

# La Tomographie

**« Entre hier et aujourd'hui, une  
technique de CND en pleine  
évolution »**

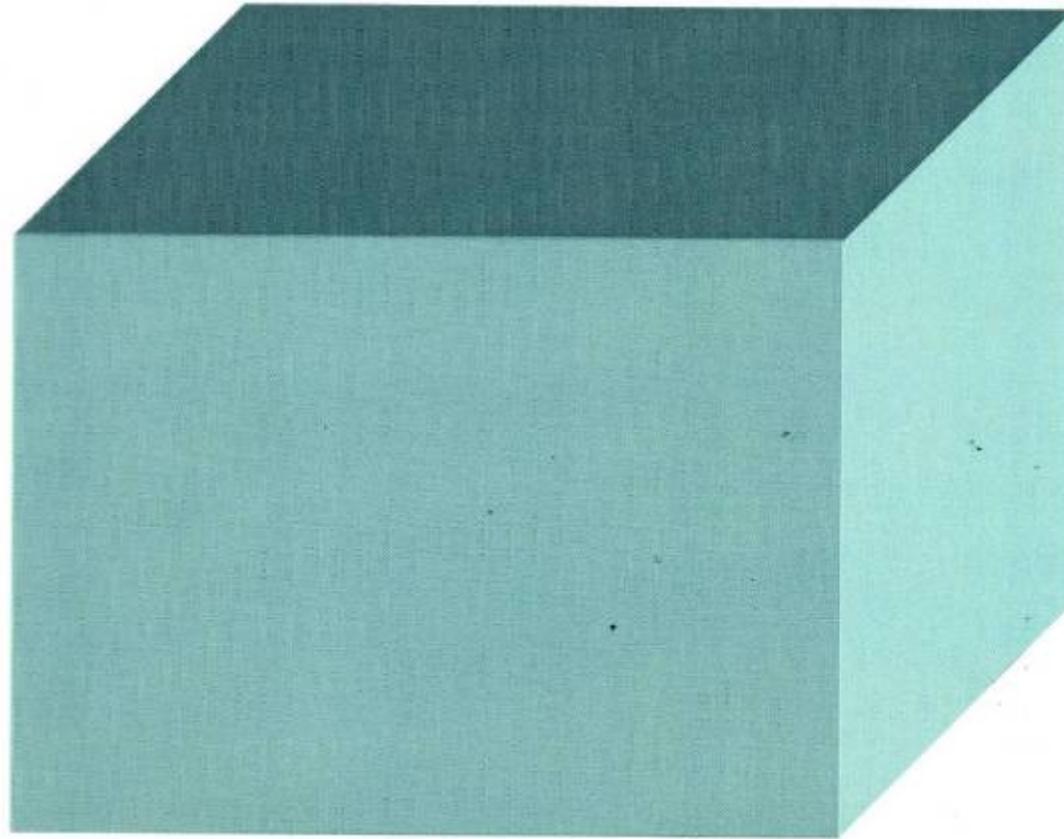
**Journée technique CND- MESUREXPO VISION 02.06.2010**



**Christian THIERY**  
**CEA DAM Ile de France**  
**DCRE- SCEF- LCDT**  
**Tel: 01 69 26 49 34**  
**Fax: 01 69 26 71 00**  
**Christian.Thiery@cea.fr**

- ✦ Spécialiste en Tomographie et CND
- ✦ Président du groupe national COFREND  
« TOMOGRAPHIE INDUSTRIELLE »  
et
- ✦ Représentant français au Groupe de normalisation Européen **ITC 138 WG 01** sur la normalisation de la Tomographie (norme CEN et norme internationale)

# LA TOMOGRAPHIE



Qu'est – ce ?

Une technique de CND qui découpe l'espace pour  
en découvrir l'intérieur caché





**PRINCIPE  
DE  
LA  
TOMOGRAPHIE**

**FORMULATION  
DU  
PROBLEME**

**LA TOMOGRAPHIE**

=

RECONSTRUIRE LA CARTOGRAPHIE  
D'UN PARAMETRE CARACTERISTIQUE

**LE RAYONNEMENT**

=

EXPLORER LA MATIERE SANS LA DETRUIRE

**LE PROBLEME DIRECT**

=

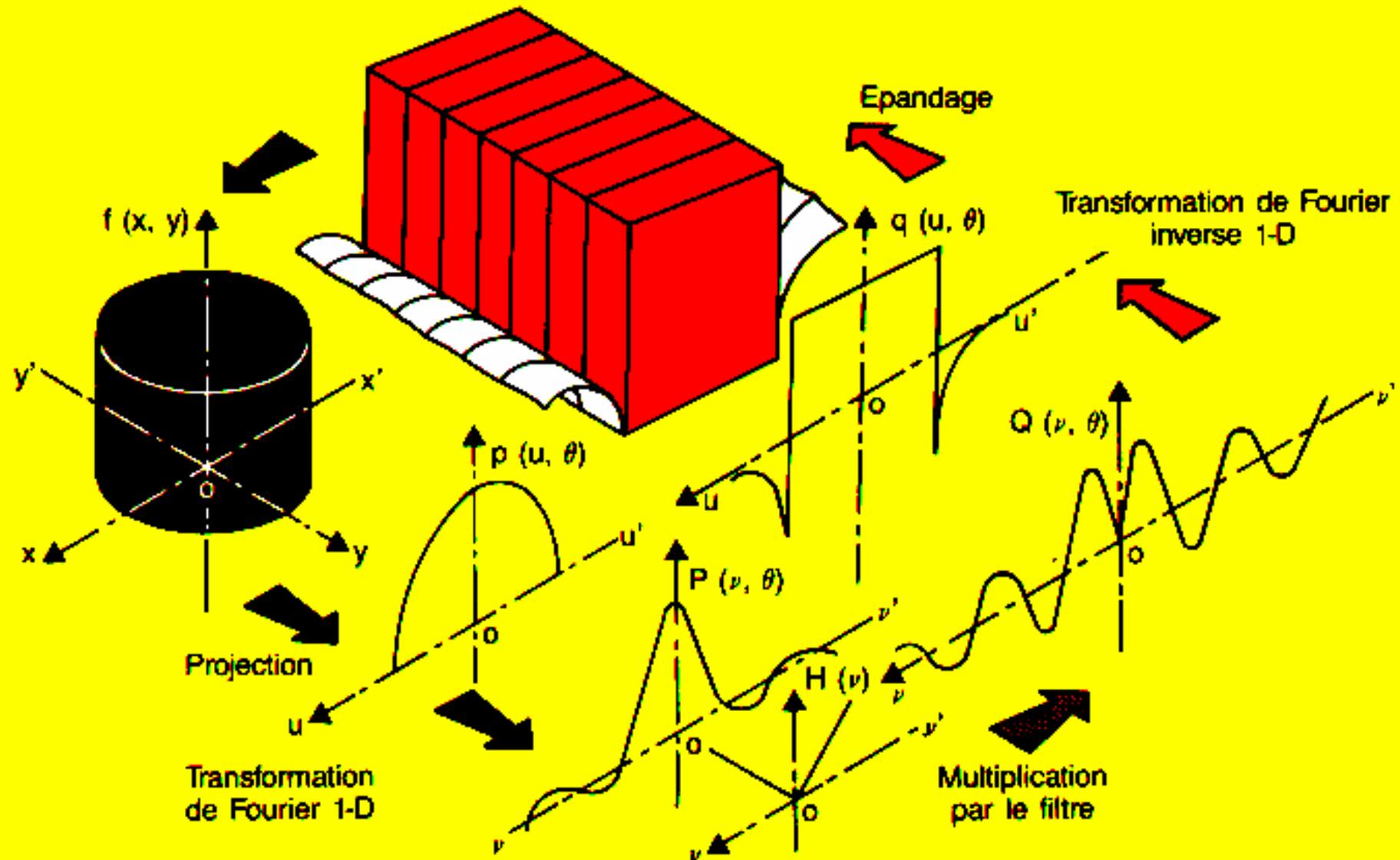
EQUATION DE TRANSPORT DU RAYONNEMENT  
DANS LA MATIERE

**LE PROBLEME INVERSE**

=

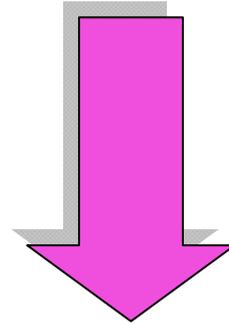
RESOUDRE LES EQUATIONS DE MESURE POUR  
RECONSTRUIRE DES COUPES VIRTUELLES

# Principe de reconstruction d'image



# Mathématique assez complexe

difficile à mettre en oeuvre



La tomographie a été une méthode peu utilisée et assez confidentielle sur le plan industriel.

