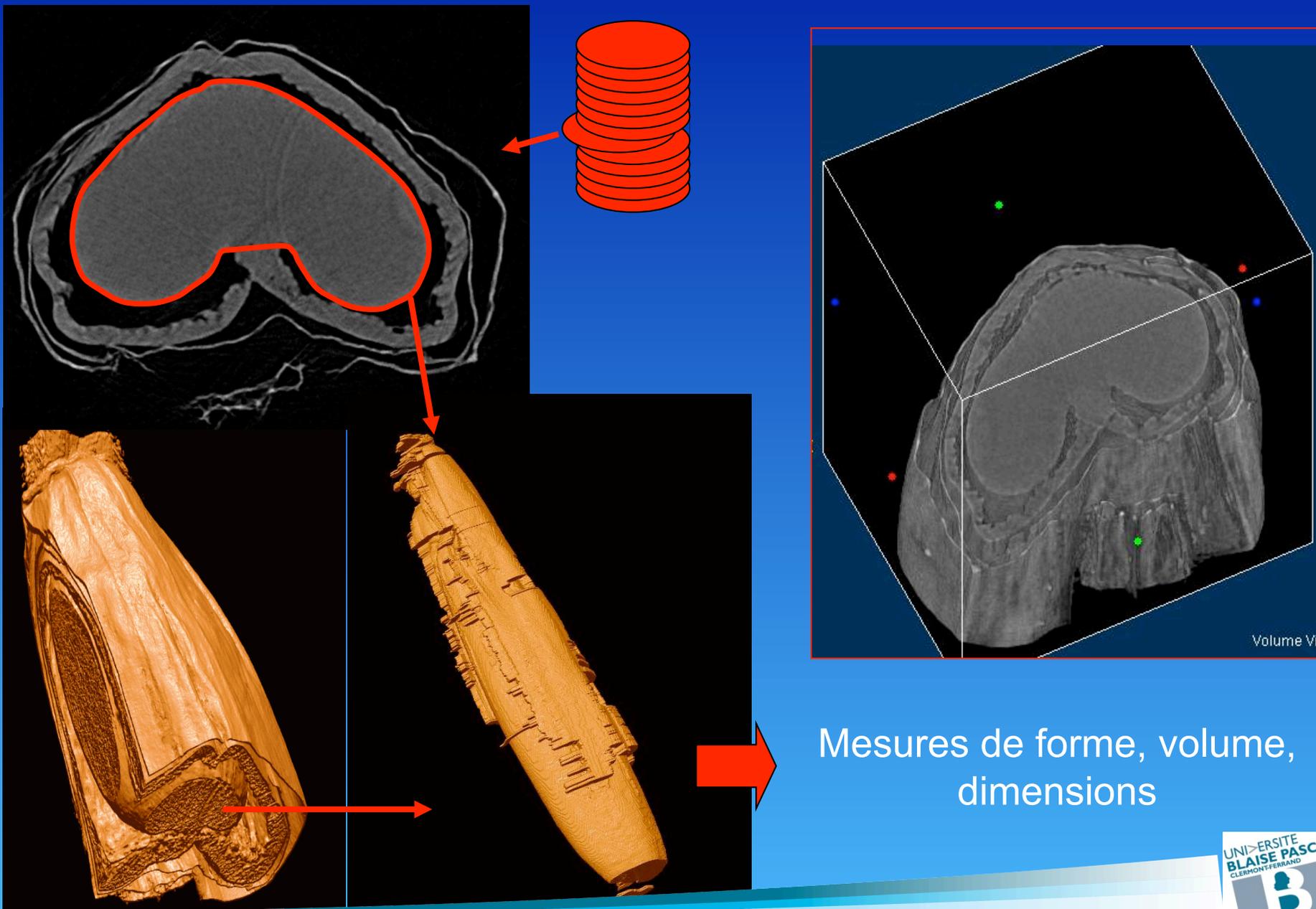
Charra-Vaskou et al, 2012



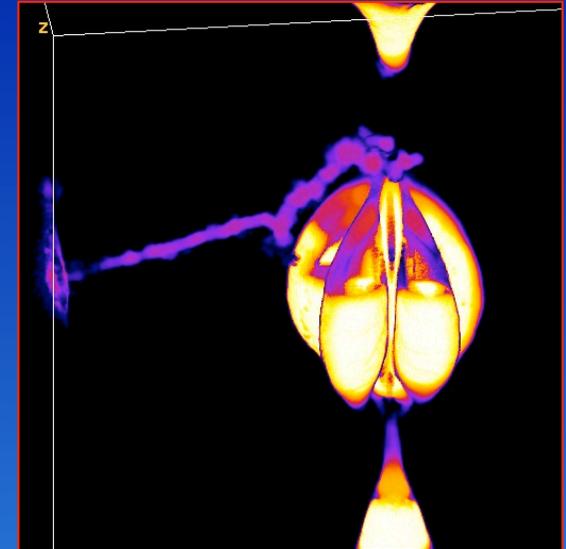
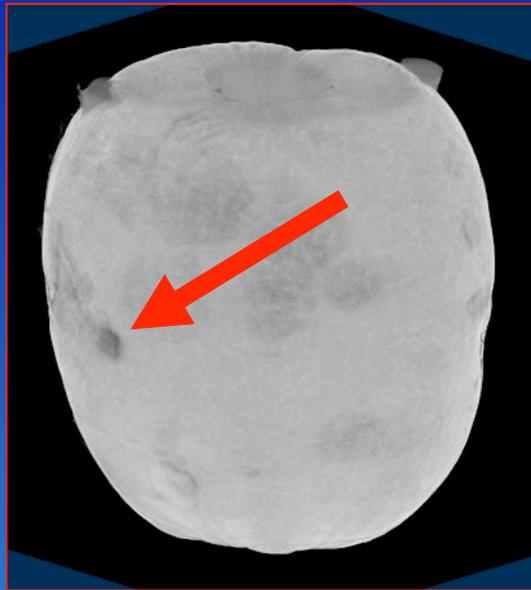
Évolution du développement du grain de blé (C. Girousse



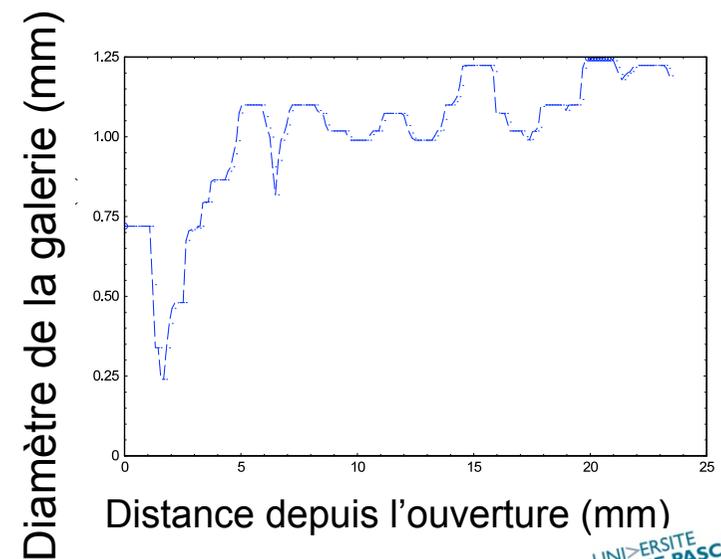
Extraction d'une ROI: mesures de structure



