

De la Physique des Particules à l'Imagerie Médicale

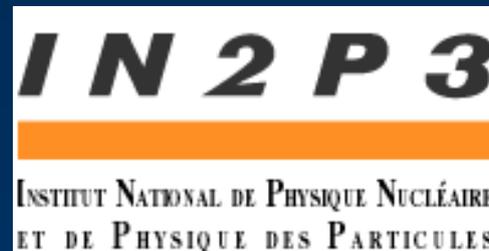
François Touchard

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

Pierre Delpierre

Centre de Physique des Particules de Marseille

La Ciotat, 12 octobre 2004



Buts de la présentation

- ◆ replacer le rôle de la recherche fondamentale dans la société
- ◆ 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

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

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 attendues

La recherche fondamentale et la société

- ◆ comprendre le monde qui nous entoure
- ◆ ne rien laisser dans l'obscurité
 - ◆ ce sont souvent les détails les plus infimes qui ont conduit aux découvertes les plus importantes
- ◆ rendre compte du travail qui est effectué et qui est financé par la société
 - ◆ maîtriser sa direction
- ◆ mais laisser la liberté aux chercheurs de diriger leur recherche
 - ◆ aucune des applications les plus utiles n'a été le point de départ du travail qui les a produites

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 attendues

Le modèle standard de la Physique des Particules

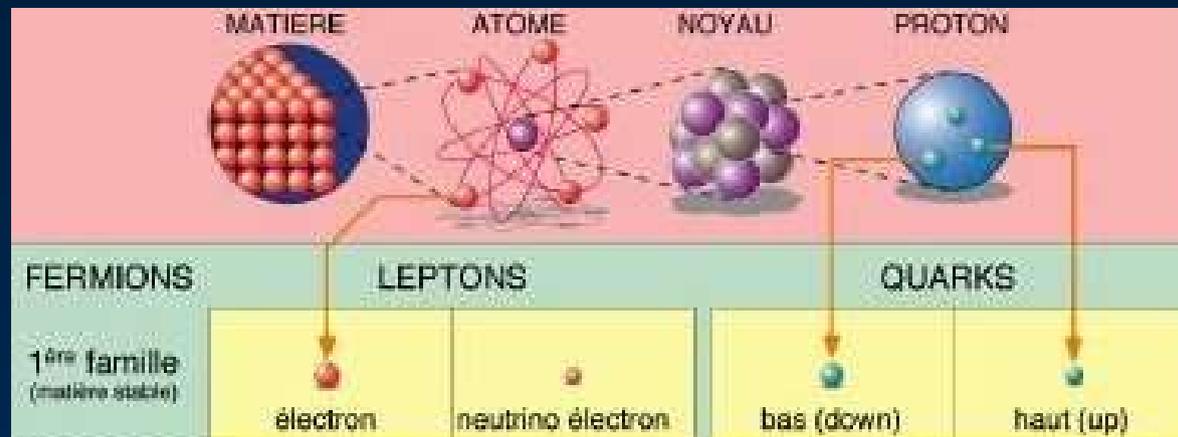
- ◆ antiquité : eau, terre, air, feu
- ◆ 1800-1850 : de plus en plus d'éléments "simples"
 - ◆ le modèle n'est pas si simple...

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)