# La tomographie qu'est-ce?

## Quelques rappels sur **hier**

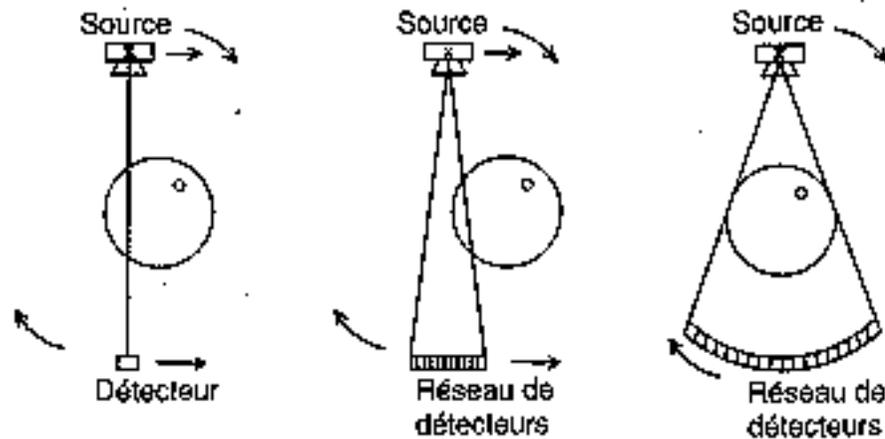
- Méthode de CND.
- Méthode Interne.
- Récente / Radio x.
- Issue du médical.
- Appliquée dans le domaine industriel depuis les années 80.
- Technique pluri-objectifs.
- S'applique à de nombreux matériaux.
- **Fonctionnait en milieu industriel au niveau d'un club relativement fermé d'utilisateurs.**
- **« Grosses » installations lourdes et coûteuses à entretenir.**
- **Pas normalisée.**

# La tomographie qu'est-ce?

## Quelques rappels sur **aujourd'hui**

- Méthode de CND.
  - Méthode Interne.
  - Récente / Radio x.
  - Issue du médical.
  - Appliquée dans le domaine industriel depuis les années 80.
  - Technique pluri-objectifs.
  - S'applique à de nombreux matériaux.
- **Fonctionne en milieu industriel au niveau d'un groupe plus ouvert d'utilisateurs.**
  - **Installations diverses « génération KIT ».**
  - **En partie normalisée.**

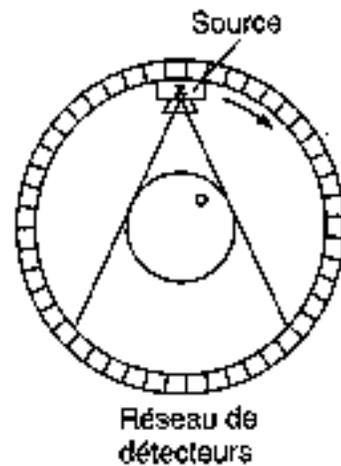
# Evolution de la tomographie



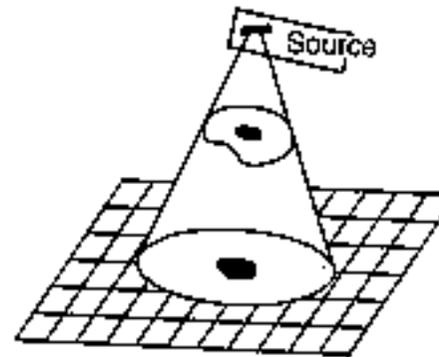
1ère génération

2ème génération

3ème génération



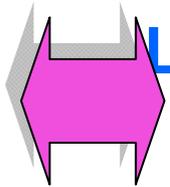
4ème génération



5ème génération

# Le pourquoi de cette évolution

La génération « KIT »



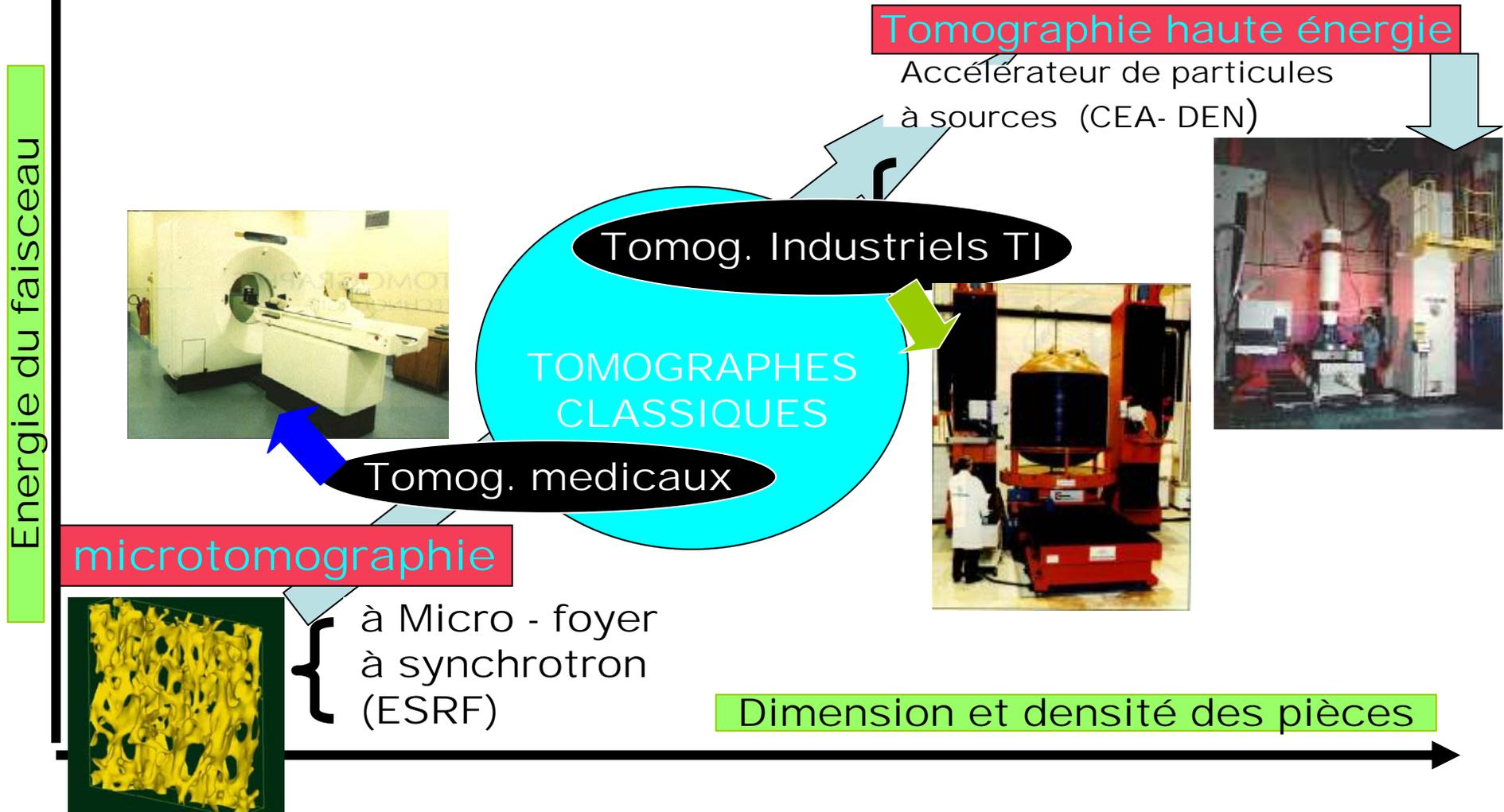
L'intégration d'éléments constituant une chaîne tomographique en fonction des besoins

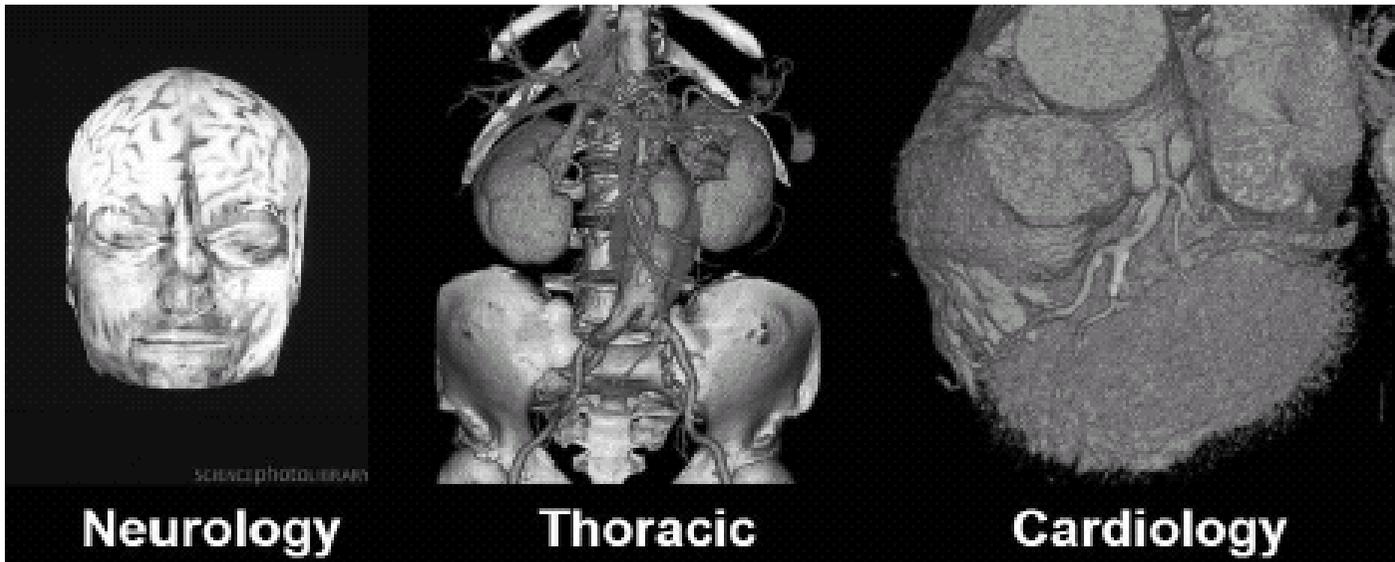
- ✦ Générateurs divers
- ✦ Choix de détecteurs
  - ✦ Facilité d'intégrer des appareillages mécaniques de précision
  - ✦ Accessibilité aux logiciels de reconstruction