Exemple de mesure

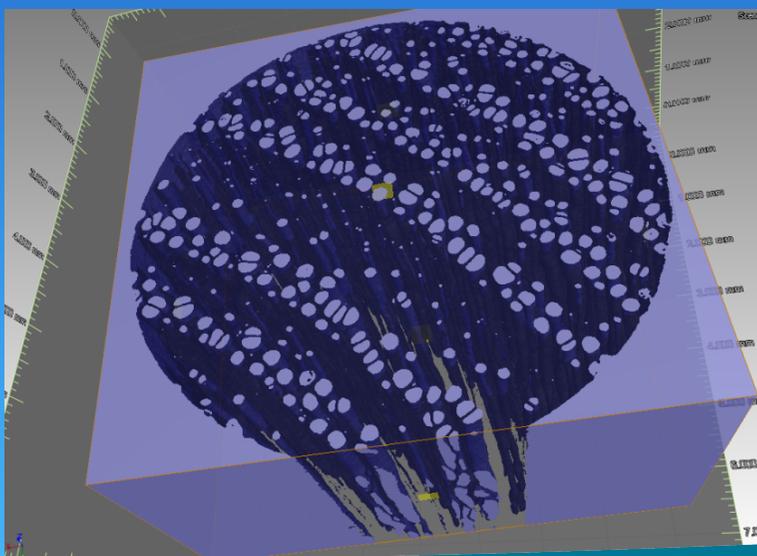
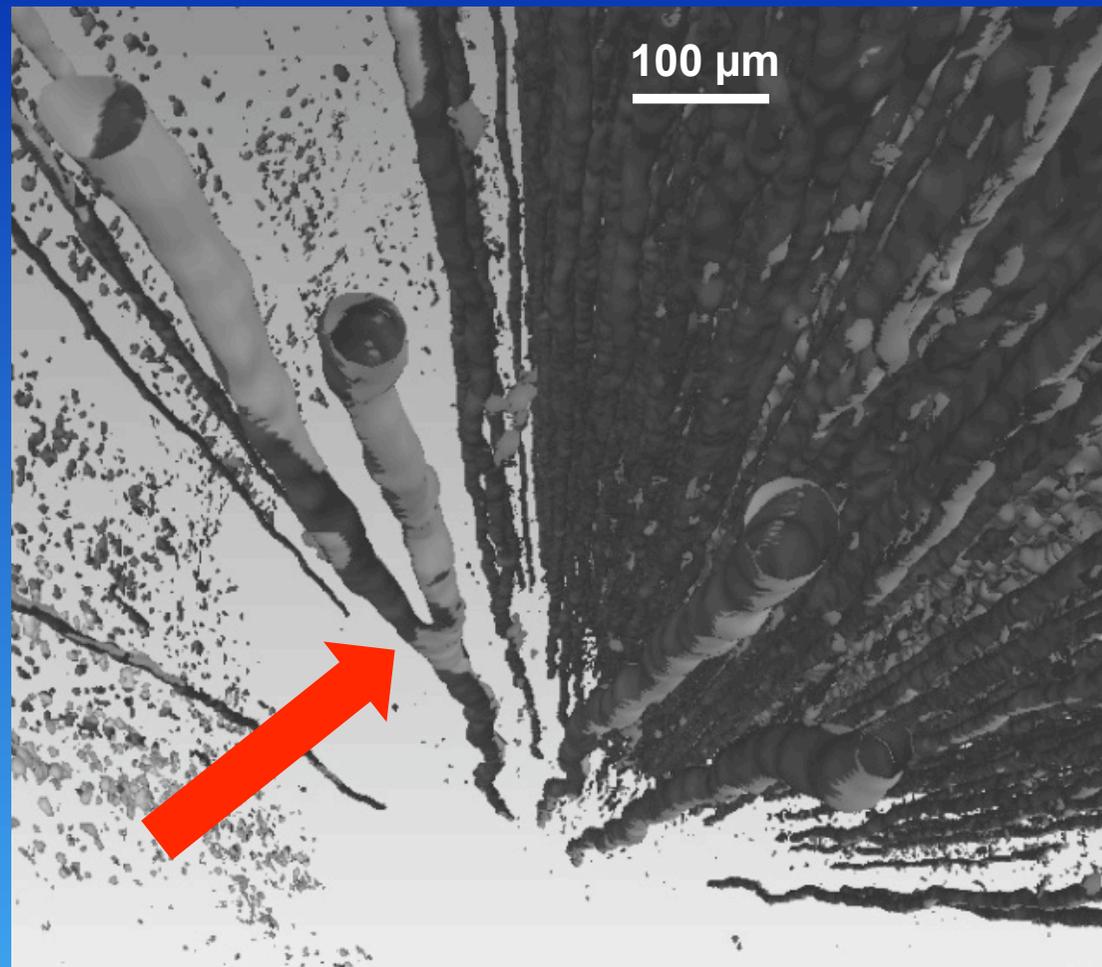
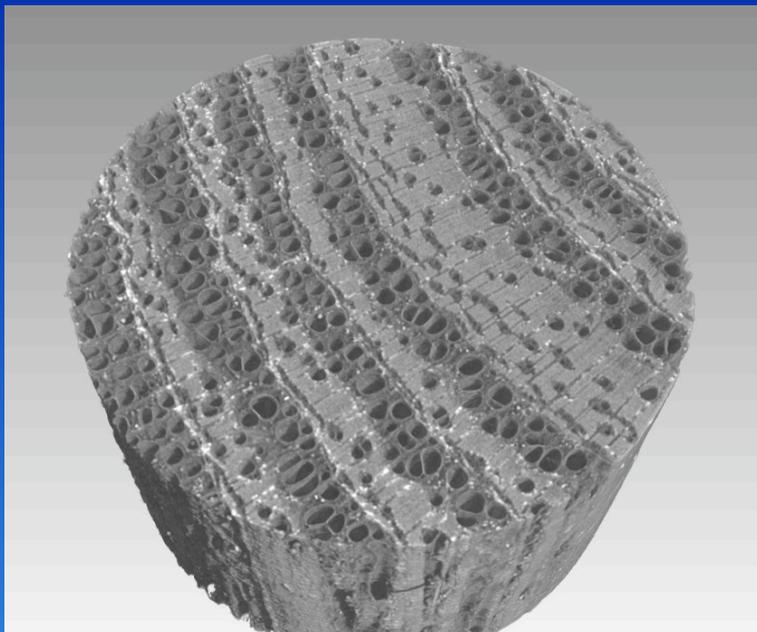


Etude du comportement du carpacapse:
évolution du diamètre de la galerie

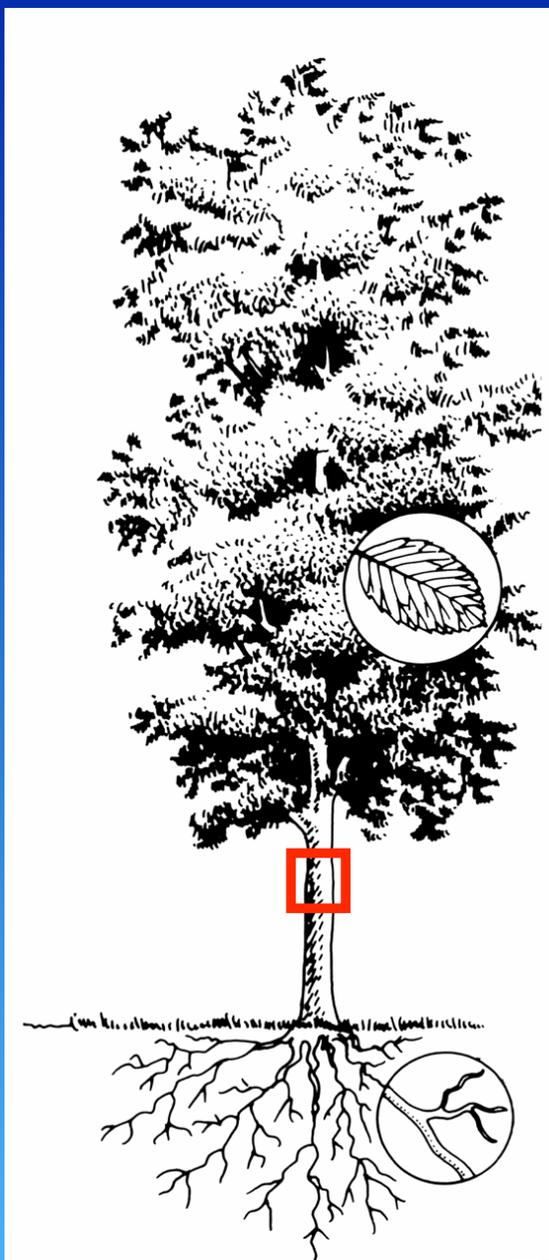


Exemple de visualisation

Caractérisation de l'architecture vasculaire d'un robinier (faux accacia)



