

# De la Physique des Particules à l'Imagerie Médicale

**François Touchard**

Université de la Méditerranée et Centre de Physique des Particules de Marseille

**Pierre Delpierre**

Centre de Physique des Particules de Marseille



# Buts de la présentation

- ◆ essayer d'expliquer de que nous faisons et pourquoi nous le faisons
- ◆ montrer que la recherche fondamentale peut être très utile, surtout là où on ne l'attend pas

# Plan de la présentation

- ◆ le modèle standard de la physique des particules
- ◆ le LHC et le détecteur ATLAS au CERN
- ◆ les retombées possibles

# Plan de la présentation

- ➔ le modèle standard de la physique des particules
  - ◆ le LHC et le détecteur ATLAS au CERN
  - ◆ les retombées possibles

# Le modèle standard de la Physique des Particules

- ◆ antiquité : eau, terre, air, feu
- ◆ 1800-1850 : de plus en plus d'éléments "simples"
  - ◆ le modèle n'est pas si simple...
- ◆ classification périodique des éléments (1869)

The image shows a standard periodic table of elements. The top row is labeled with groups 1A through 8. The elements are arranged in rows and columns. A callout box at the bottom left, labeled 'Lanthanides' and 'Actinides', shows two rows of elements: Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu and Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr.

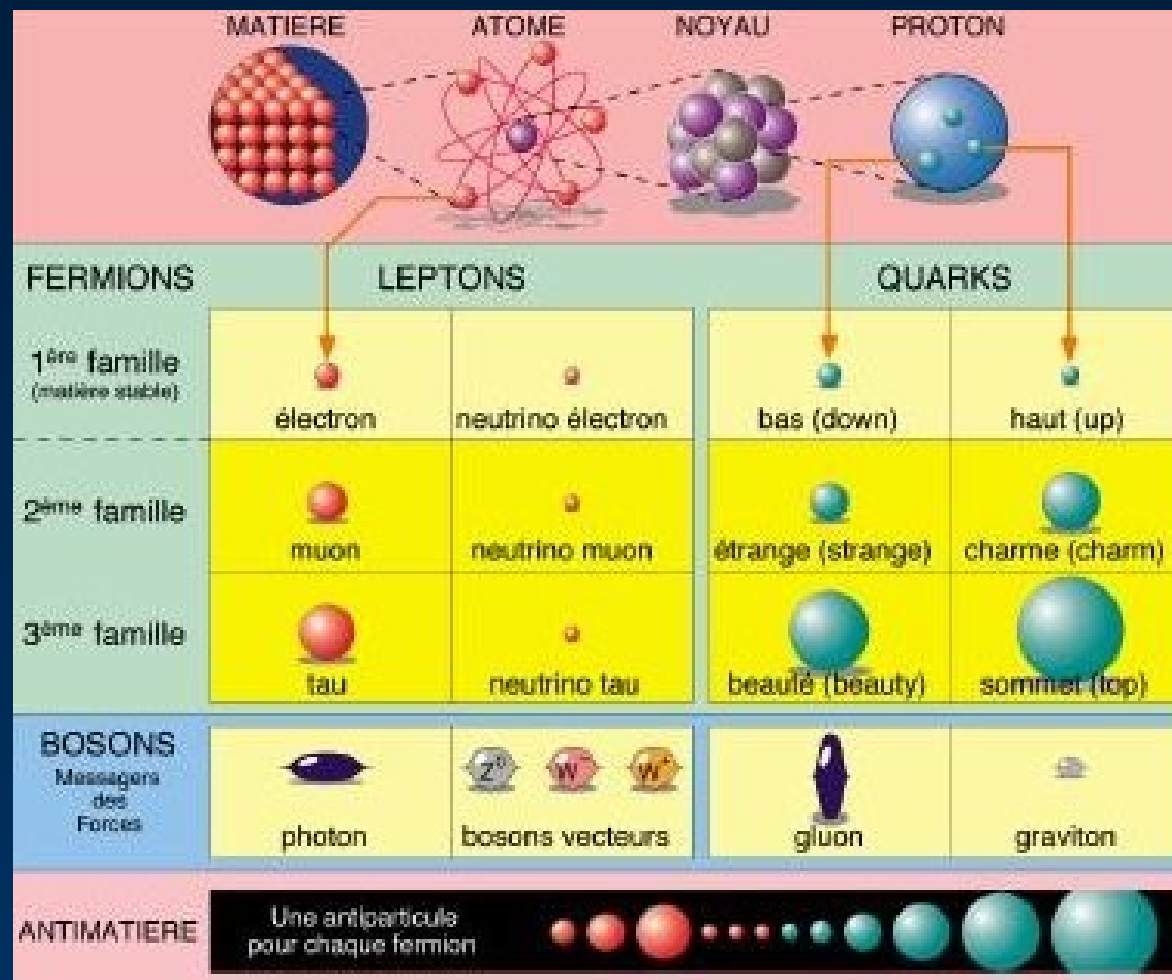
1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8		
H															He		
Li	Be							B	C	N	O	F			Ne		
Na	Mg							Al	Si	P	S	Cl			Ar		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Bk	Hk	Sg	Mh	Mt	Mt	110	111	112						
Lanthanides		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
Actinides		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

# Le modèle standard de la Physique des Particules

- ◆ modèle atomique de Rutherford (1911) expliquant les propriétés chimiques par la structure des électrons gravitant autour d'un noyau central
  - ◆ dimensions d'un atome  $\sim 1/10\ 000\ 000$  mm
- ◆ Chadwick montre en 1932 que le noyau est composé de protons et de neutrons
  - ◆ diamètre du proton  $\sim 1/100\ 000$  diamètre de l'atome
- ◆ dans les années 60, on montre que protons et neutrons sont composés de quarks unis par l'interaction forte (prix Nobel 2004 pour David Gross, David Politzer et Franck Wilczek)

# Le modèle standard de la Physique des Particules

- ◆ constituants élémentaires de la matière



# Le modèle standard de la Physique des Particules

- ◆ comment on décrit les interactions de la nature
  - ◆ par l'échange de particules (bosons vecteurs)



<i><b>TYPE</b></i>	<i><b>FORCE RELATIVE</b></i>	<i><b>PARTICULE ECHANGEE</b></i>	<i><b>EXEMPLE DE DOMAINE D'APPLICATION</b></i>
Forte	1	gluons	noyau, nucléons
Electromagnétique	$10^{-2}$	photons	atome, lumière, chimie
Faible	$10^{-6}$	bosons $\gamma$ , $Z$ , $W^+$ , $W^-$	radioactivité, énergie dsolaire
Gravitation	$10^{-30}$	graviton ?	pesanteur, systèmes planétaires



# Le modèle standard de la Physique des Particules

- ◆ l'origine de la masse des particules
  - ◆ notion assez complexe
  - ◆ mécanisme proposé par Peter Higgs
  - ◆ repose sur la "vraie" nature du vide, qui contient en fait des particules à l'état virtuel
  - ◆ parmi ces particules se trouvent les "particules de Higgs", qui créent un "champ scalaire" auquel se couplent les autres particules, leur conférant ainsi une masse

# Le modèle standard de la Physique des Particules

- ◆ le mécanisme de Higgs

- ◆ analogie due au physicien britannique David Miller de l'Université de Londres (UCL),

mise en images par le CERN

# Le modèle standard de la Physique des Particules

## ◆ le mécanisme de Higgs



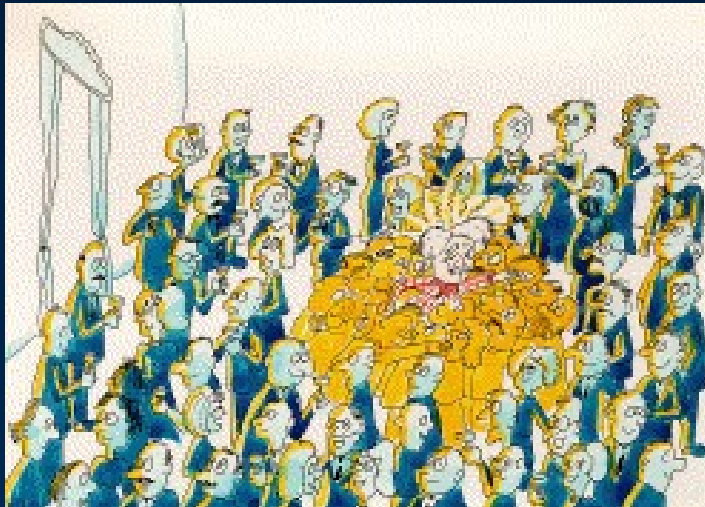
une pièce est pleine de gens en train de parler calmement...

quand une célébrité se présente à la porte. Elle va attirer plein de gens vers elle...



# Le modèle standard de la Physique des Particules

## ◆ le mécanisme de Higgs



et tous ces gens agglutinés autour d'elle vont rendre difficile sa progression à travers la pièce, lui donnant ainsi une "masse"

# Le modèle standard de la Physique des Particules

## ◆ le mécanisme de Higgs

si maintenant, c'est une rumeur qui est lancée dans la salle



elle va créer une perturbation parmi toutes les personnes présentes dans la salle, qui vont s'agglutiner en "condensats". Ces condensats représentent les particules de Higgs dans notre analogie

# Le modèle standard de la Physique des Particules

- ◆ le modèle standard est-il satisfaisant ?
  - ◆ il décrit très bien les phénomènes observés jusqu'à présent
  - ◆ des particules "prévues" par le modèle, comme le quark *top* ont été effectivement observées
  - ◆ mais on n'a pas (encore) observé de particule de Higgs
  - ◆ mais il y a encore trop de paramètres libres dans le modèle standard
    - ◆ ce qui pourrait suggérer qu'il y a un modèle plus général
      - ◆ Supersymétrie, cordes, ...