# La tomographie = des tomographies

**Le facteur déterminant étant l'énergie du faisceau**

De la haute résolution à la haute énergie



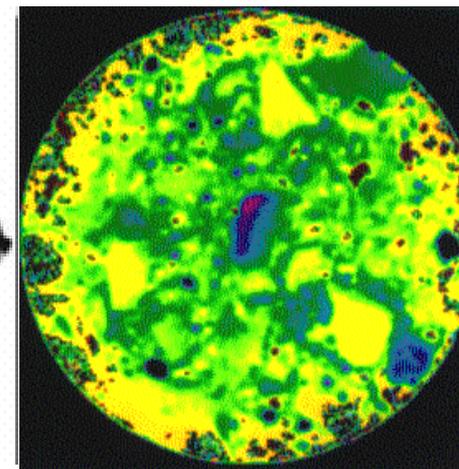
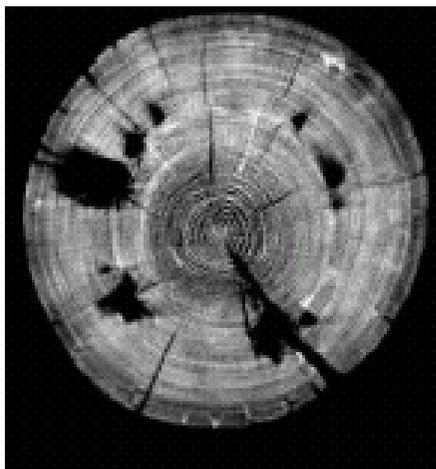


Neurology

Thoracic

Cardiology

## Du médical à l'industriel



# LES GRANDS DOMAINES DE LA TOMOGRAPHIE

**des mesures densimétriques**

**des recherches de défauts**

**des mesures dimensionnelles ou géométriques**

**des mesures de suivi dynamique.**

# Les mesures de densité en industrie

## Domaine d'excellence

Recherche de gradients de fabrication.

Mesures de **sur** ou **sous-densifications** dues au mode de fabrication des pièces.

(amélioration des procédés de fabrication)

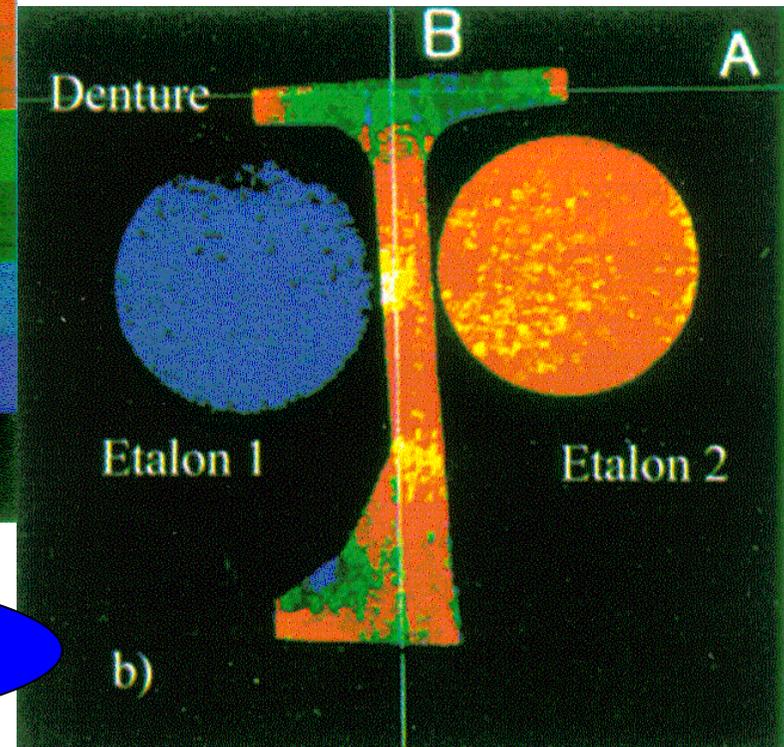
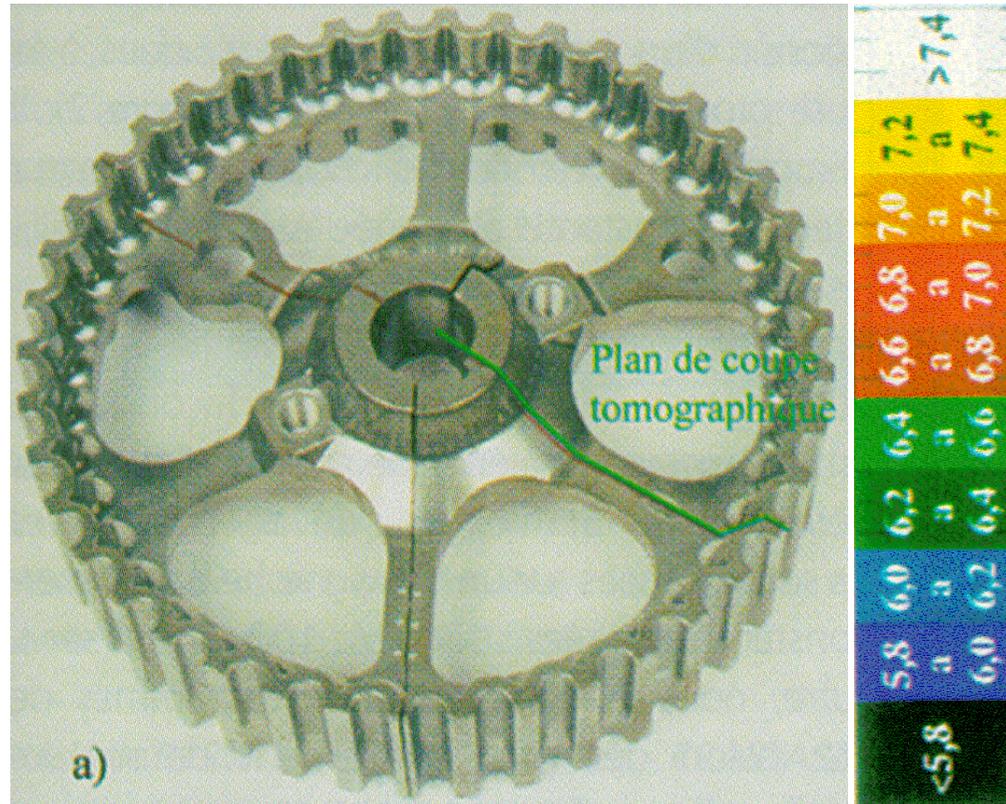
Effets de pressage ou de frittage

Effets thermiques

Effets de mauvaise homogénéité de mélange

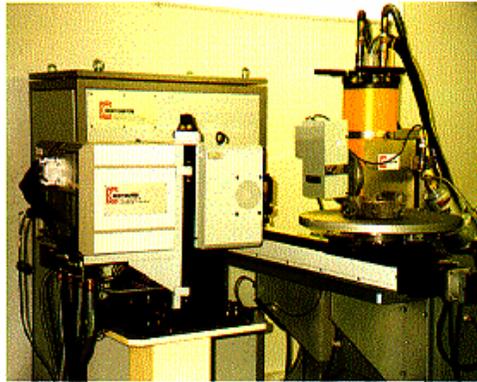
Contrôles de pièces en sollicitations.

## Exemple de mesures de densité par tomographie

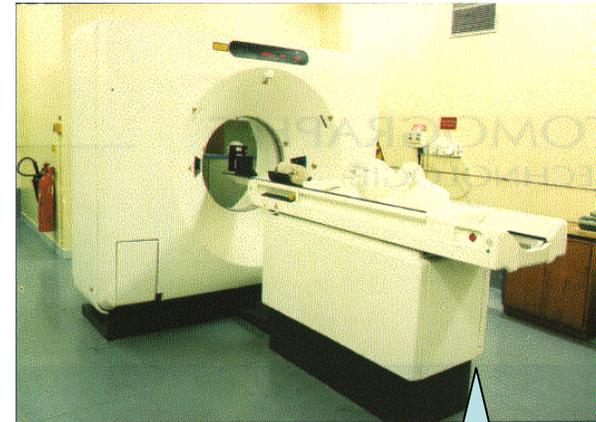


Industrie automobile:  
Arbre à came en acier fritté  
(Document PSA)

# Mesure de la résolution en densité



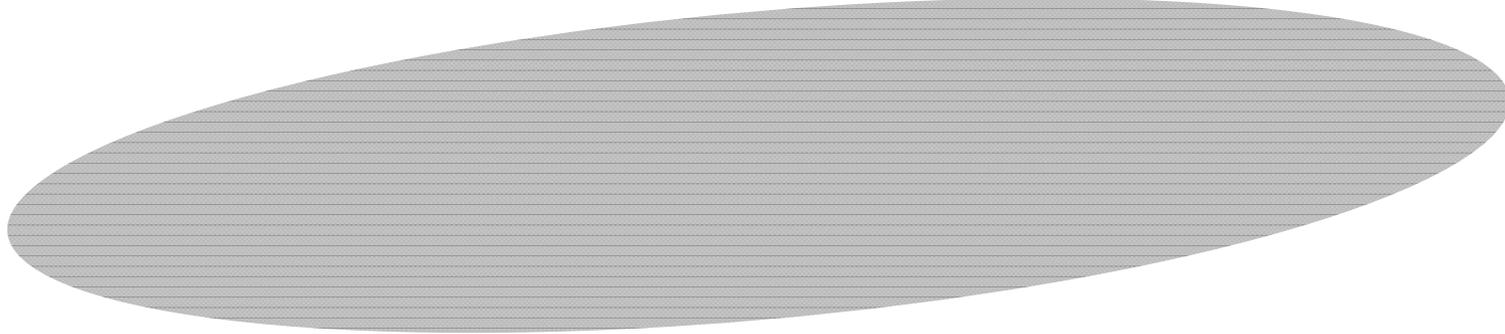
■ Tomographie bi-source



avec les installations haute énergie  
la résolution en densité moyenne est de 1%  
pour des matériaux de densité moyenne de 2.