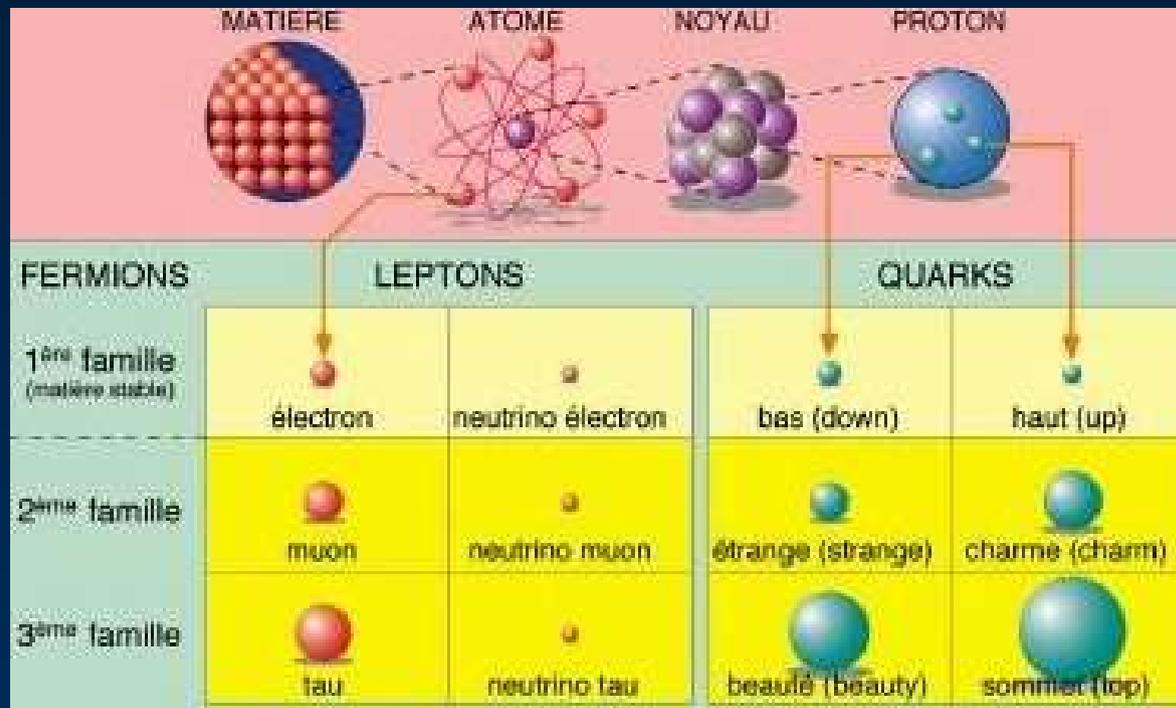
Le modèle standard de la Physique des Particules

- ◆ constituants élémentaires de la matière



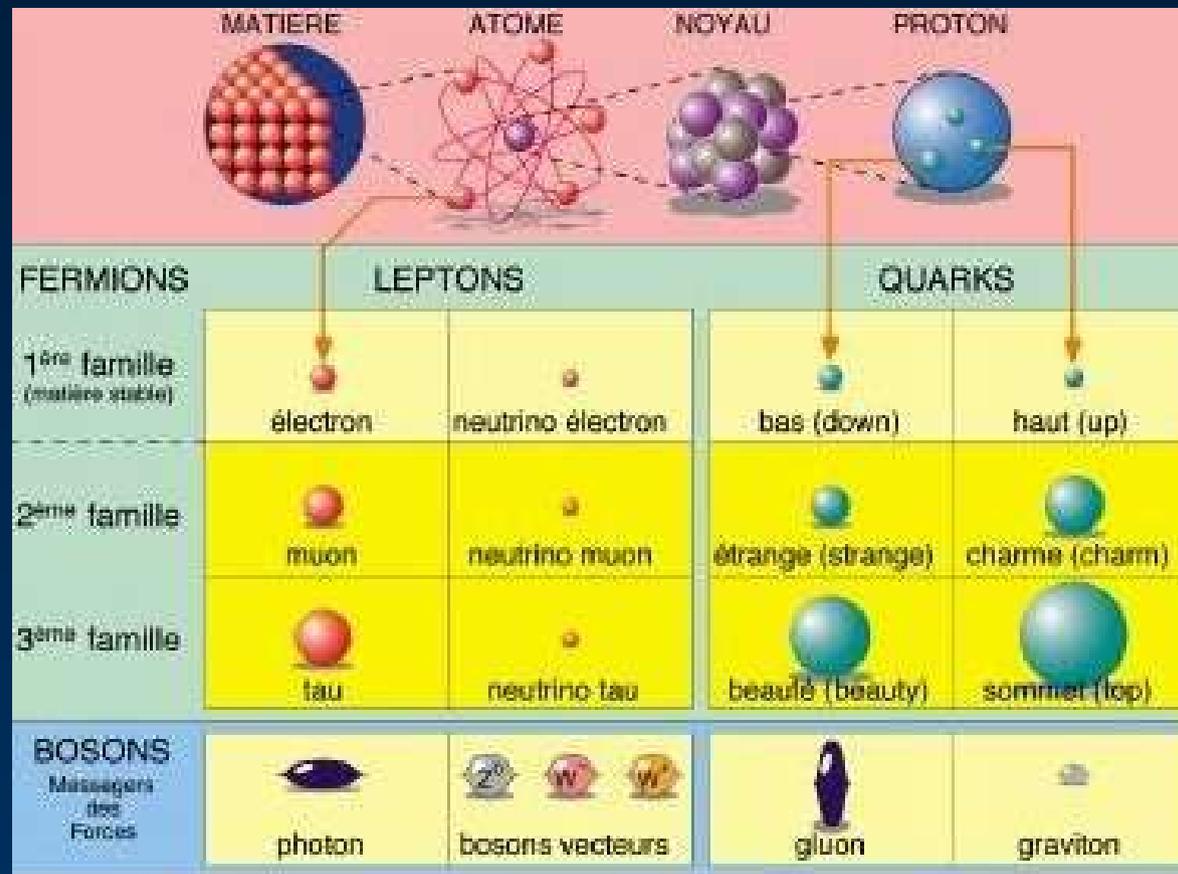
Le modèle standard de la Physique des Particules