# Pour aller au delà de notre connaissance actuelle

- ◆ grâce à la génération précédente d'expériences au CERN et aux Etats-Unis, nous avons consolidé notre compréhension du modèle standard
- ◆ l'étape suivante est d'observer (ou de démontrer que l'on n'a rien observé !) la ou les particules de Higgs, ainsi que des indications pour un modèle plus général
- ◆ expériences de type "exploratoire" (par opposition aux expériences de type "systématique" de la génération précédente)

# Pour aller au delà de nos connaissances actuelles

- ◆ le programme en place au niveau mondial prépare l'étude de collisions entre protons de très haute énergie (14 mille milliards d'eV)
- ◆ 2 détecteurs "concurrents" pour essayer de mettre en évidence des phénomènes nouveaux
  - ◆ CMS (Compact Muon Solenoid)
  - ◆ ATLAS (A Toroidal Apparatus for LHC)



# Plan de la présentation

- ◆ recherche fondamentale et société
- ◆ le modèle standard de la physique des particules
- ➔ le LHC et le détecteur ATLAS au CERN
- ◆ les retombées possibles

# Le LHC et le détecteur ATLAS

- ◆ rôle d'un détecteur de physique des particules
  - ◆ "photographier" les collisions entre protons
  - ◆ identifier les particules produites
  - ◆ mesurer leurs caractéristiques (énergie, impulsion)
- ◆ pour pouvoir observer de nouveaux phénomènes
  - ◆ les énergies des faisceaux doivent être augmentées
  - ◆ la plupart des phénomènes qui se produisent et qui sont observés dans une collision sont bien connus
  - ◆ ceux qui nous intéressent sont rares !

# Le LHC et le détecteur ATLAS

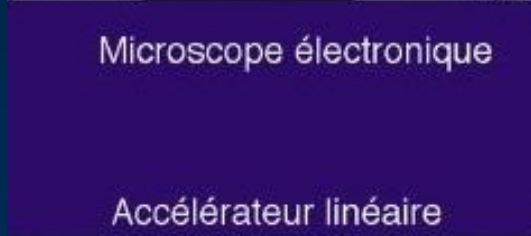
- ◆ améliorations nécessaires sur les accélérateurs et les détecteurs
  - ◆ augmenter l'énergie des faisceaux
  - ◆ augmenter le nombre de collisions par seconde
  - ◆ optimiser la résolution des détecteurs
  - ◆ diminuer le temps de réponse du détecteur
  - ◆ optimiser le système de déclenchement et d'acquisition

# Le LHC et le détecteur ATLAS

## ◆ Les accélérateurs de particules



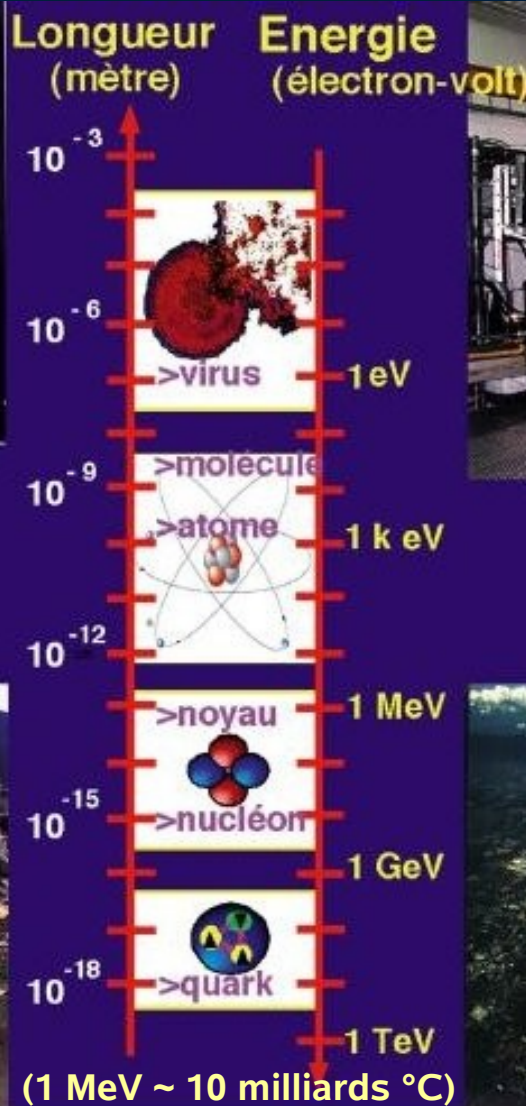
Microscope électronique



Accélérateur linéaire



T2



Cyclotron



Synchrotron



# Le LHC et le détecteur ATLAS

- ◆ le LHC : Large Hadron Collider
  - ◆ construit dans le tunnel du LEP (27 km de long)  
démarrage prévu en 2007
  - ◆ 14 TeV (mille milliards d'eV)
  - ◆ supraconducteur
  - ◆ 1 collision toutes les 25 ns
  - ◆ 2 milliards € (hors tunnel)



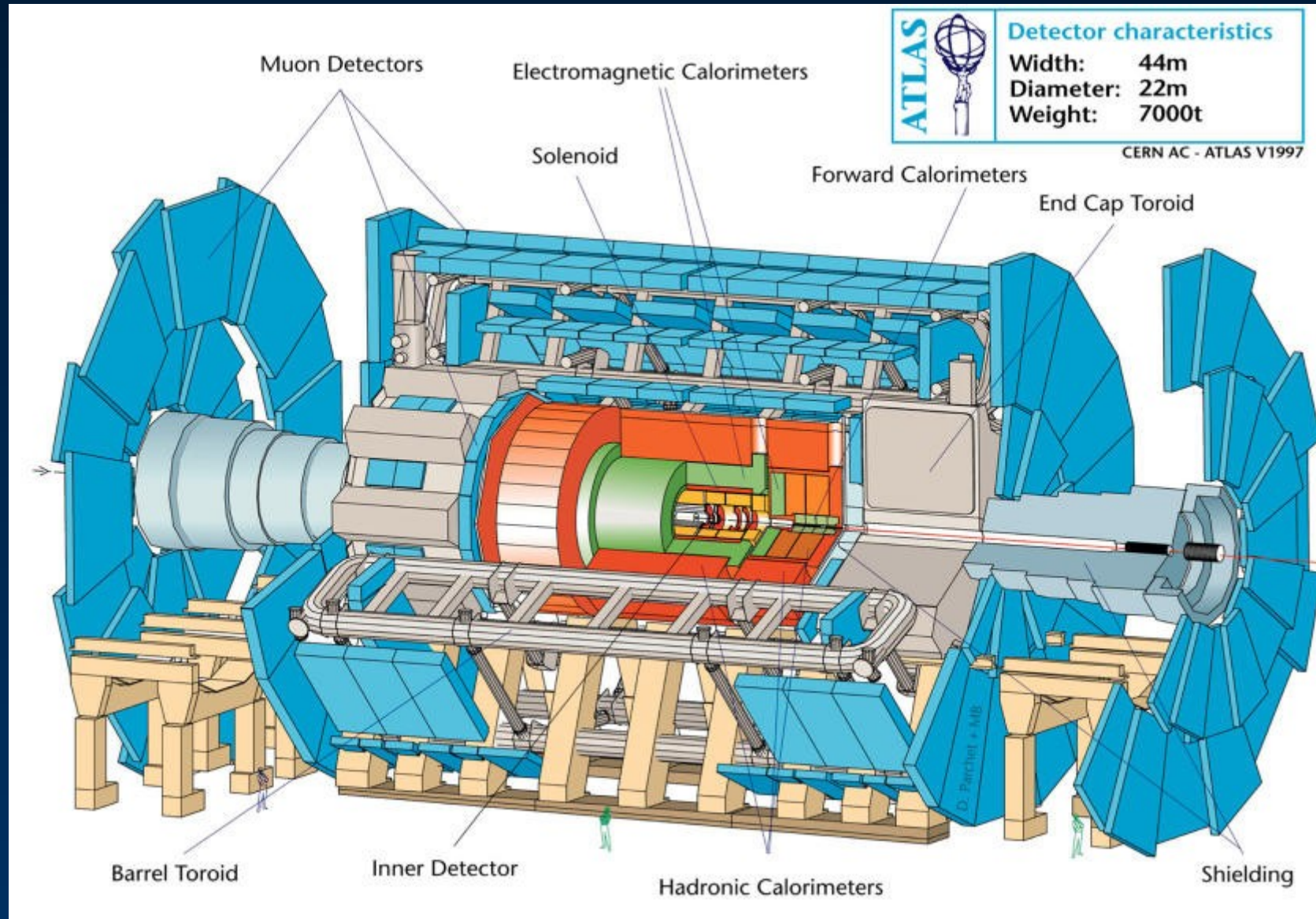
# Le LHC et le détecteur ATLAS

## ◆ ATLAS

- ◆ une des 4 expériences du LHC (la plus grosse)
- ◆ 1700 chercheurs et ingénieurs de 36 pays, dont environ 200 français
- ◆ 300 millions €