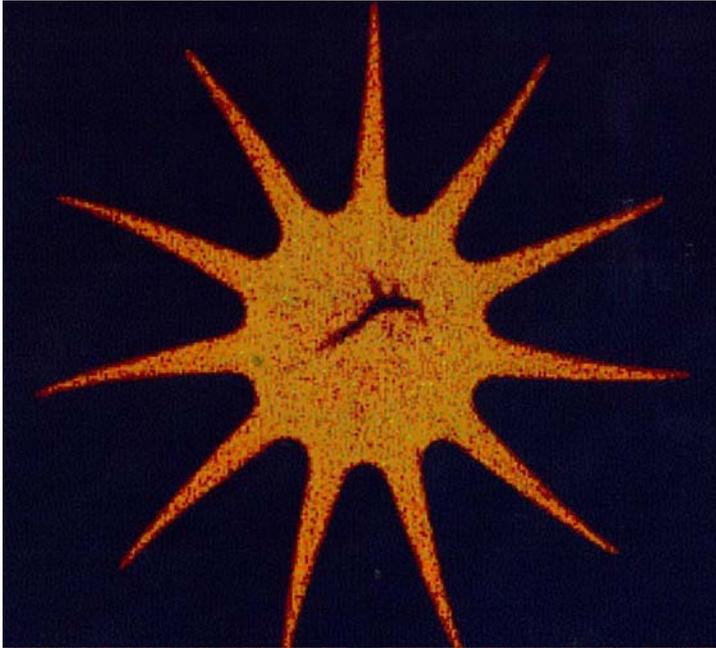
avec les installations basse énergie  
la résolution en densité moyenne est de 0,4%  
pour des matériaux de densité moyenne de 1.

**RECHERCHES  
« SPATIALES »  
DE DEFAUTS**



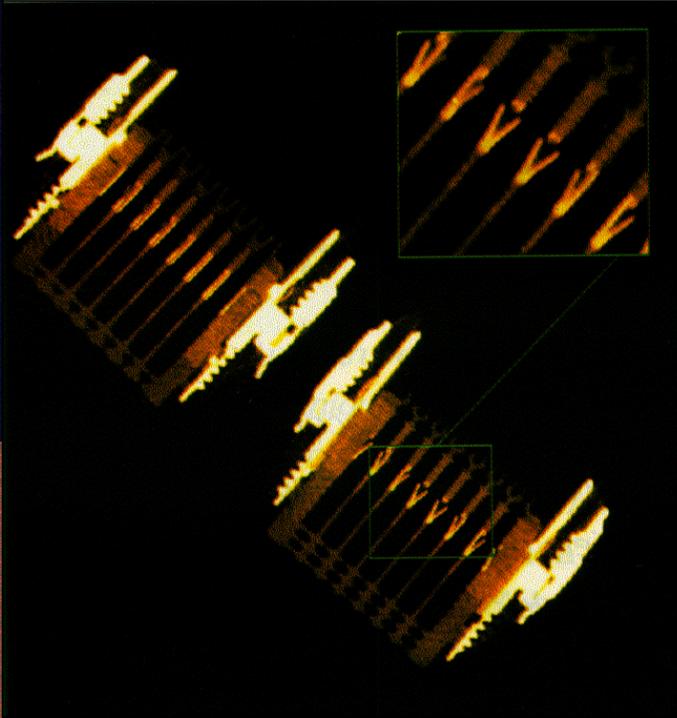
# QUELS DEFAUTS ?

- les fissures,
- les délaminages inter laminaires et intra laminaires,
- les défauts de fibres des matériaux composites,
- les porosités,
- les inclusions,
- les défauts d'assemblage (défauts de contact, mauvais positionnement d'une pièce dans une autre,
- les défauts de collage,
- la mise en évidence des manques de fusion et de pénétration des cordons de soudure
- l'évaluation des défauts de forme comme des amincissements ou des bourrelets...),
- les décohésions, les retassures ou soufflures des pièces de fonderie.

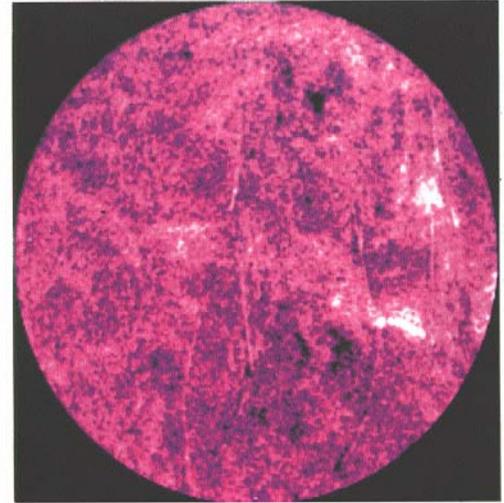


**DETECTION DE DEFAUTS DE SANTE MATIERE PAR TOMOGRAPHIE X.**

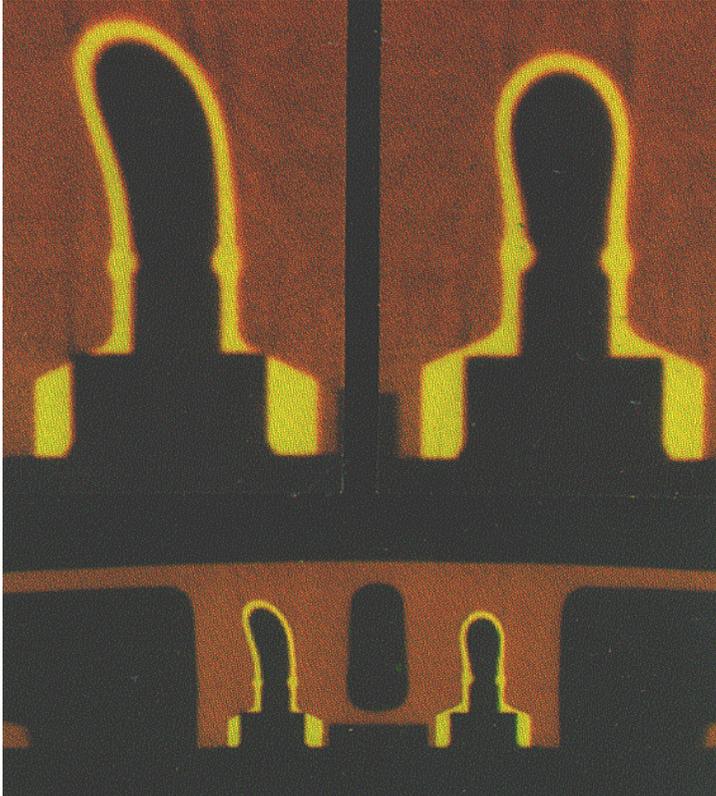
Décohésion correspondant à un manque de matière dans une roue de turbine à gaz en céramique. (Document CEA).



**Mise en évidence de défauts de contact dans un connecteur électrique de 70 mm de long**  
(Document Tomo-Adour)



**Sur-densité dans un bloc de carbone**  
0,7 mm d=0,6 g/cm<sup>3</sup> (CEA)



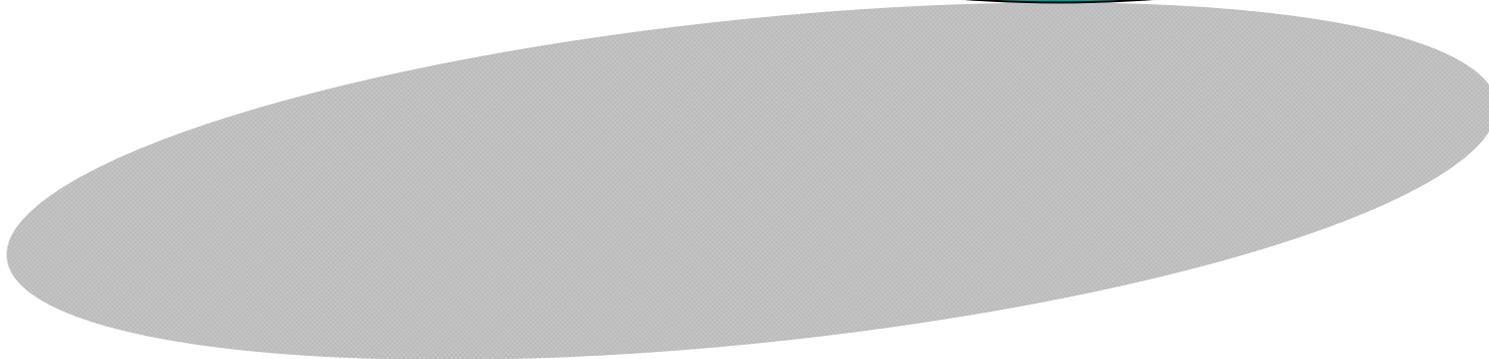
**DETECTION DE DEFAUTS DE PAROIS**

Mise en évidence d'une crevasse dans l'un des deux inserts tubulaires d'un carter automobile (Turbomeca) en alliage d'aluminium (Document Tomo-Adour)