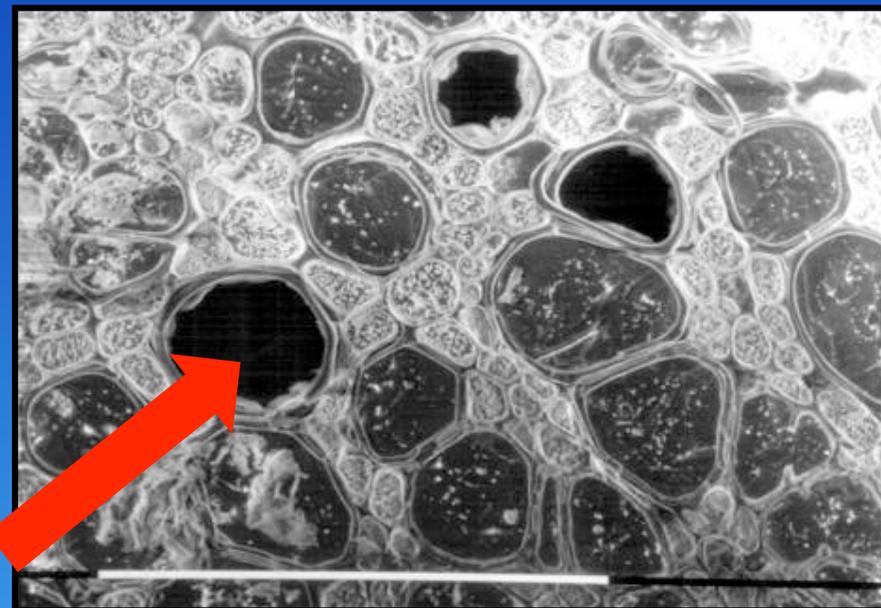
La conduction d'eau dans les arbres



ATMOSPHERE

Pressions de sève négatives

PLANTE

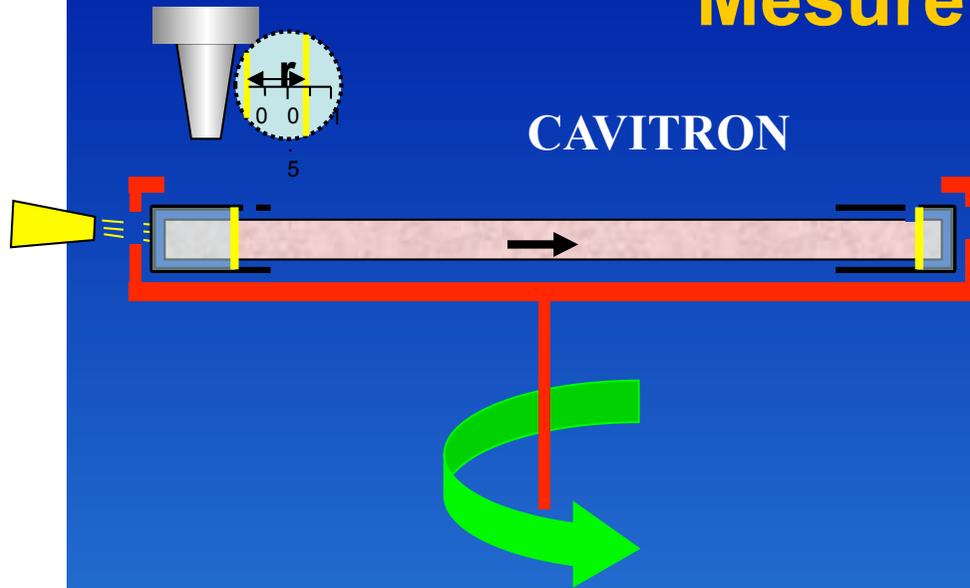


Système hydraulique en tension et métastable: risque d'embolie du système conducteur

SOL

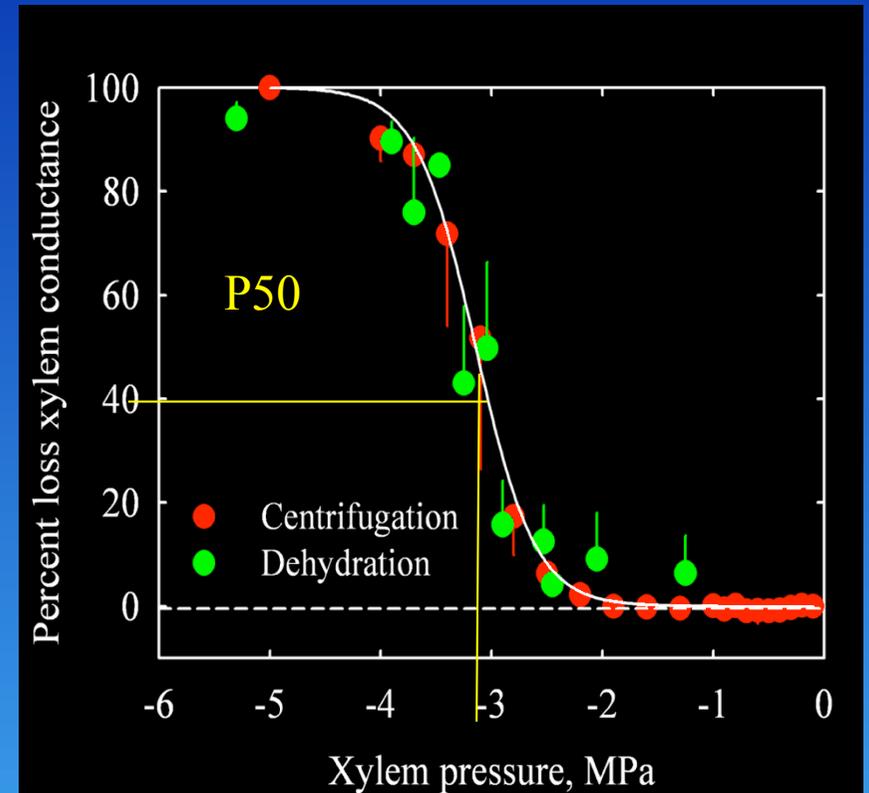


Mesure de l'embolie



Cochard et al 2005

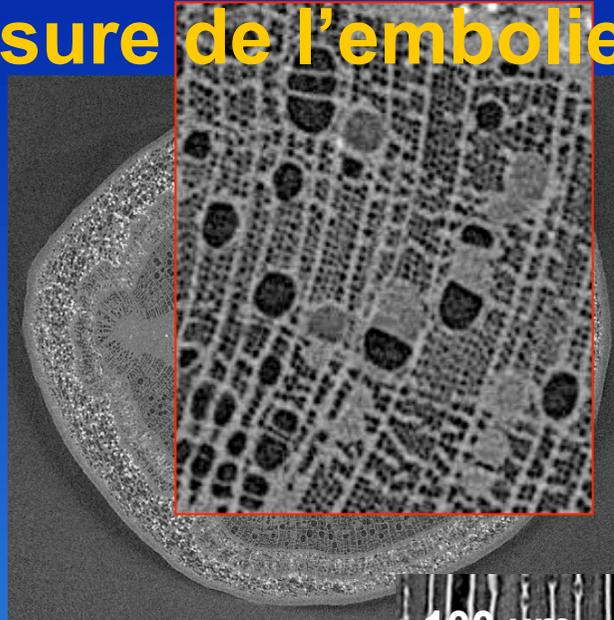
Courbe de vulnérabilité du tissu conducteur à la cavitation