- ◆ constituants élémentaires de la matière



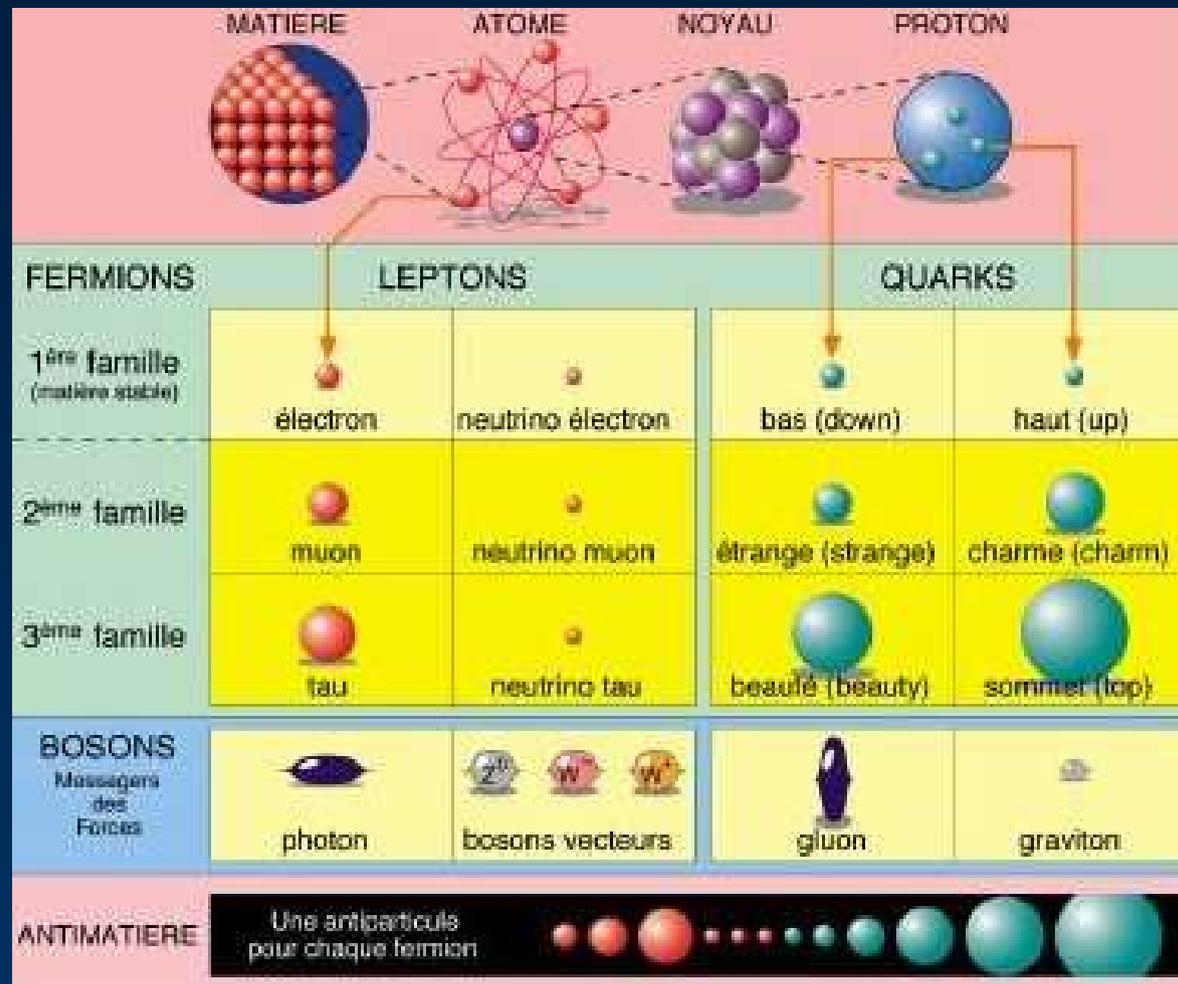
Le modèle standard de la Physique des Particules