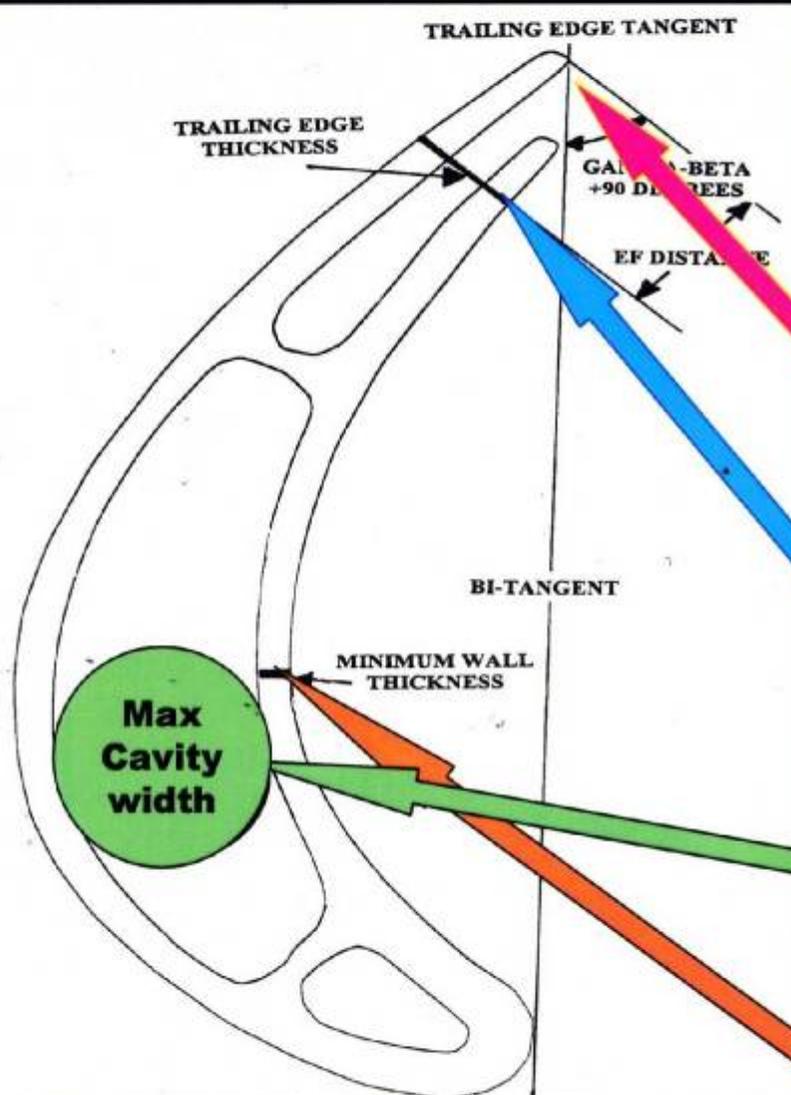


**Défaut de soudure de L=8 mm**  
dans un tube métallique

**MESURES  
DIMENSIONNELLES  
OU  
GEOMETRIQUES**



# Exemple de mesures dimensionnelles par tomographie



**Contrôle des aubes de turbine en aéronautique**

**Mesures angulaires.**

**Distances.**

**cavités**

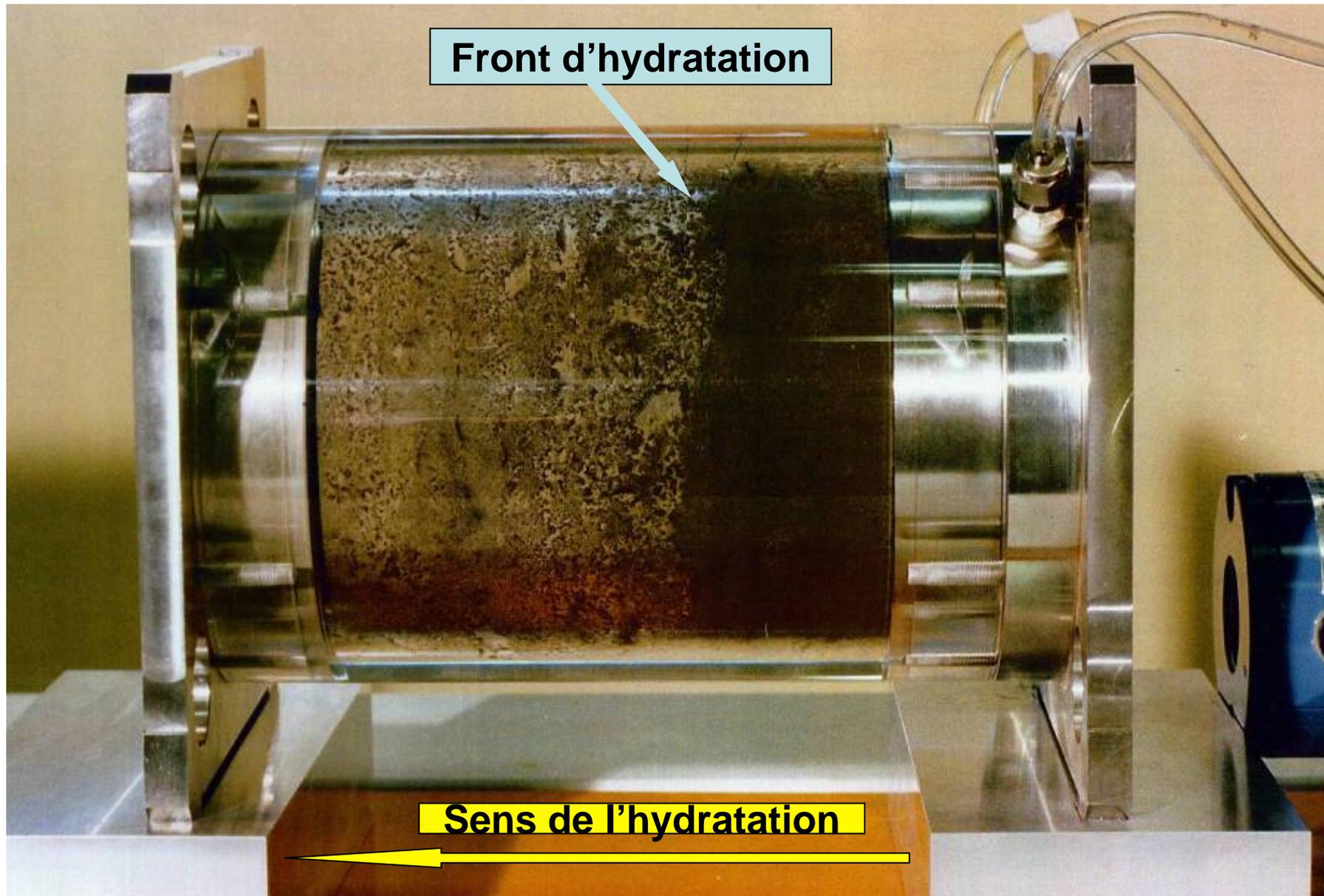
**Épaisseurs de parois.**

SCHEMA DE PRINCIPE DU CONTROLE DES AUBES.

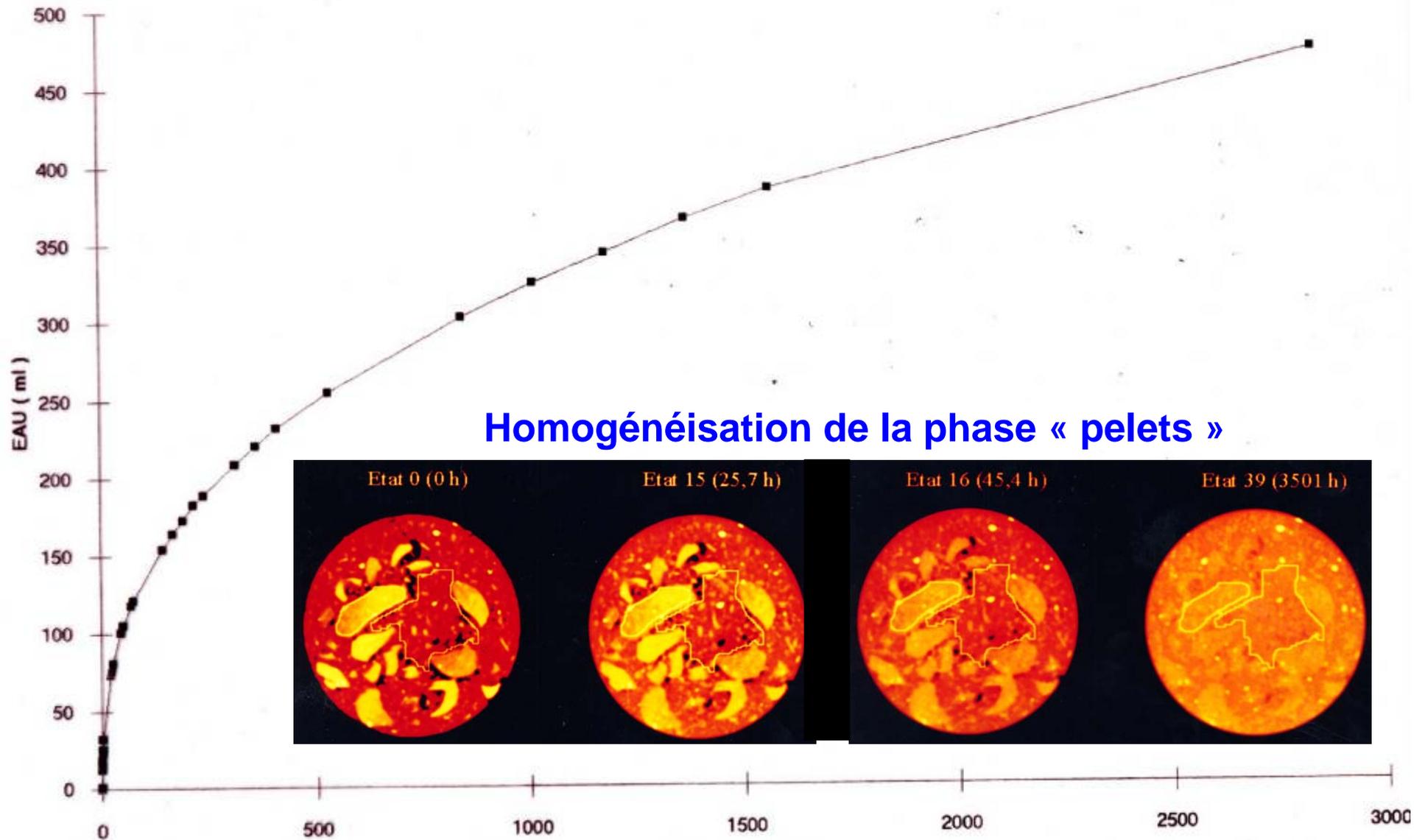
A red oval with a black outline, containing the text 'MESURES DE SUIVI DYNAMIQUE' in white, bold, uppercase letters. Below the oval is a grey shadow.