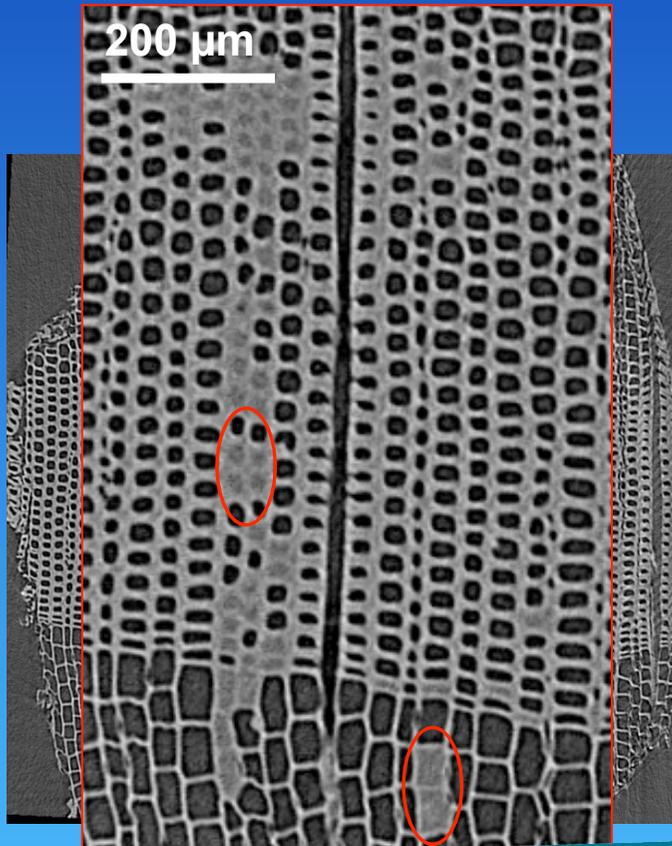
Mise sous tension du système vasculaire et mesure du flux hydraulique
Technique inopérante pour certaines essences

Application μ CT: mesure de l'embolie

Noyer

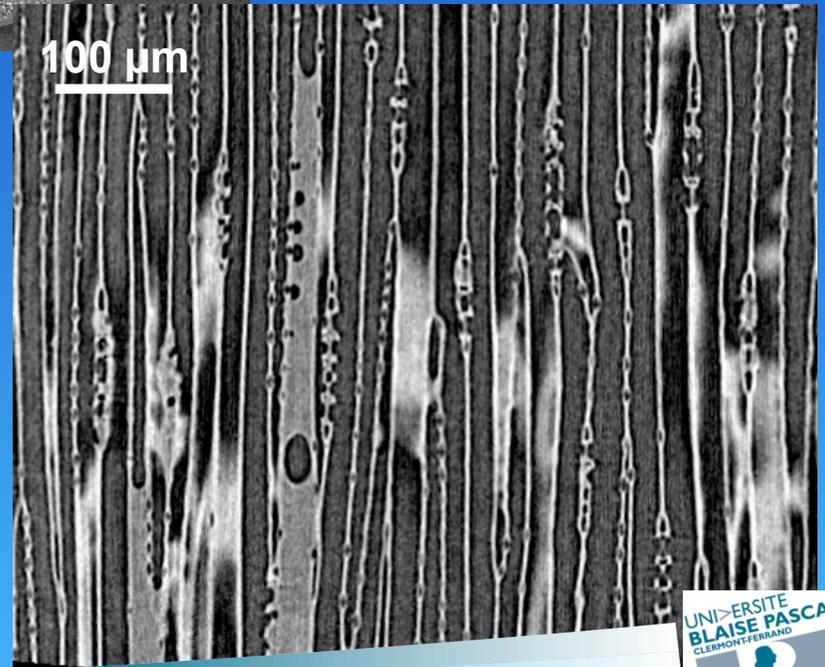


200 μ m



Pin sylvestre

100 μ m

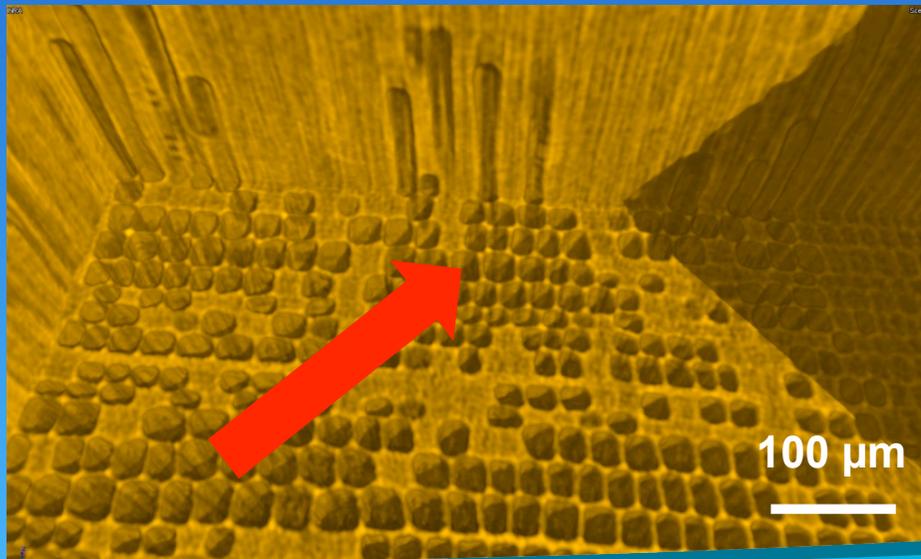
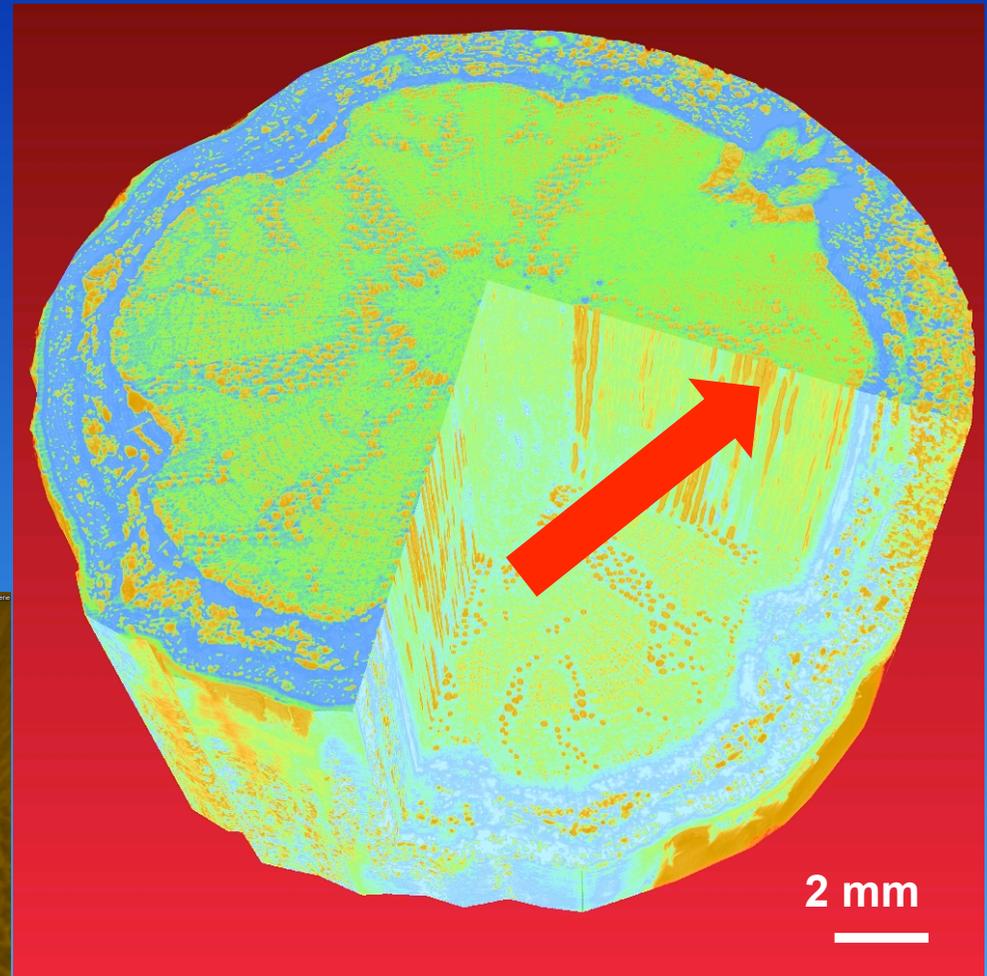