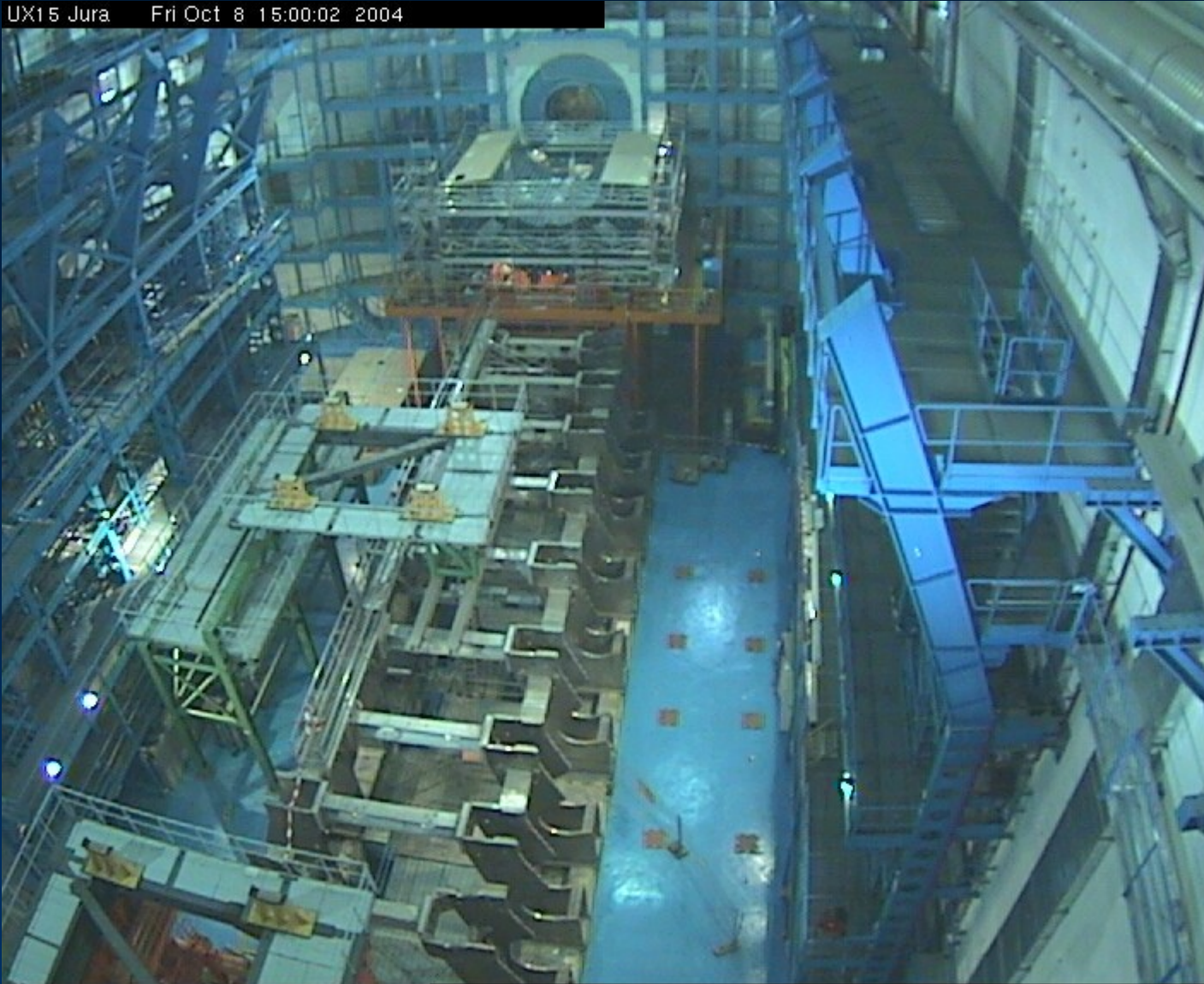


# Le LHC et le détecteur ATLAS



# Le LHC et le détecteur ATLAS

UX15 Jura Fri Oct 8 15:00:02 2004





# Le LHC et le détecteur ATLAS



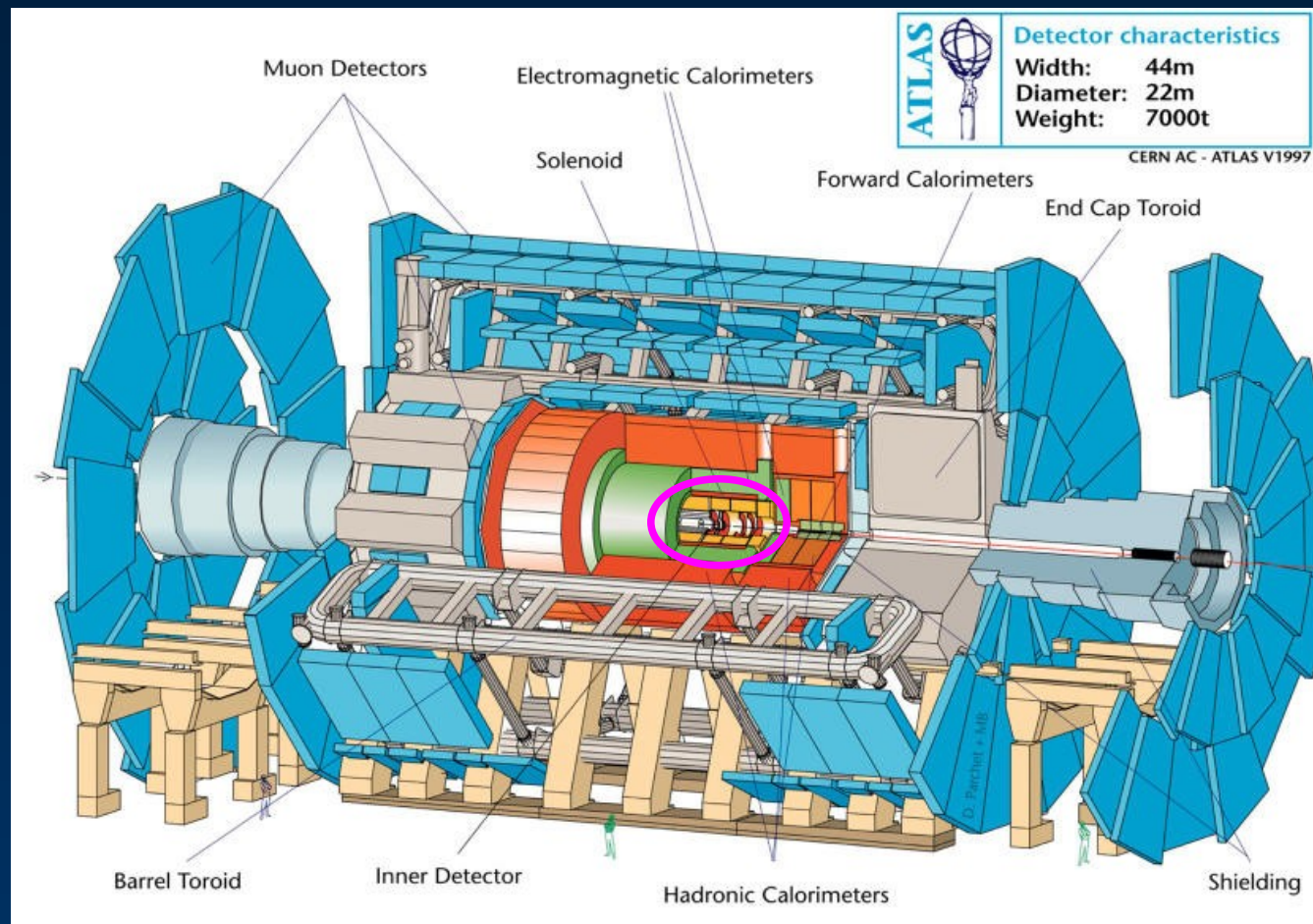
# Le LHC et le détecteur ATLAS

UX15 Jura Tue May 17 13:30:05 2005



# Le LHC et le détecteur ATLAS

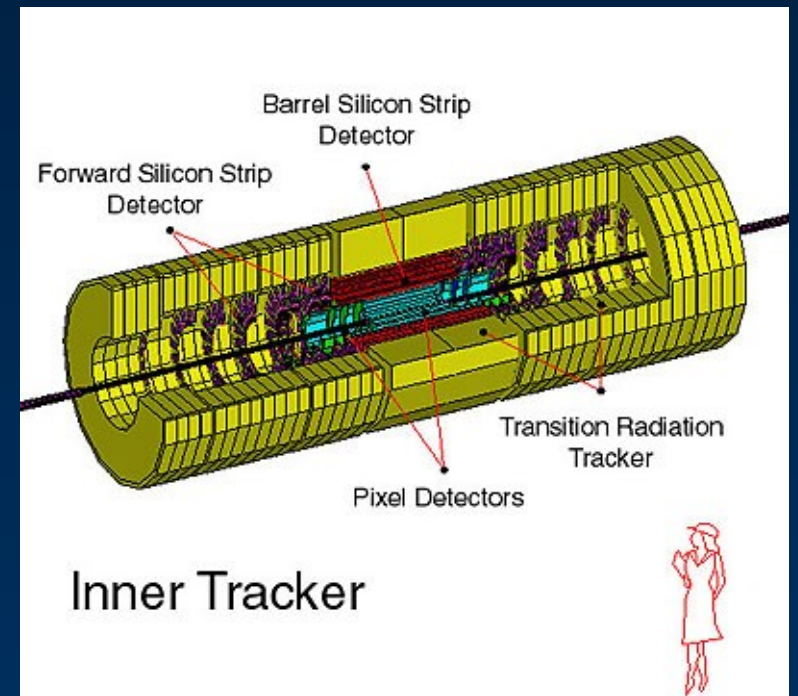
## ◆ le détecteur interne



# Le LHC et le détecteur ATLAS

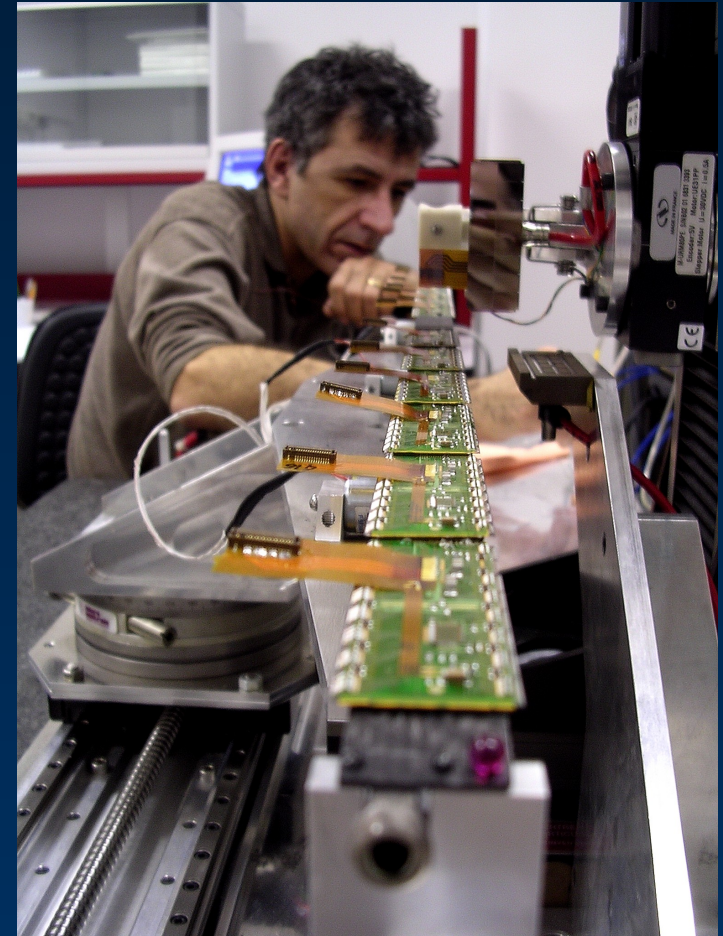
## ◆ le détecteur interne

- ◆ sert à identifier les particules et à mesurer leur impulsion
- ◆ très "léger" pour ne pas détériorer l'information des détecteurs suivants
- ◆ 3 composants
  - ◆ pixels
  - ◆ silicium
  - ◆ TRT
- ◆ les pixels sont développés essentiellement à Marseille



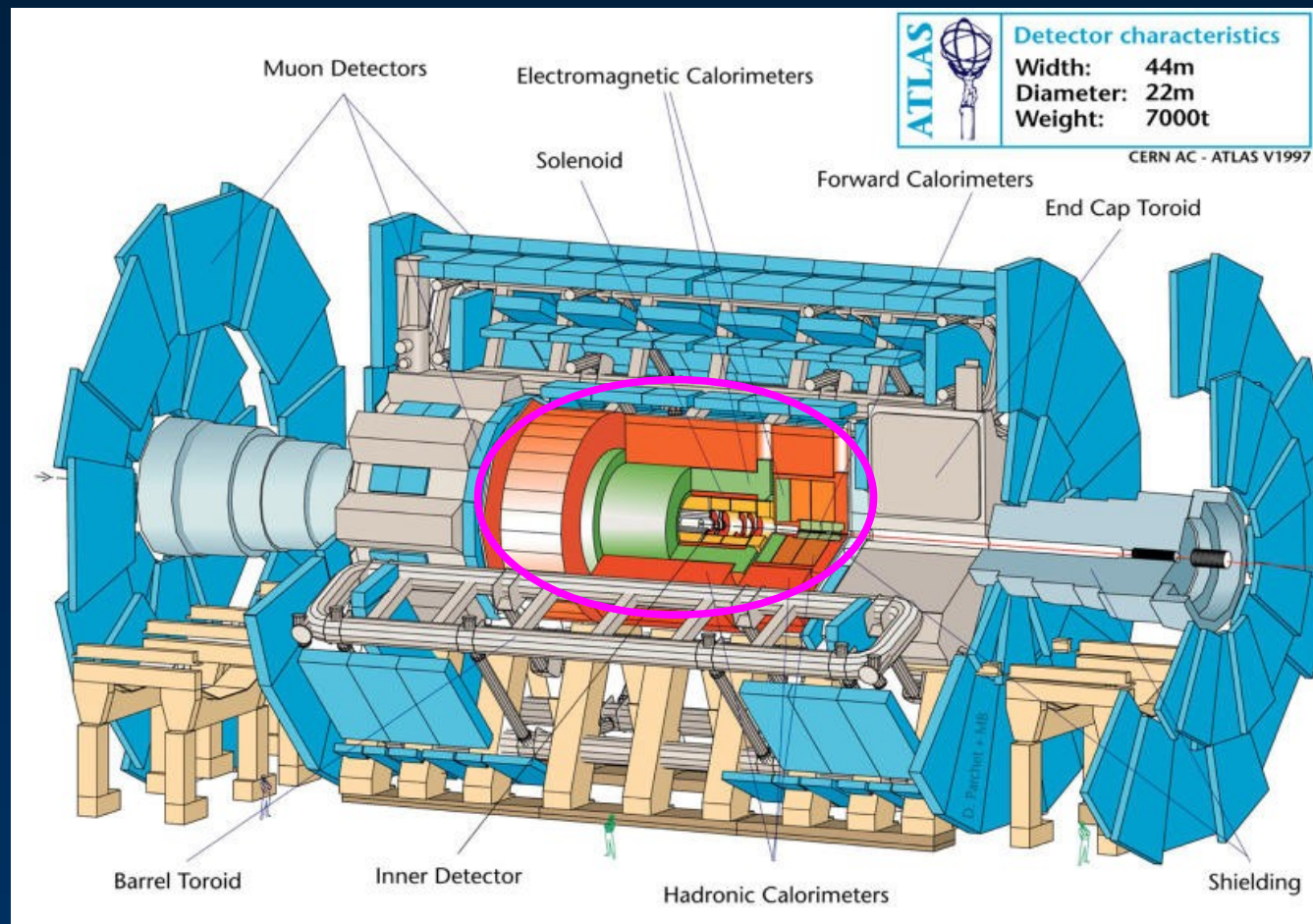
# Le LHC et le détecteur ATLAS

- ◆ le détecteur à pixels
  - ◆ gigantesque appareil photo : 87 millions de pixels, chacun faisant  $\sim 400 \times 50 \mu\text{m}$  surface totale :  $1,7 \text{ m}^2$
  - ◆ il faut pouvoir lire les cellules en moins de  $10 \mu\text{s}$
  - ◆ développement de techniques de détection, de lecture et de transmission de l'information extrêmement performantes (CPPM)



# Le LHC et le détecteur ATLAS

## ◆ le calorimètre



# Le LHC et le détecteur ATLAS

## ◆ le calorimètre

- ◆ pour améliorer l'identification et mesurer l'énergie des particules
- ◆ une partie du calorimètre est sous la responsabilité de Marseille et construite au CPPM



# Le LHC et le détecteur ATLAS

- ◆ le système de déclenchement et d'acquisition
  - ◆ la plupart des événements correspondent à des faits bien connus, à peine 1 sur 5 000 000 peut présenter de l'intérêt
  - ◆ chaque événement représente une quantité d'information de l'ordre de 100 millions d'octets et il y a 40 millions de collisions par seconde, soit environ  $4 \cdot 10^{12}$  octets (4000 milliards, l'équivalent de 5000 CD-ROMs ou 1000 DVD gravés par seconde) !
    - ◆ il faut trier, à l'aide de moyens informatiques très puissants, pour n'écrire "que" 1 CR-ROM toutes les 4 s
  - ◆ une partie de ce système est mise au point à Marseille