**MESURES  
DE  
SUIVI  
DYNAMIQUE**

# CELLULE D'HYDRATATION D'ARGILES DE STOCKAGE DES DECHETS NUCLEAIRES



# COURBE D'HYDRATATION DES ARGILES DE STOCKAGE DES DECHETS NUCLEAIRES EN FONCTION DU TEMPS (h)

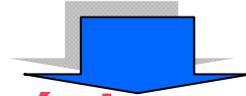


# EVOLUTION DE LA TOMOGRAPHIE

détection  quantification

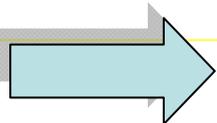
- Conçue dans le domaine médical pour déceler des « anomalies » des tissus
- A été très vite appliquée dans le domaine des CND pour traquer les « défauts » des pièces d'usine dans une stratégie « **zéro défaut** » qui conduisait au rejet des pièces « décelées défectueuses »

**Problème de coût**



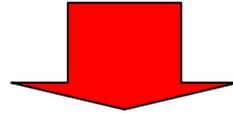
**la stratégie a changé**

- « **Défaut admissible dans un contexte de fonction** »
  - Double notion : **dimension** et **localisation**.



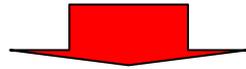
**CONNAÎTRE ET MESURER**

# MESURE



parfaite connaissance de l'appareil et de toute la chaîne de mesure.

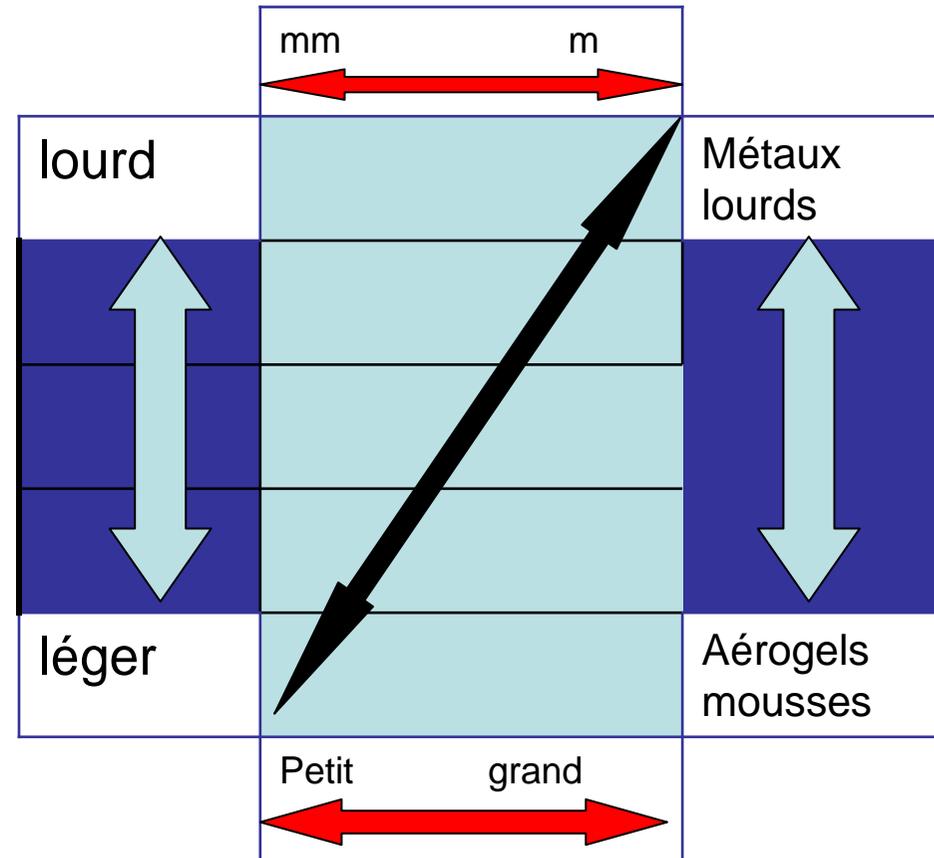
- **Pb de la tomographie**



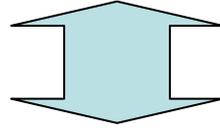
- Complexité de la technologie /  
Radio x

- Générateur
- Détecteur
- Champs-Géométrie
- Mouvement
- Reconstruction

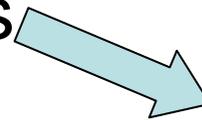
- Variété des objets et des  
matériaux



# CONNAITRE ET MESURER



- Nécessité d'étalonnage
- Méthodes de caractérisation des installations
- Uniformiser les méthodes



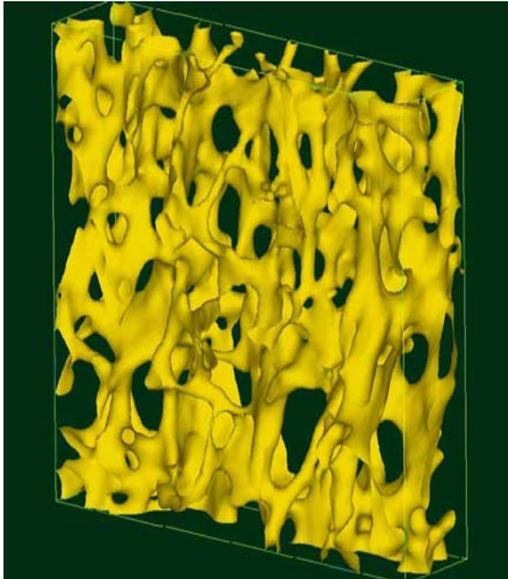
**Normalisation**

pour gagner  
des marchés

&

parler le  
même langage

# D'aujourd'hui à demain: les nouvelles "excellences" de la tomographie

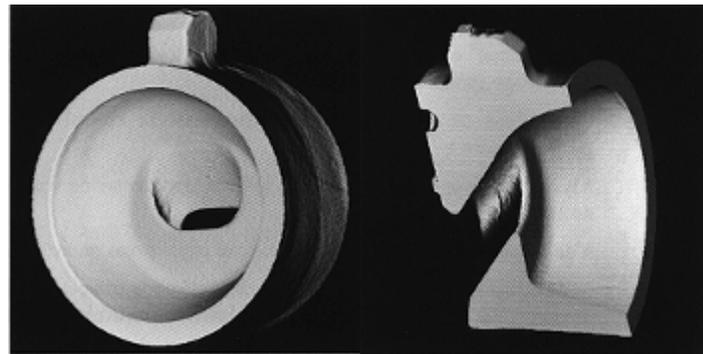


La micro-tomographie

La très haute énergie

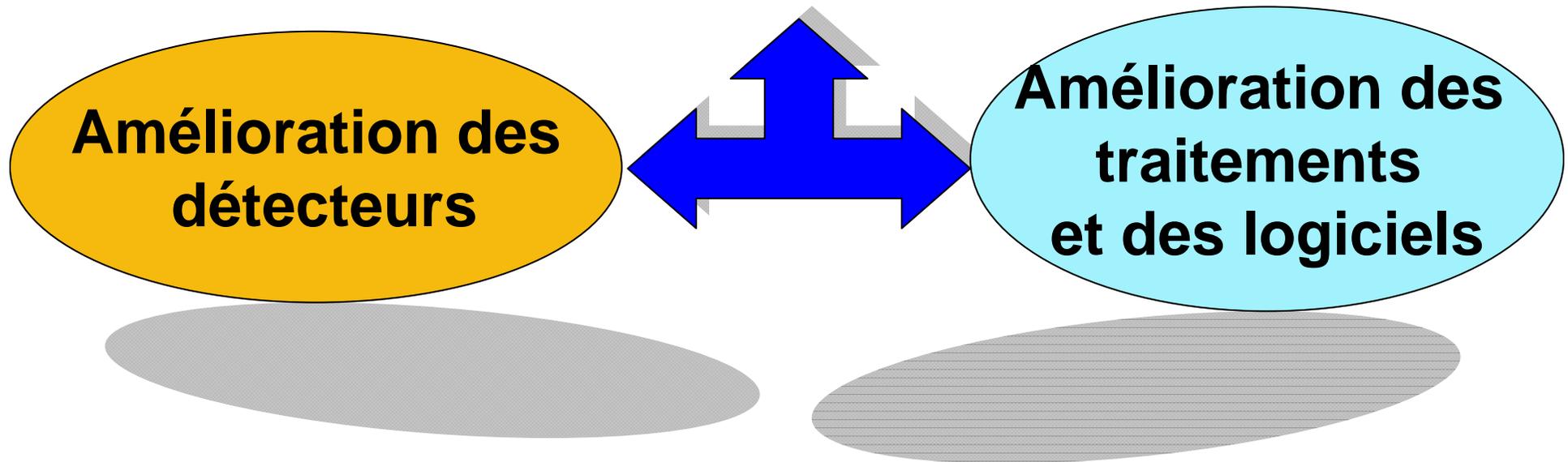
La tomographie 3D

Le « reverse engineering »



# Pourquoi de nouvelles tendances?

Quels sont les acteurs de ces nouveaux développements?