Application μ CT: suivi dynamique de l'embolie

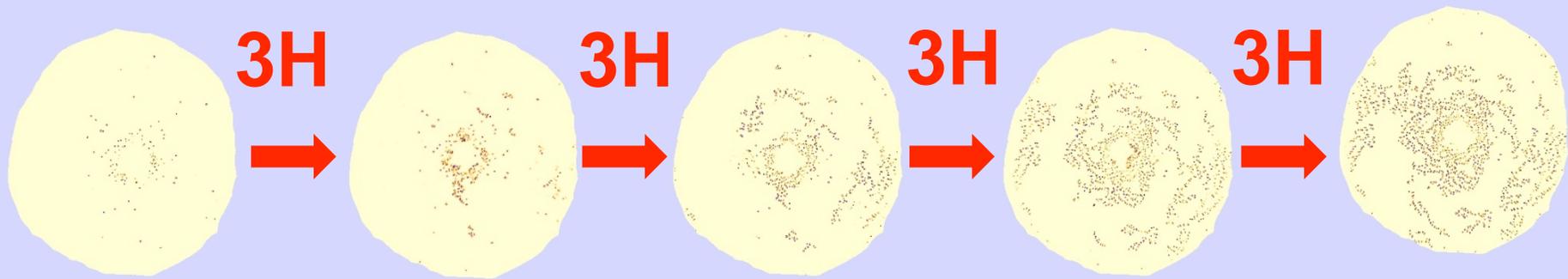
Douglas



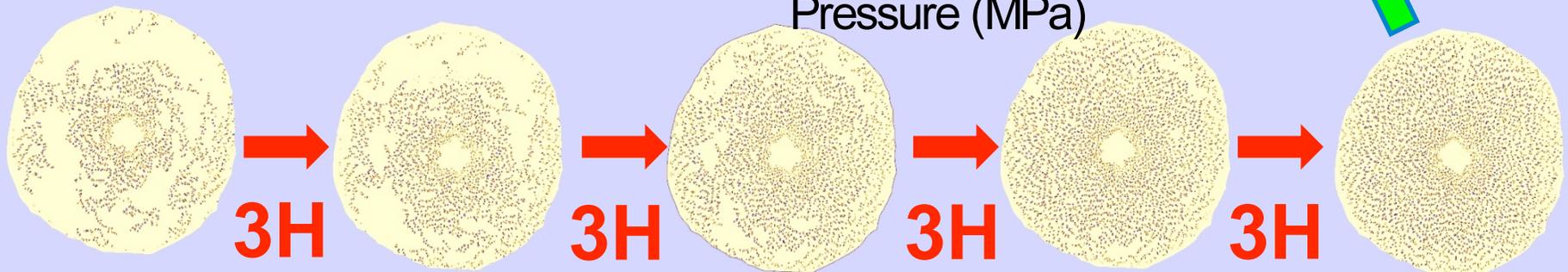
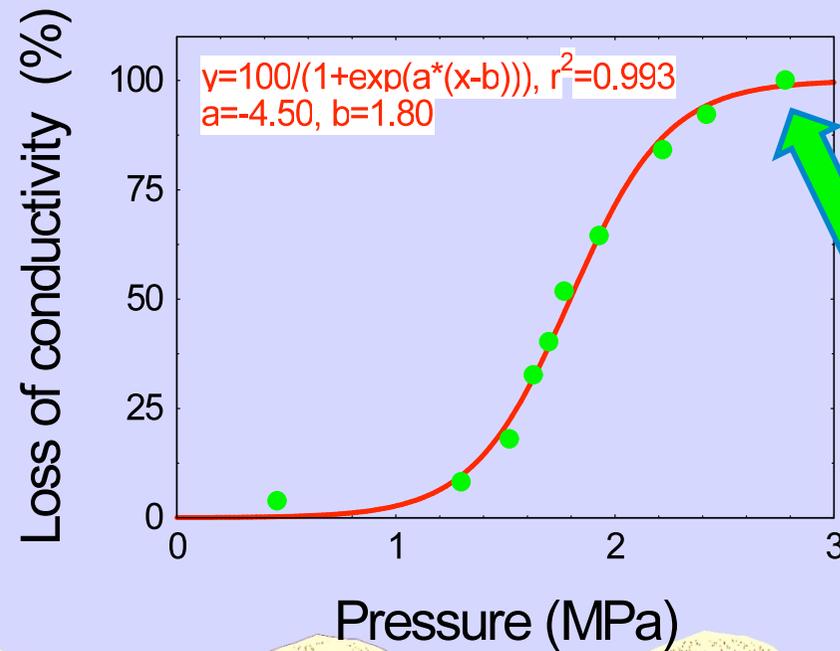
Chêne



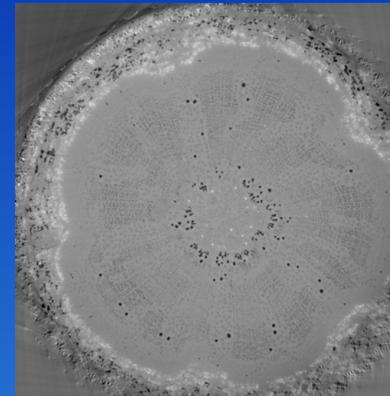
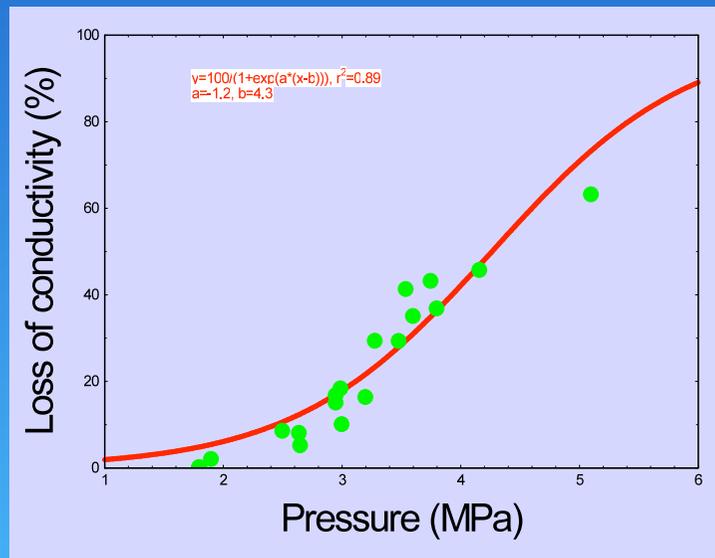
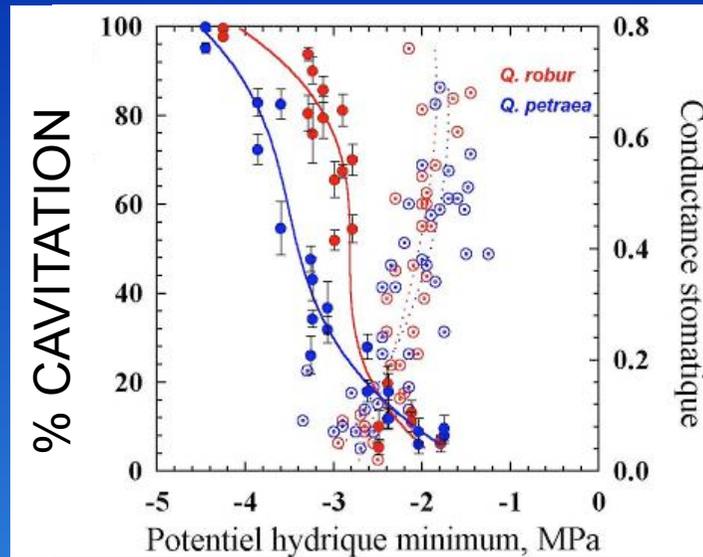
Application μ CT: suivi dynamique de l'embolie