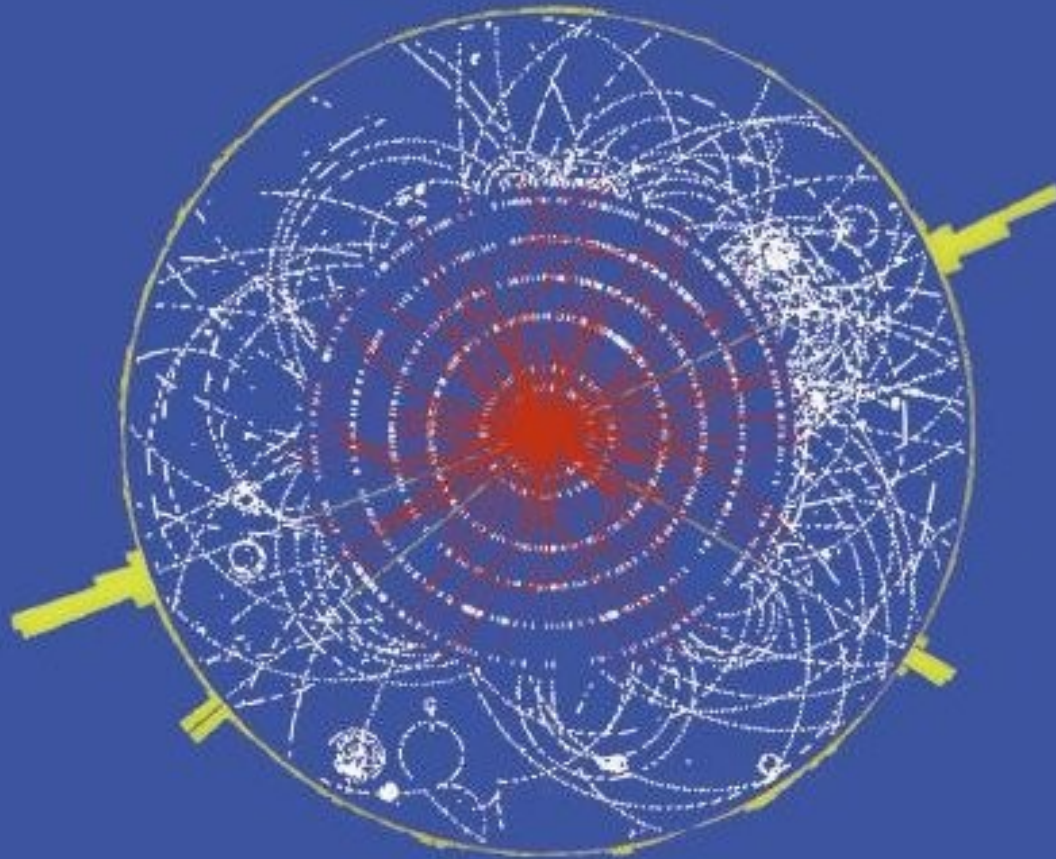


# un événement simulé d'ATLAS

ATLAS

$H (130 \text{ GeV}) \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$

$L = 5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



# Le LHC et le détecteur ATLAS

- ◆ ensuite il faut analyser précisément les informations acquises
  - ◆ avec des "fermes" d'ordinateurs (en fait de simples PC)
- ◆ mais répartis partout dans le monde
  - ◆ plus de 30 000 sont nécessaires



- ◆ et accessibles de partout
  - ◆ concept de "Grille"

# Plan de la présentation

- ◆ recherche fondamentale et société
- ◆ le modèle standard de la physique des particules
- ◆ le LHC et le détecteur ATLAS au CERN
- ➡ les retombées possibles

# Les retombées possibles

- ◆ une question tout à fait naturelle :  
"est-ce-que tout ça est bien nécessaire  
ou même utile ?"
- ◆ difficile pour moi de donner une réponse "objective"
  - ◆ ce sont aux citoyens de répondre...
  - ◆ ... et aux scientifiques de fournir les informations nécessaires
- ◆ l'histoire récente pullule d'exemples de développements pratiques totalement inattendus
  - ◆ les rayons X et la radiologie

# Les retombées possibles

quelques exemples concrets liés à la physique des particules

- ◆ un exemple du passé récent : le web

- ◆ il est né au CERN en 1990, pour permettre aux physiciens d'échanger des documents à l'intérieur du site, sans avoir besoin de "rentre" dans chacun des ordinateurs locaux
- ◆ initialement, le protocole développé par Tim Berners-Lee était prévu pour faire communiquer entre eux des systèmes d'acquisition pour les expériences

<http://public.web.cern.ch/Public/Welcome-fr.html>

# Les retombées possibles

- ◆ un exemple pour le futur proche : les grilles de calcul
  - ◆ les besoins en calcul pour l'analyse des résultats du LHC sont gigantesques et ne peuvent plus être fournis par un centre de calcul unique
  - ◆ mise en réseau des centres de calcul existants et "transparence" pour les utilisateurs ("grille")
  - ◆ la communauté de la physique des particules a décidé dès le départ d'associer l'ensemble des utilisateurs potentiels de calcul aux développements liés à la grille
    - ◆ scientifiques
    - ◆ mais aussi grand public

# Les retombées possibles

- ◆ le détecteur de vertex fonctionne comme une grosse caméra numérique très rapide
  - ◆ on peut utiliser les technologies développées dans notre application pour d'autres domaines
  - ◆ l'imagerie médicale est très demandeuse en termes de vitesse d'acquisition
    - ◆ moins de risques de « bougé »
    - ◆ moins de produits « sensibilisants »
- ◆ mise en place au CPPM d'une collaboration avec des équipes médicales pour développer des technologies d'imageries basées sur les détecteurs de la physique des particules

# Les retombées possibles

**IMAGEUR à RAYONS-X  
basé sur les PIXELS HYBRIDES**

**XPIX**  
**IMAGEUR A RAYON-X**  
pour la **CRISTALLOGRAPHIE**

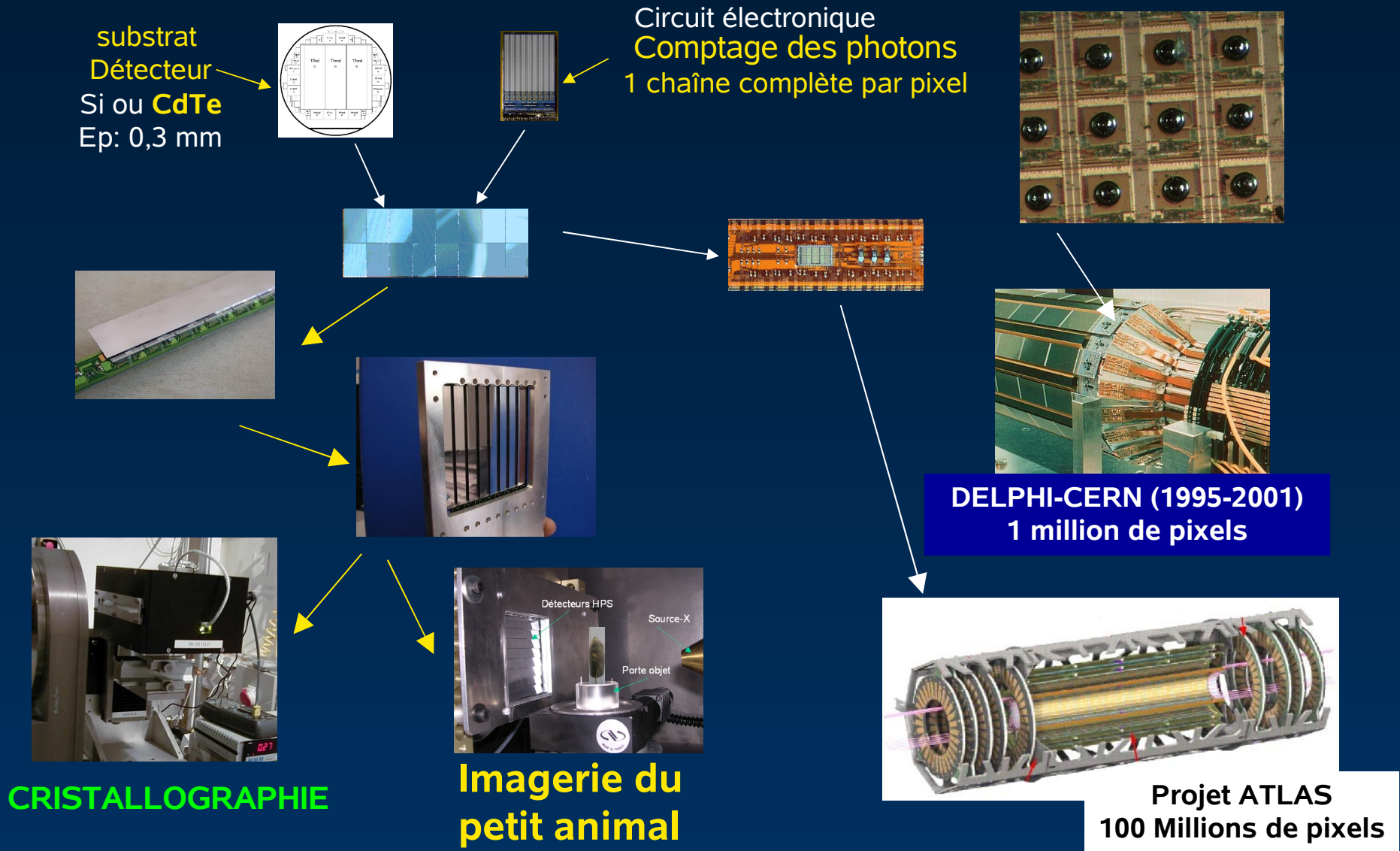
2 Projets  
avec les mêmes détecteurs

**PIXSCAN**  
**SCANNER-CT** insérable dans un **TEP**  
pour l'**IMAGERIE** du **PETIT ANIMAL**





# Les détecteurs à pixels hybrides



# Intérêt des pixels hybrides (HPS)

Apport des détecteurs à pixels hybrides pour l'imagerie en rayon-X  
ce que l'on n'a pas avec les CCD ou les pixels CMOS (APS)

comptage individuel des photons

Suppression du **bruit** électronique et physique (e-, X hors énergie)