# Amélioration des détecteurs

Résolution

Rapidité

Résolution  
spatiale

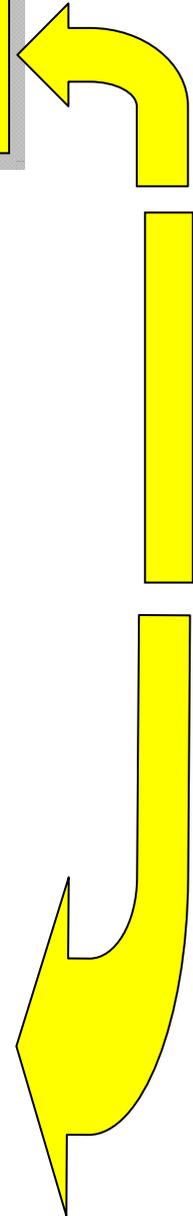
Résolution  
en densité

en énergie

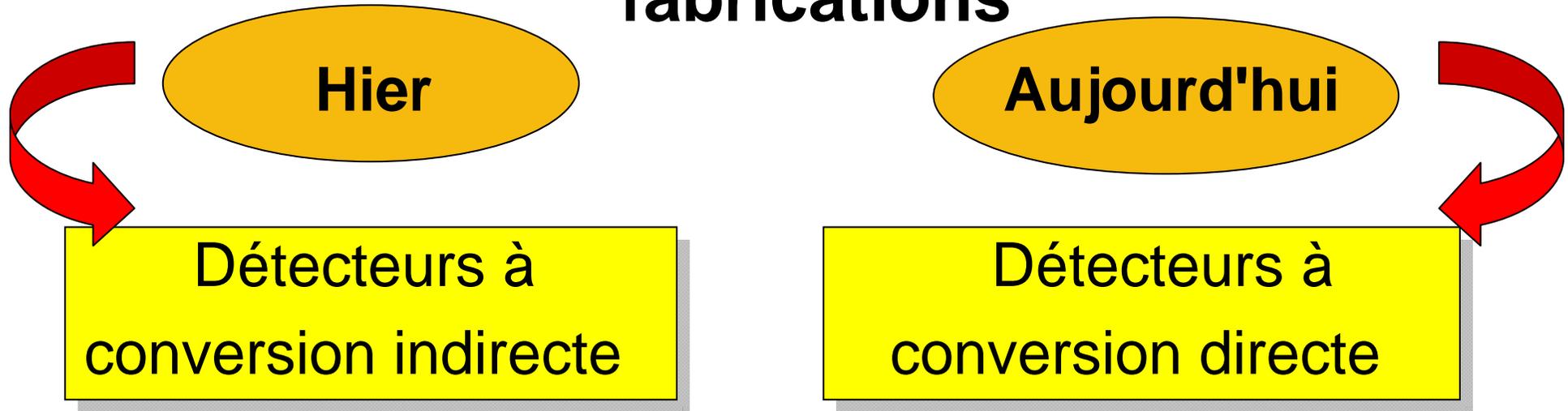
en contraste



Amélioration des technologies  
et des fabrications

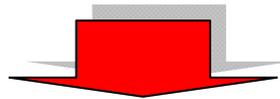


# Amélioration des technologies et des fabrications



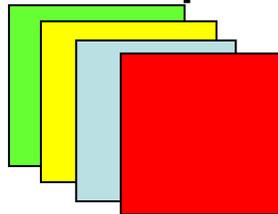
## Capteurs linéaires

"barrette 1D"



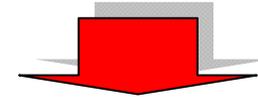
Empilement de coupes

Fausse 3D



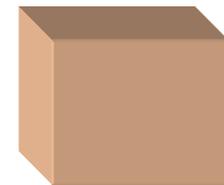
## Capteurs plans

"matrice 2D"



Vraie reconstruction

3D



# INTERETS DE L'IMAGERIE 3-D

## Limites de la TOMOGRAPHIE 2-D

1- La tomographie 2-D est limitée à un plan de coupe.

2- Le temps d'acquisition est proportionnel au nombre de coupes.

 Examens longs non adaptables aux phénomènes très rapides.

3- Discontinuité entre les coupes.

 **RESOLUTION en Z FAIBLE**

4- Mauvaise utilisation de la source X.

## La SOLUTION : LA TOMOGRAPHIE 3-D

### Comment?

**En remplaçant le détecteur 1- D par un détecteur 2- D**

Chaque point de vue correspond à une radiographie

### Avantages:

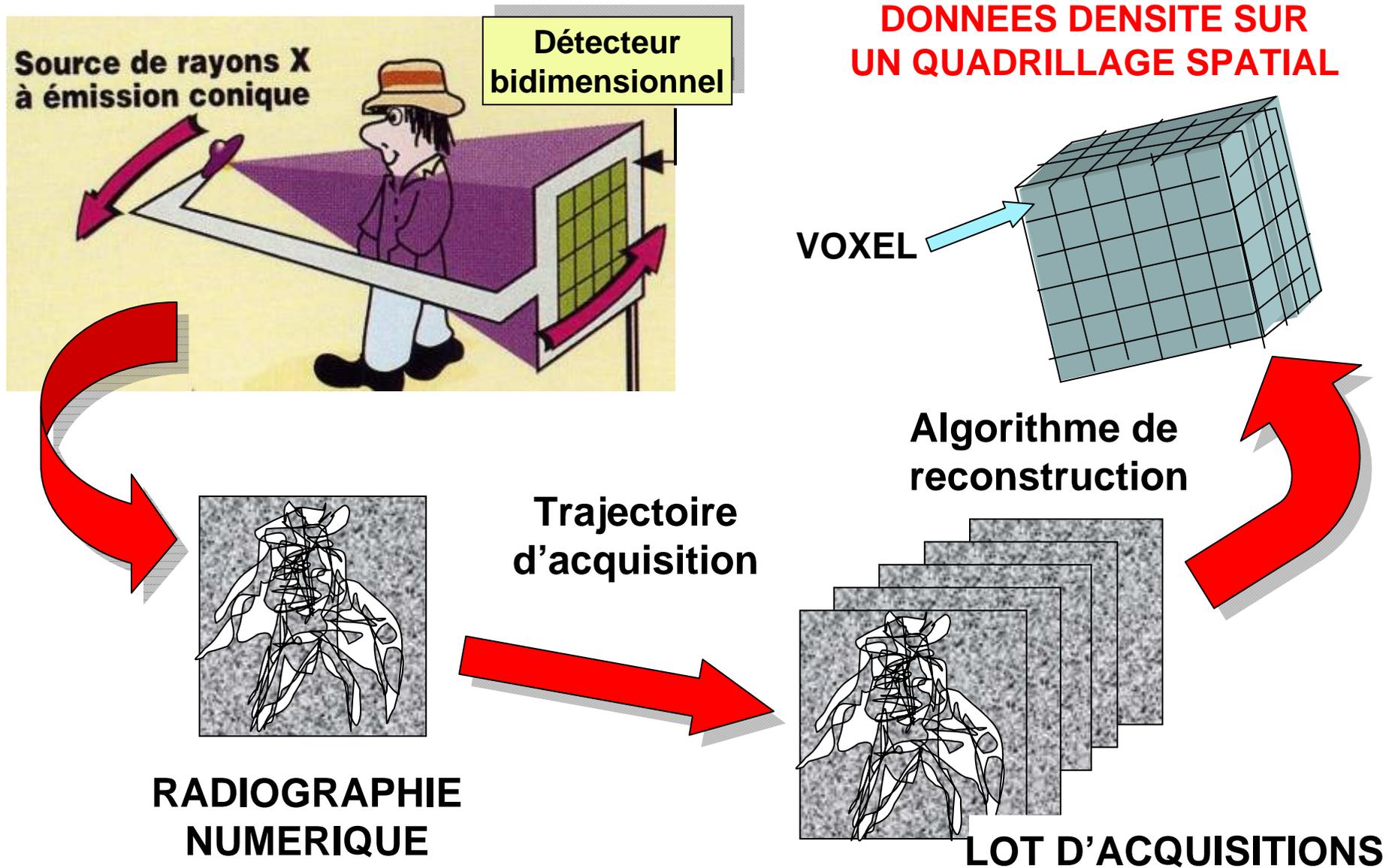
En une seule acquisition, on acquiert un lot de radiographies qui permet de