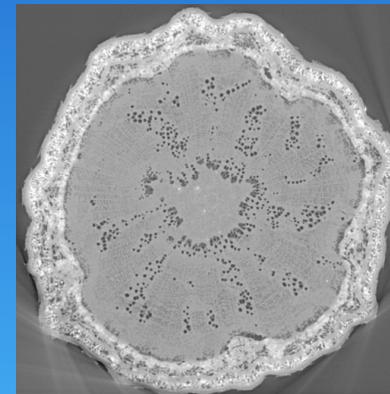
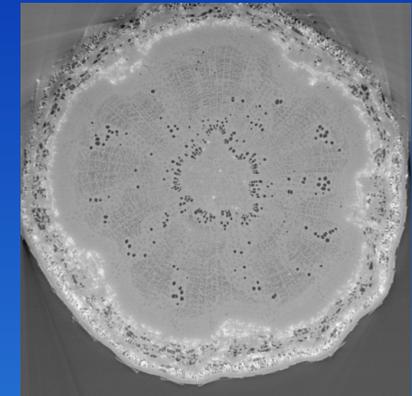
10 min / scan
sur
synchrotron



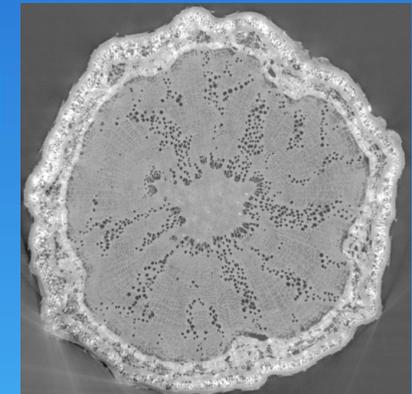
Application μ CT: suivi dynamique de l'embolie



3H
→

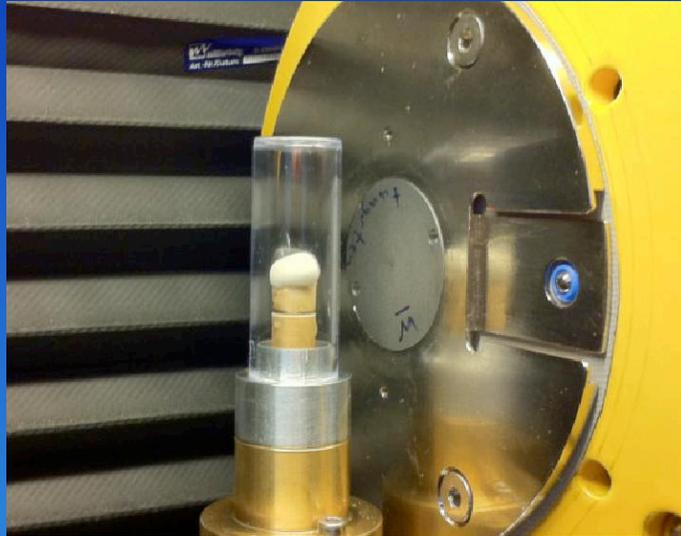


3H
→

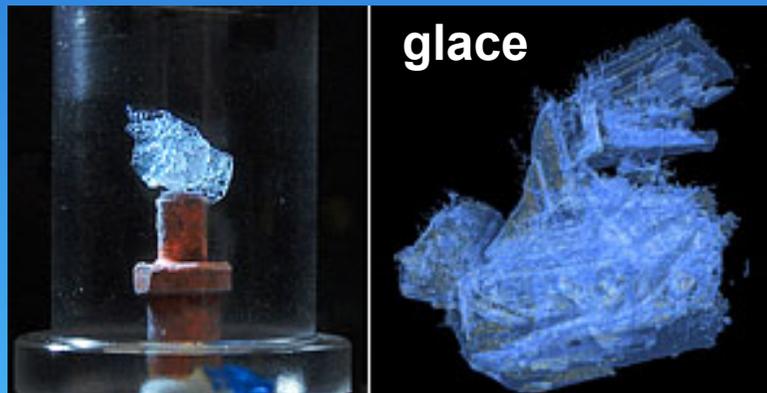
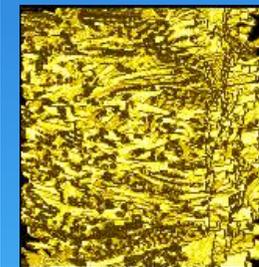
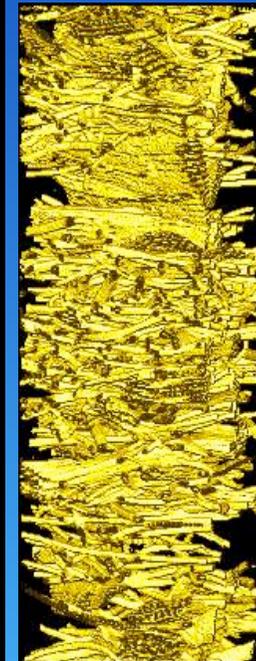
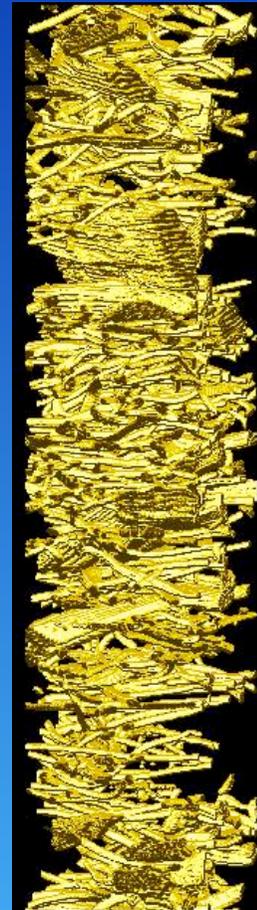


Mesures physiques in situ

Platine de contrôle de la température
(en projet au PIAF)



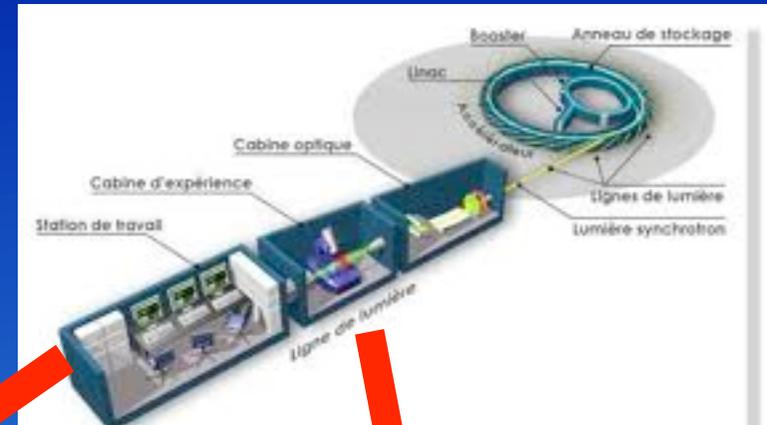
Essais mécaniques de compression - traction
panneau de fibres de bois