Sélection d'une **fenêtre en énergie**

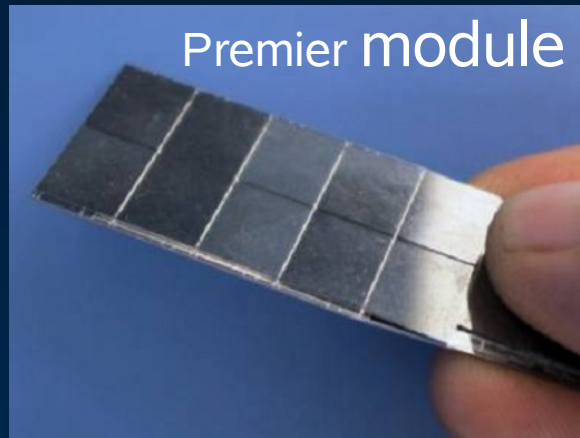
Très **grande dynamique** en luminosité intégrée (plus de  $10^9$ )

« « en flux (de 0,01 ph/s/pixel à  $10^6$  ph/s/pixel)

Très grande **rapidité d'acquisition** (< 2 ms)

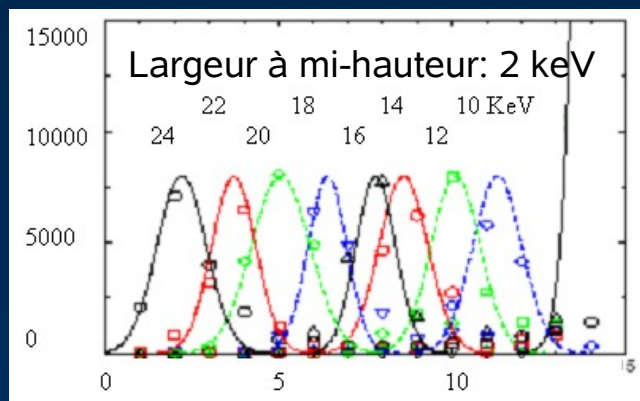
Choix du substrat **capteur** (Si, CdTE, AsGa)

# Pemier prototype

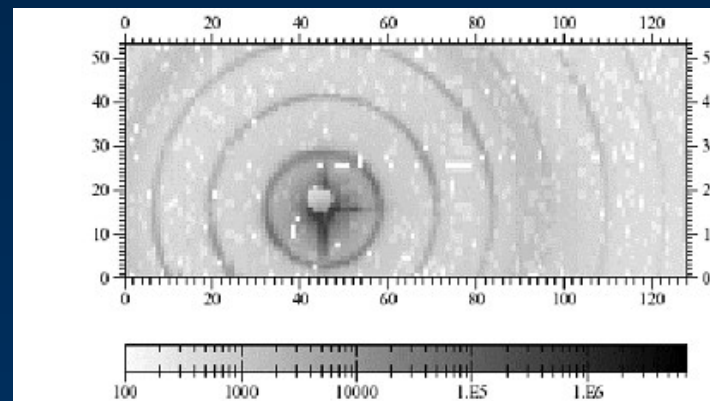


- Capteur silicium (de DELPHI)
- Pixels de  $330 \times 330 \mu\text{m}$
- Circuit à comptage de photons **XPAD1**
  - compteurs de 15 bits dans chaque pixel
  - Taux de comptage: linéaire jusqu'à  $5 \cdot 10^5 \text{ Ph/s/pix}$
- Système d'acquisition rapide
  - lecture des overflows et addition dans un compteur de 16 bits => **Dynamique =  $2 \cdot 10^9$**
  - Sortie ETHERNET => PC

## Tests en faisceau à l'ESRF

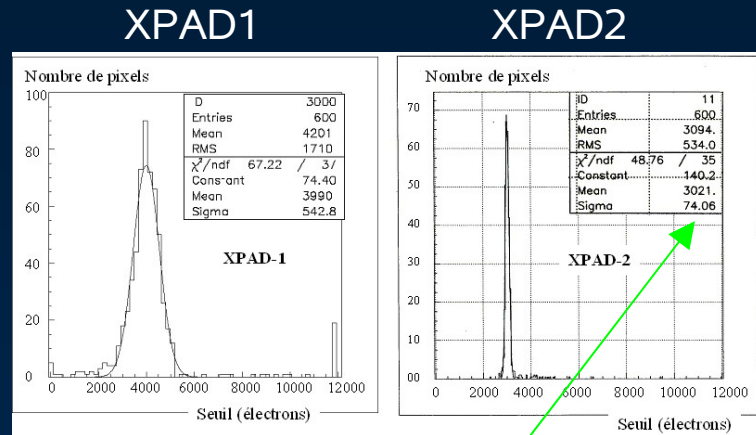


Courbes de seuil différenciées  
=> distribution en énergie

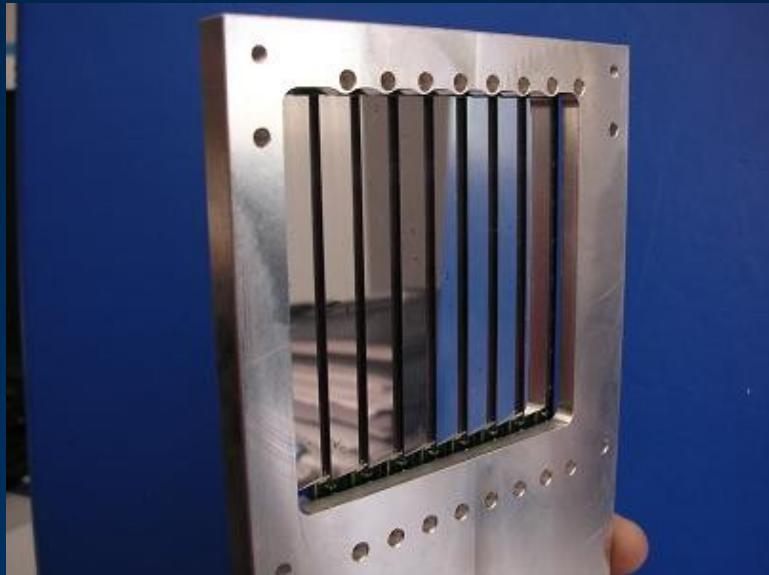


Diffusion aux petits angles sur du bécate d'argent  
5 Ordres de grandeur

# Deuxième prototype (XPAD2)

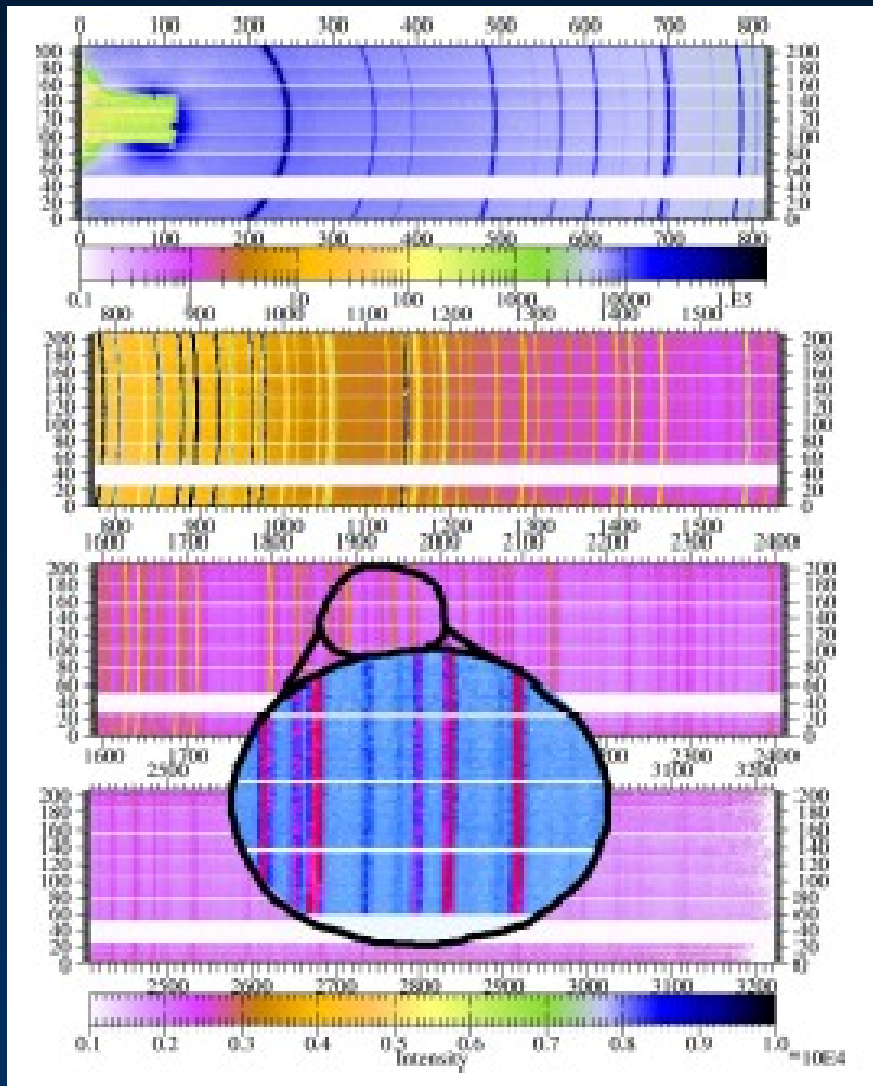


Dispersion de seuil réduite à 74 e<sup>-</sup>



- Modules allongés : 6,4 cm
- Système d'acquisition pour 8 modules (2 ms entre deux images)
- imageur de 6,4 x 6,4 cm<sup>2</sup>