**« RECONSTRUIRE LE VOLUME DANS SA GLOBALITE »**



**LA RESOLUTION EN Z EST IDENTIQUE A CELLES EN X ET Y**

# PRINCIPE DU SYSTEME D'IMAGERIE 3D A PARTIR DE RADIOGRAPHIES X



# Progrès des traitements et des logiciels



**Avancées informatiques  
dans le traitement  
des grandes quantités  
de données  
Évolution de la taille des images**

**Evolution des  
Outils informatiques**

**Calibrage expérimental**

Positionnement

**Tomographie  
multi-échelle**

**Reconstruction**

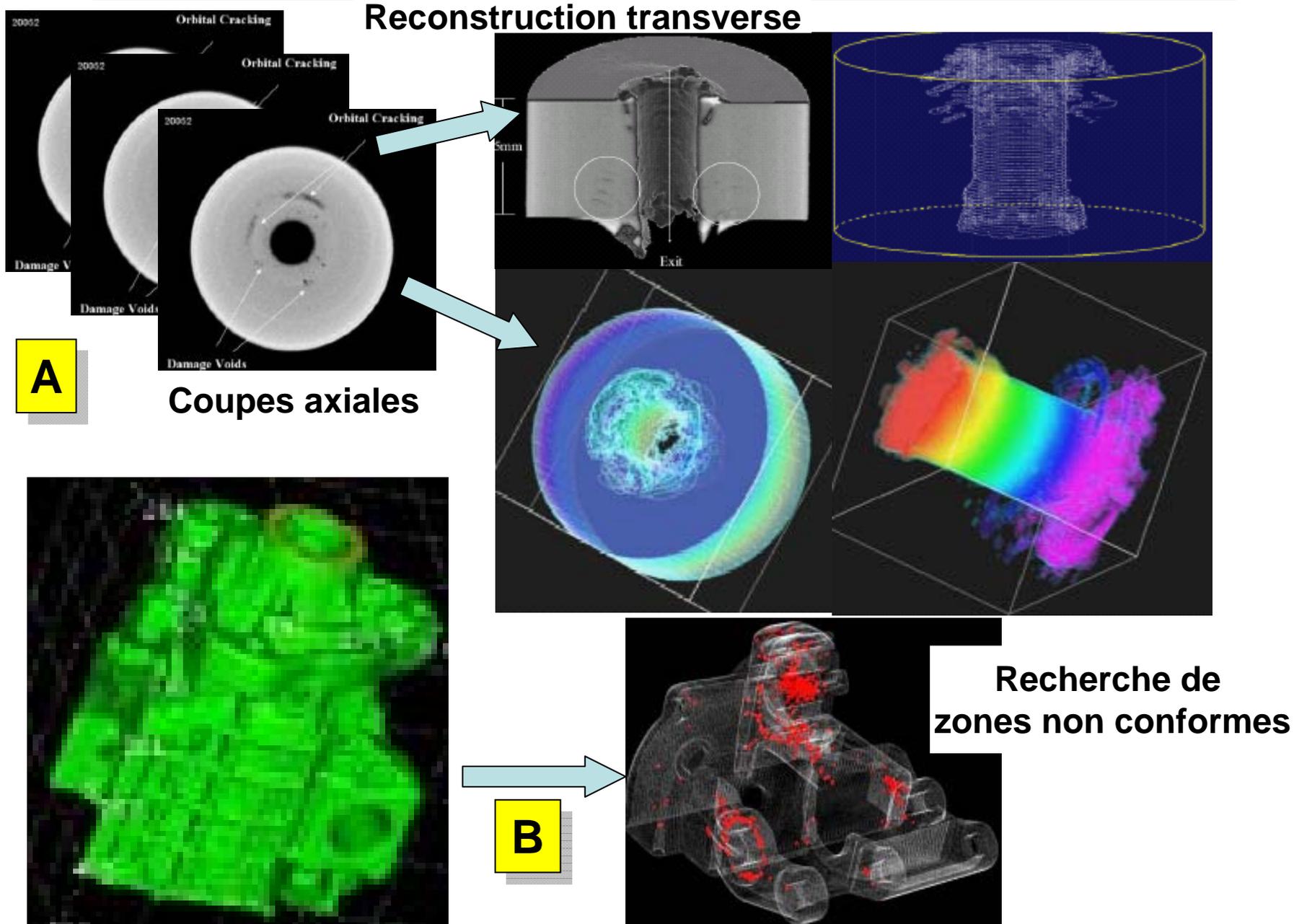
**Visualisation**

Qualité de rendu accrue  
Visualisation 3D

**Reconstruction**

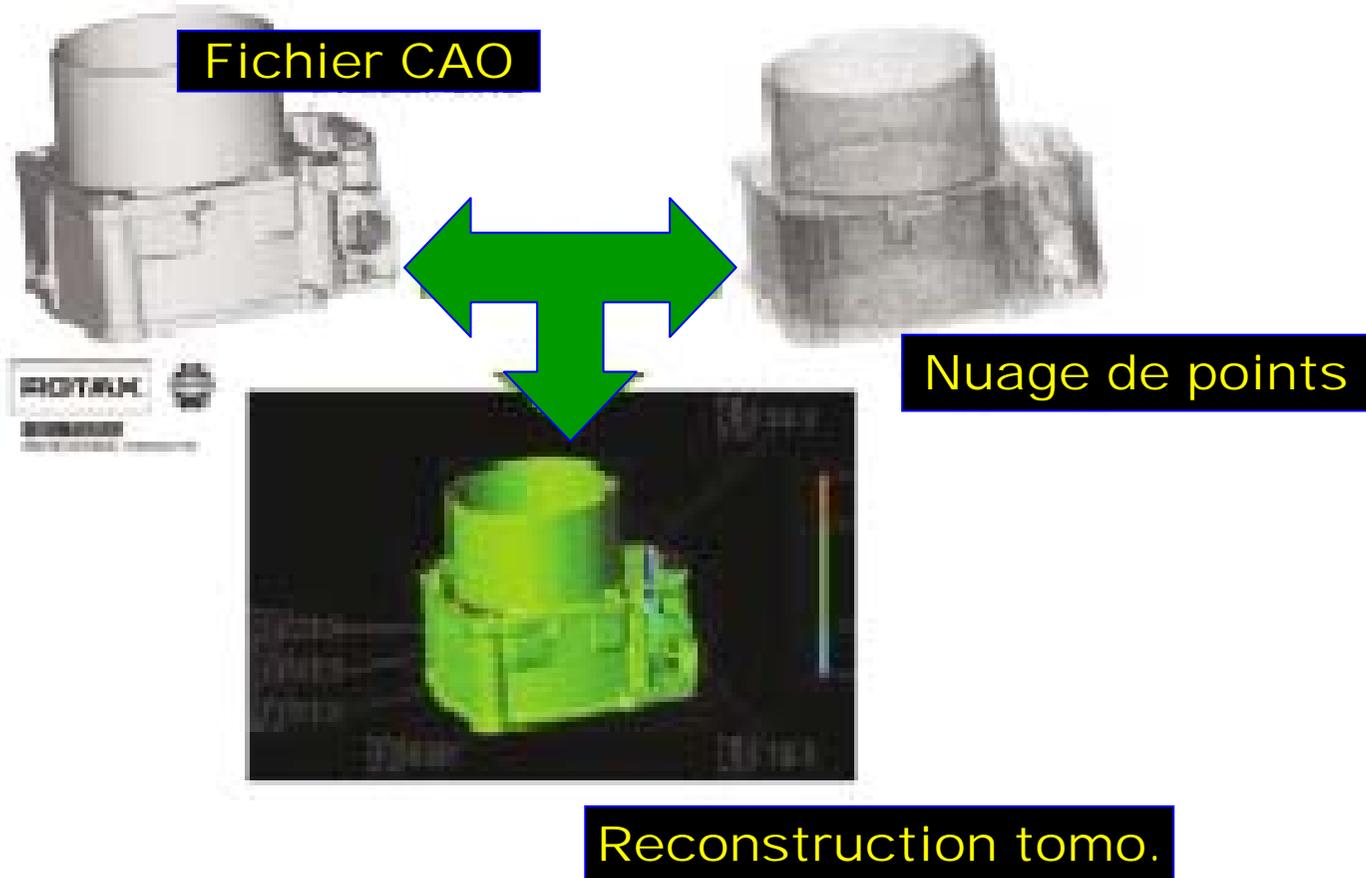
Reconstruction partielle

# Exemple de tomo.3d



# Correspondance tomographie ↔ CAO

« REVERSE ENGINEERING »

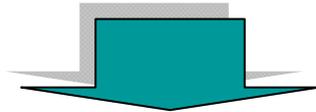


CONFORMITE OU NON-CONFORMITE DES PIECES PAR RAPPORT A UN CDC

# Point sur la normalisation

## Existence d'une norme ISO

- Remise en cause par le groupe COFREND « Tomographie Industrielle »
- Réécriture par le groupe de cette norme en la complétant de méthodes de mesure de résolution spatiale et en densité

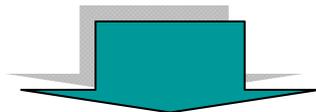


## Création d'un groupe international (CEN/TC138/WG1/AH1) (F+D+GB+Aut) sous l'égide de l'AFNOR

- Modification du texte et fractionnement en 4 parties, revues par 29 pays – Validation globale des corrections



**Norme CEN en 2011**



**Norme internationale en révision de la norme ISO.**

# Conclusion

- ✦ La technique est encore pleine de possibilités
- ✦ Le monde de la tomographie évolue et prend de plus en plus sa place vis-à-vis d'autres techniques CND

mais...

**l'outil est un « pur sang » qu'il faut dompter et comprendre pour en tirer le meilleur**



**Merci de votre  
attention**