Badel et al, CST 2008



Les synchrotrons



Les synchrotrons



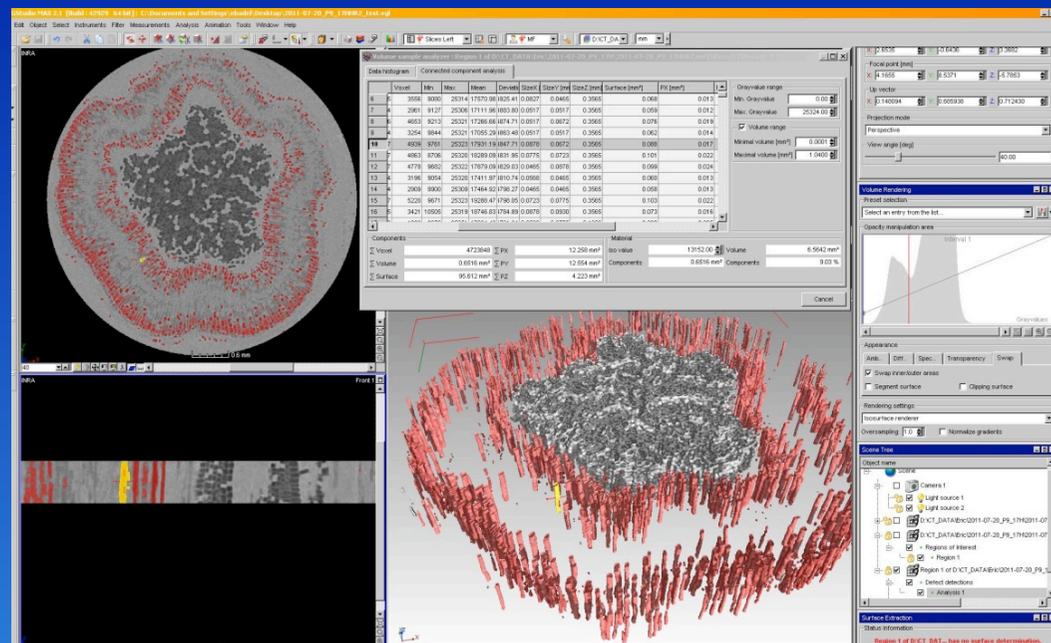
- Très très haut flux
- Scans rapides en haute résolution
- Dimensions des échantillons (mais pas des ROI !)
- possibilité de très haute résolution (0.2 μm)



- Forte pression pour l'accès (sur projet)
- Attente longue
- Durée d'expérimentation très limitée (1-3 jours maxi)
- Volume de données énorme (1-4 To /j)
- Très fatiguant



Le matériel à l'INRA (Clermont-Ferrand)



Résolution spatiale	80 microns - < 1 micron
Taille d'objet maxi	10 cm
Taille des fichiers	1 Go – 32 Go
Energie	8-160 kV
Temps d'acquisition	De quelques minutes à l'heure

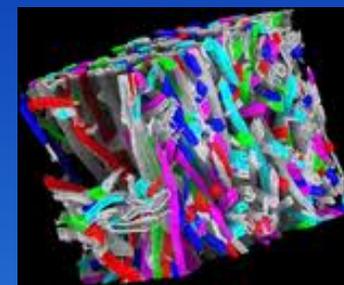
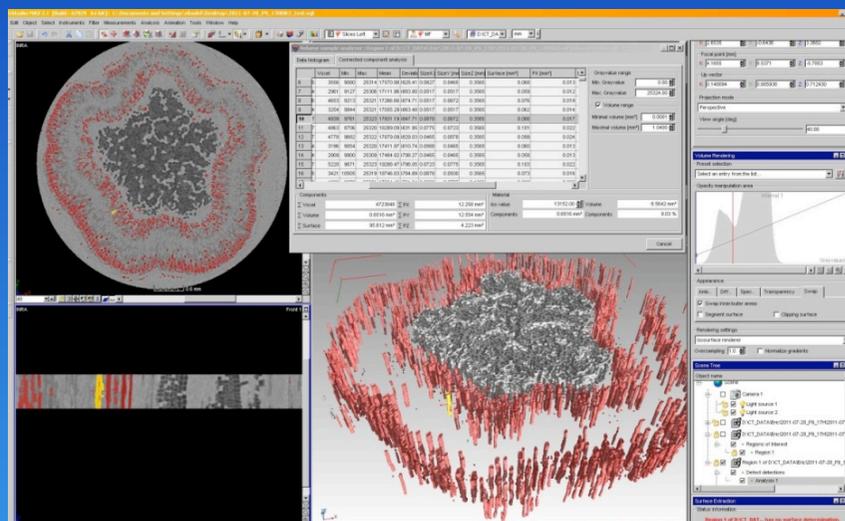
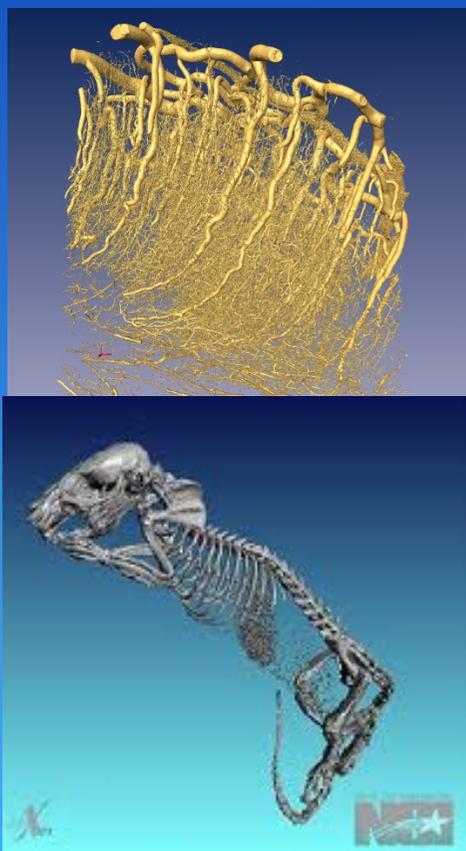


Acquisition GDEC-PIAF en Décembre 2010



L'analyse d'image

- C'est du vrai 3D !
- Tous les outils d'analyse d'image doivent être adaptés. Gros volumes de données à traiter
- Traitement 3D \neq traitement 2D x N coupes



Logiciels spécifiques :

- Visualisation VGStudio, Slicer, Matlab,....
- Analyse d'image: ImageJ, Fiji, Aphelion, Visilog....

Hardware adapté : manipulation de fichiers de plusieurs Go voire dizaines de Go

Conclusions

- Dispositifs initialement conçus pour l'étude des matériaux.
Balbutiements sur le végétal : faible absorption, pb de la saturation en eau, des variations dimensionnelles pendant l'acquisition, etc...
- Beaucoup de méthodologies à mettre au point pour les sciences du vivant
- Différents types d'appareils : ex « in vivo » pour le petit animal (très rapide mais résolution moindre)
- Outil complémentaire de l'IRM



Syrphidae

Conclusions

Un µtomo à la maison ; pourquoi pas, mais...

Choisir l'appareil en fonction des besoins ...et des compétences.

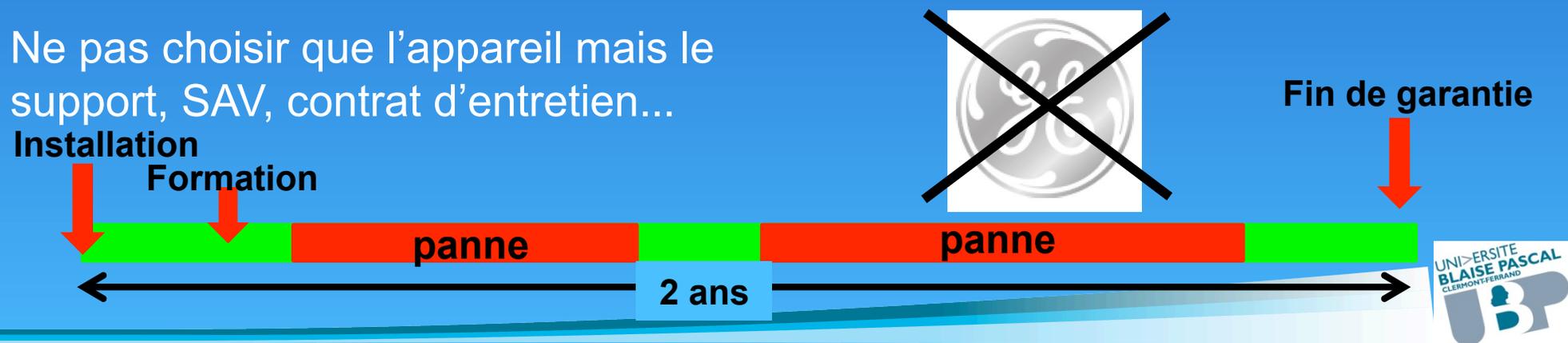
Si tout va bien, pas beaucoup d'entretien mais peut s'avérer fragile. Il faut bétonner le contrat SAV.