# Cristallographie



Diffraction / Zéolithe

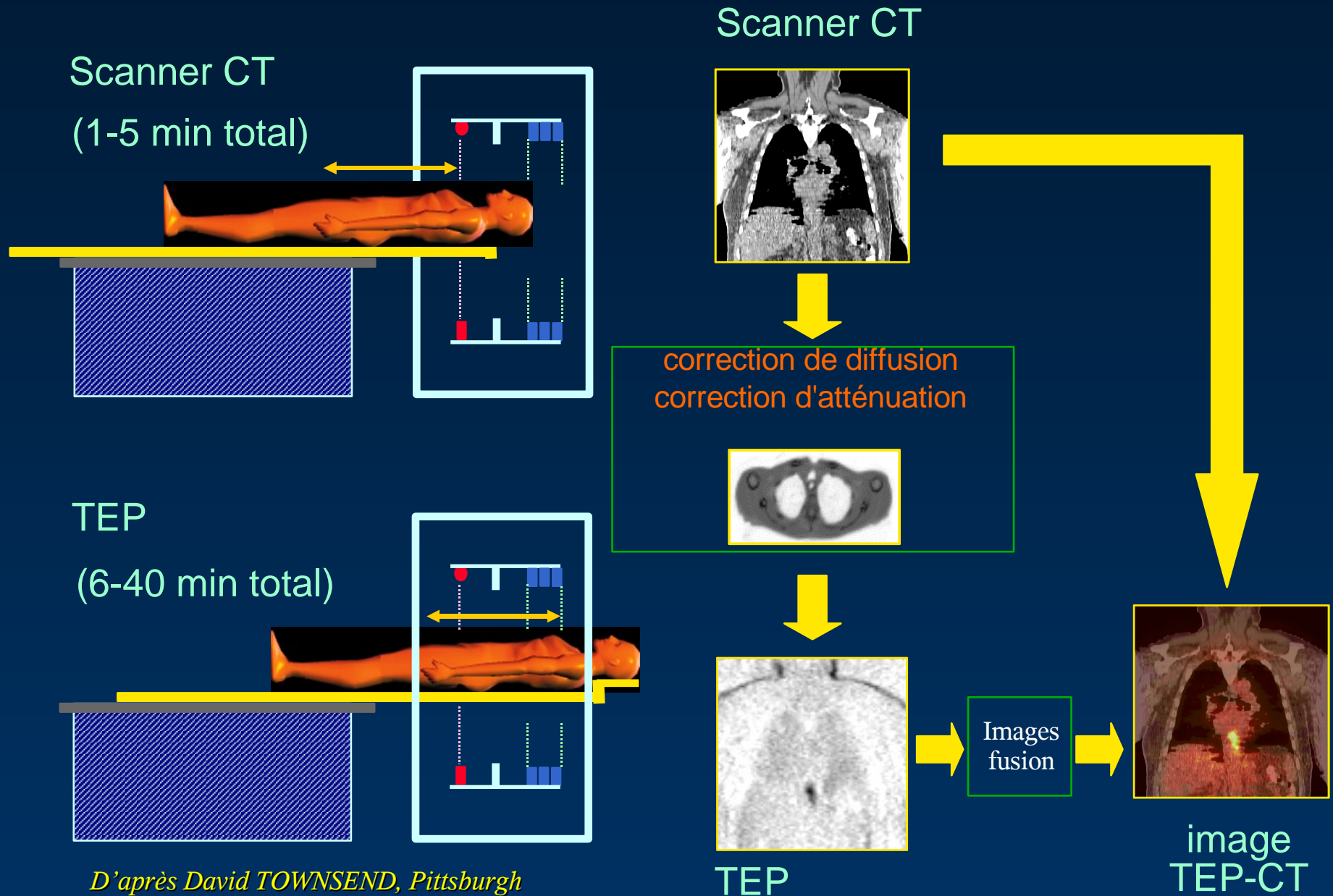
Comparaison  
**XPAD**/ méthode classique (PM+fente)



meilleure qualité

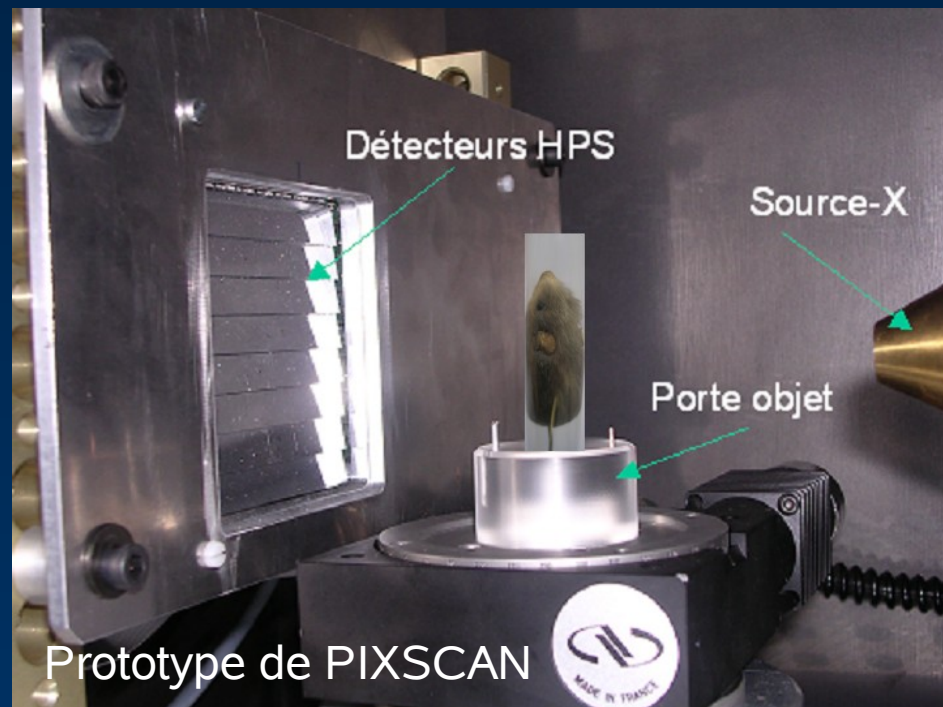
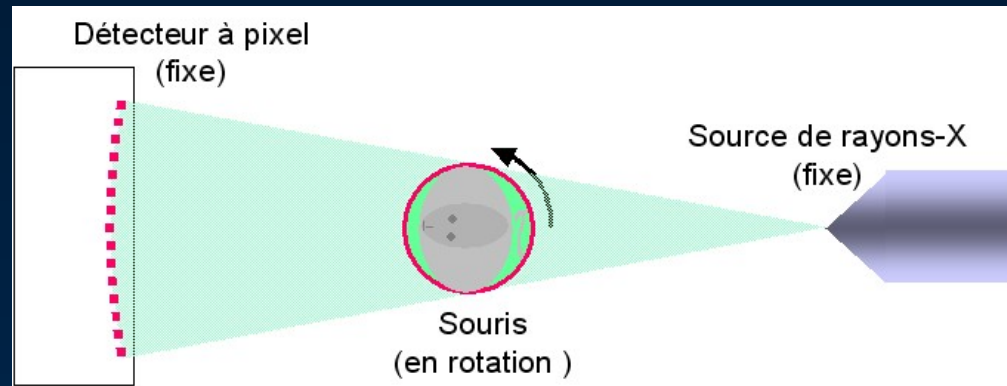
**20 fois moins de temps**

# Etat de l'art en imagerie médicale



*D'après David TOWNSEND, Pittsburgh*

# Prototype de PIXSCAN

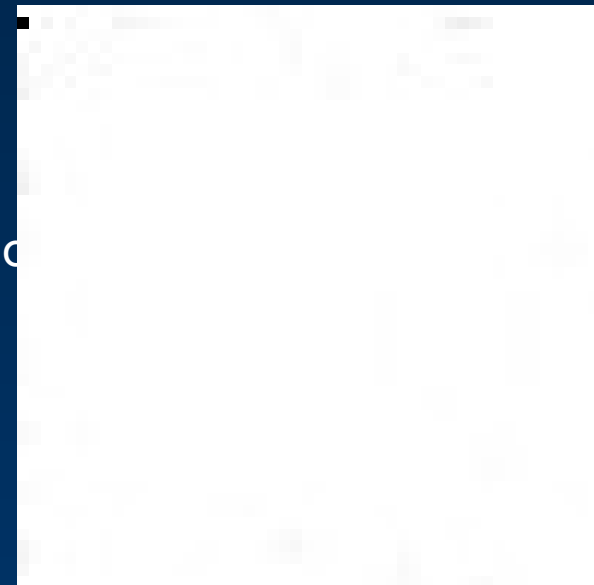


# Images PIXSCAN

Cell-o-frais (20  $\mu\text{m}$ )