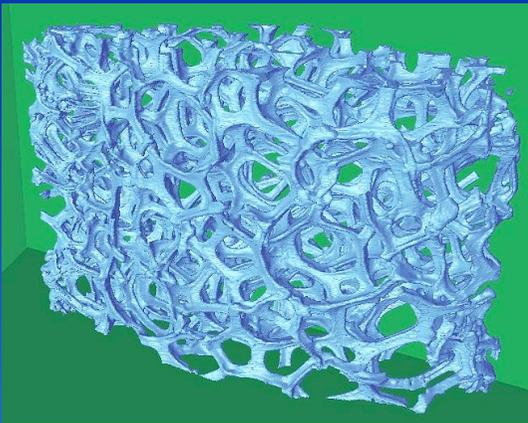
Une personne vraiment spécialiste au labo.

Ne pas choisir que l'appareil mais le support, SAV, contrat d'entretien...

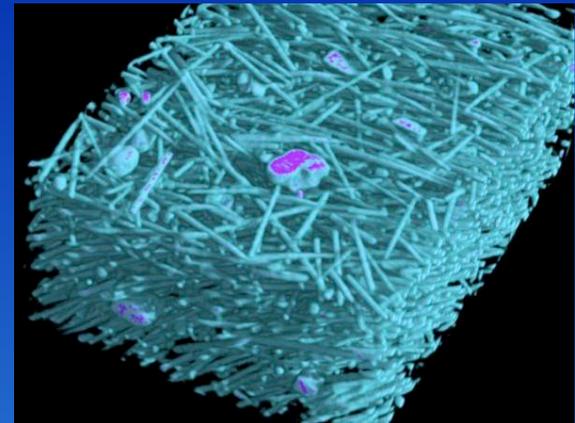


Le coup de gueule: une compagnie à proscrire





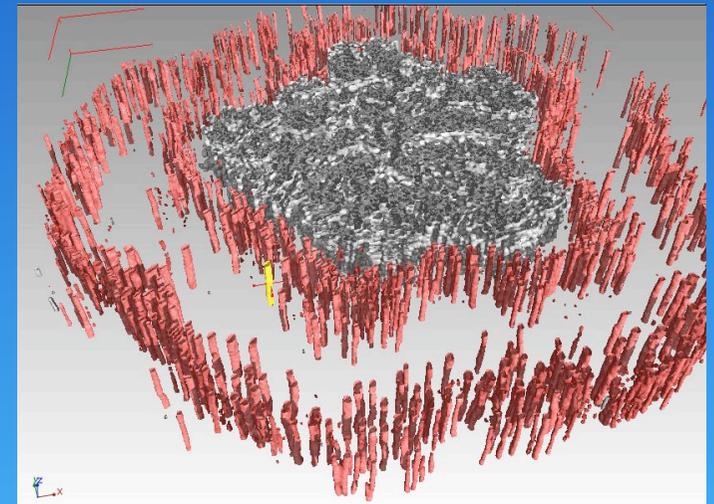
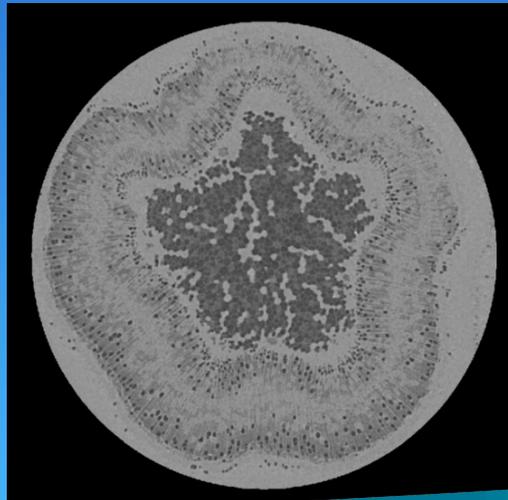
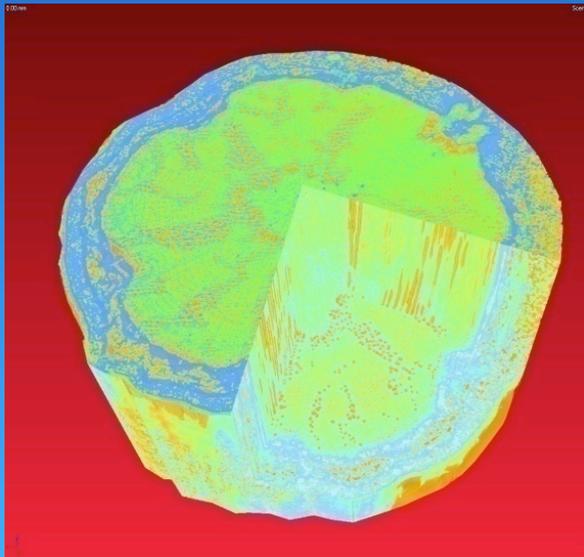
esrf



esrf

Merci de votre attention

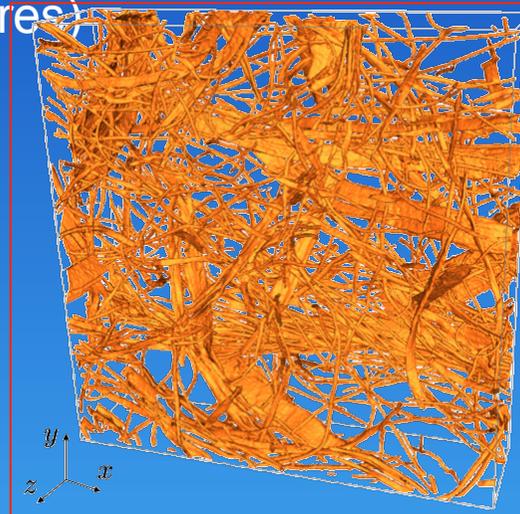
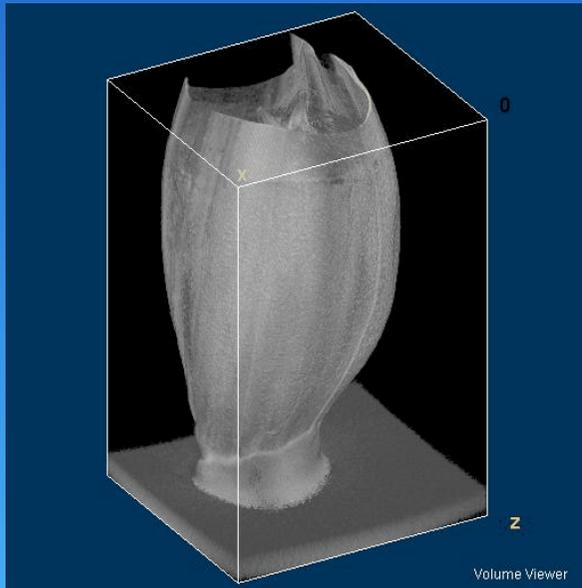
eric.badel@clermont.inra.fr



UNIVERSITÉ
BLAISE PASCAL
CLERMONT-FERRAND
BP

Conclusions

- Dispositifs initialement conçus pour l'étude des matériaux. Balbutiements sur le végétal : faible absorption, pb de la saturation en eau, des variations dimensionnelles pendant l'acquisition, etc...
- Beaucoup de méthodologies à mettre au point pour les sciences du vivant
- Outil complémentaire de l'IRM
- Différents types d'appareils : ex « in vivo » pour le petit animal (très rapide mais résolutions médiocres)



Panneau de fibres végétales



Exemples de visualisation