Cuisse de caille



Aile de caille



# Tomographie



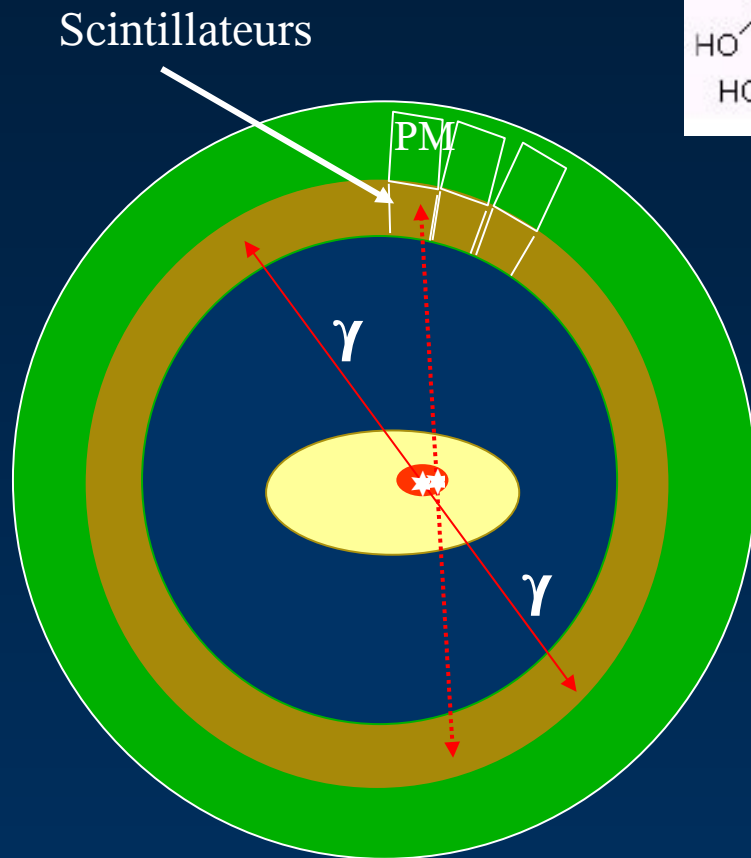
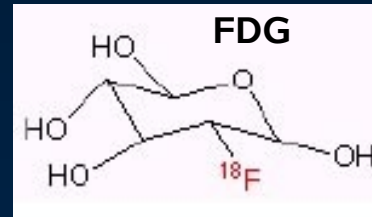
- On fait tourner l'objet et on prends une image tous les degrés (360)
- On calcule l'intensité de lumière transmise pour chaque élément de volume
- On peut ensuite donner l'image de n'importe quelle coupe ou surface

## Exemple d'une coupe

(résultat très préliminaire : l'image présente encore des défauts dus à une mauvaise détermination de la géométrie)

# Principe de la TEP

Glucose marqué par un radioélément  $\beta^+$



Le **FDG** se concentre sur les régions où le métabolisme est très intense

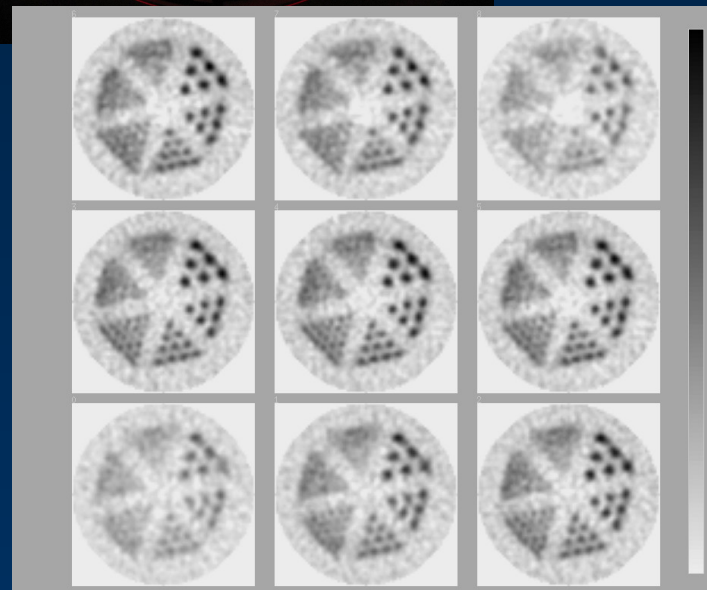
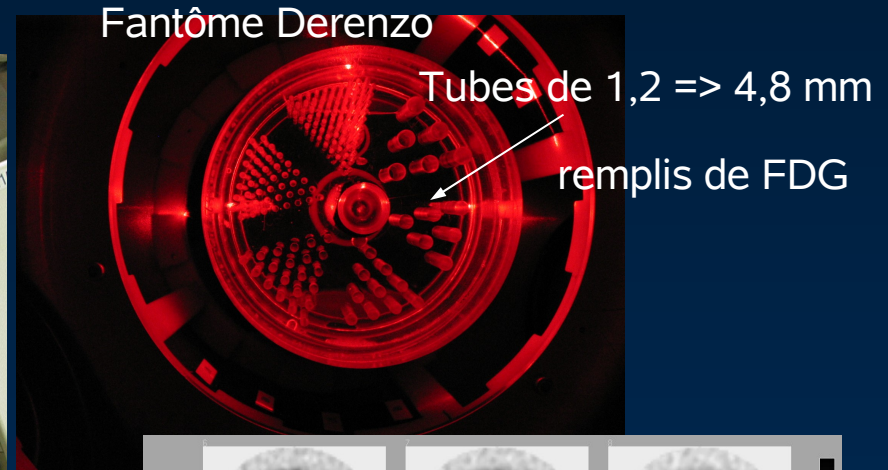
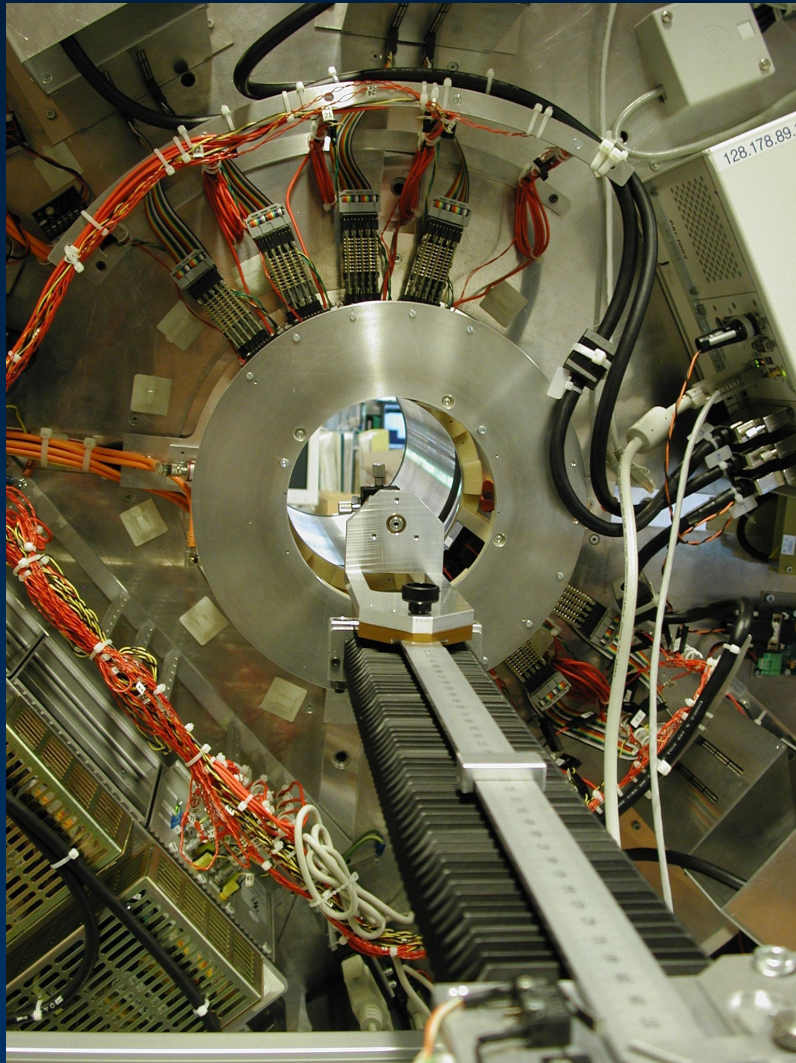
Par exemple sur les tumeurs



Image TEP d'un rat  
On voit les tumeurs  
mais pas les organes

Intérêt de la combinaison TEP-CT

# CLEARTEP



Images reconstruites  
avec le micro-TEP

# TEP-CT

Brevet  
CNRS  
en cours de  
validation

TEP => image fonctionnelle  
CT => image anatomique

## **correction des données TEP**

- absorption
- diffusion
- mouvements

durée TEP 20mn

image CT en 1 à 2 sec

# Conclusion

- ◆ avec le démarrage prochain du LHC, la physique des particules espère faire un grand pas en avant vers une meilleure compréhension de la matière
- ◆ pour relever les défis de la physique, il a fallu faire progresser énormément la technologie
  - ◆ accélérateurs (technologies supraconductrices)
  - ◆ détecteurs (sensibilité, rapidité)
  - ◆ informatique (calculs distribués à grande échelle)
- ◆ des domaines a priori très éloignés des préoccupations initiales peuvent profiter très rapidement des progrès réalisés
  - ◆ les chercheurs sont sensibles à cet aspect