- ◆ constituants élémentaires de la matière



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)



Le modèle standard de la Physique des Particules

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



<i>TYPE</i>	<i>FORCE RELATIVE</i>	<i>PARTICULE ECHANGEE</i>	<i>EXEMPLE DE DOMAINE D'APPLICATION</i>
Forte	1	gluons	noyau, nucléons
Electromagnétique	10^{-2}	photons	atome, lumière, chimie
Faible	10^{-6}	bosons γ , 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...

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 vedette de la chanson 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



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".

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

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 "exploratoires" (par opposition aux expériences de "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)

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 attendues

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)
- ◆ problème
 - ◆ 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

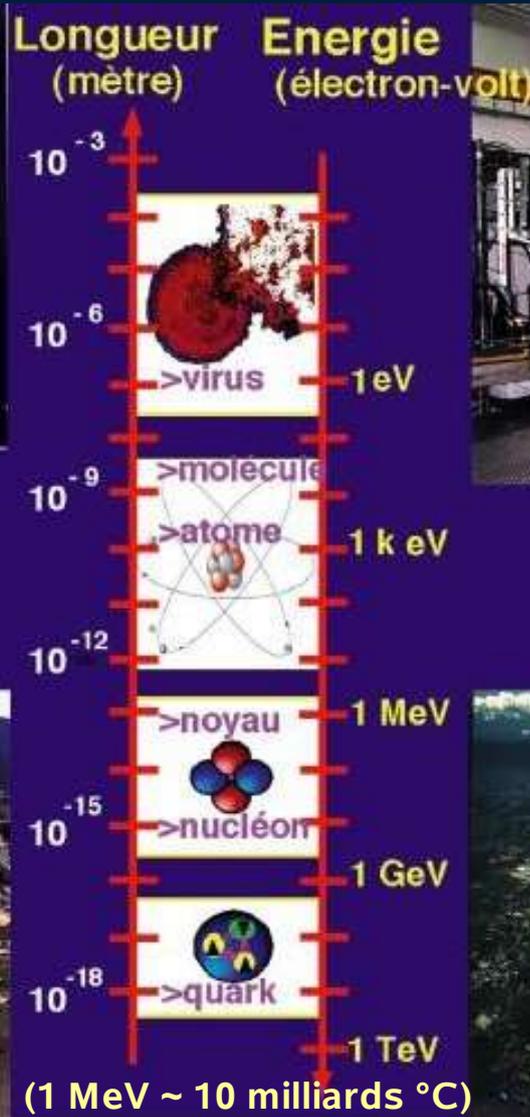
Le LHC et le détecteur ATLAS

◆ Les accélérateurs de particules



Microscope électronique

Accélérateur linéaire



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 €



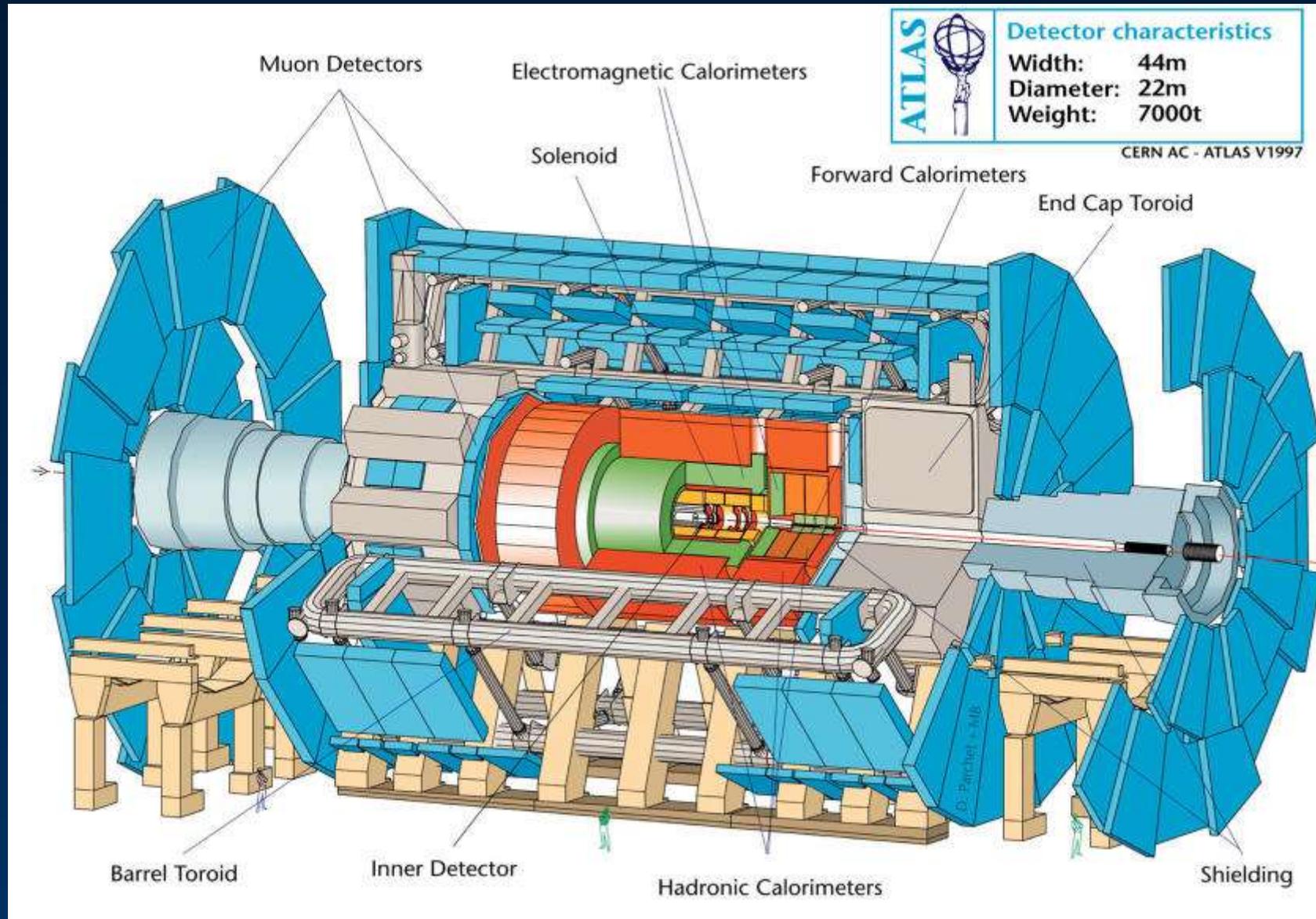
Le LHC et le détecteur ATLAS

◆ ATLAS

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

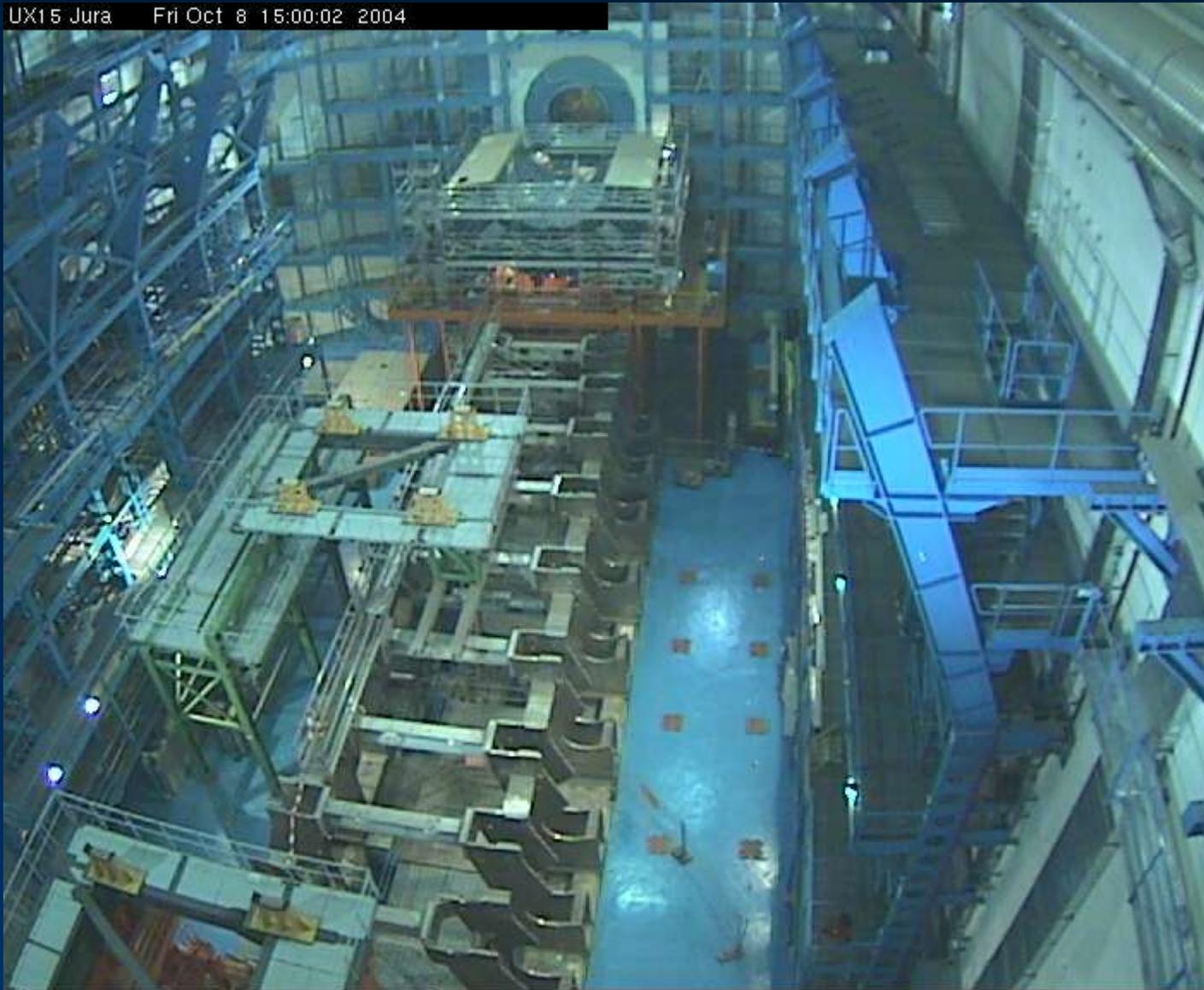


Le LHC et le détecteur ATLAS



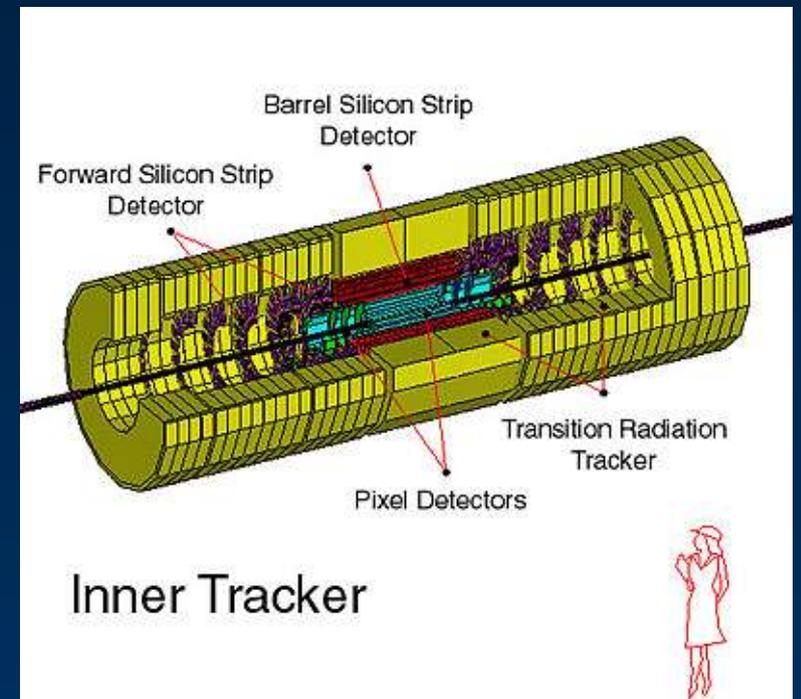
Le LHC et le détecteur ATLAS

UX15 Jura Fri Oct 8 15:00:02 2004



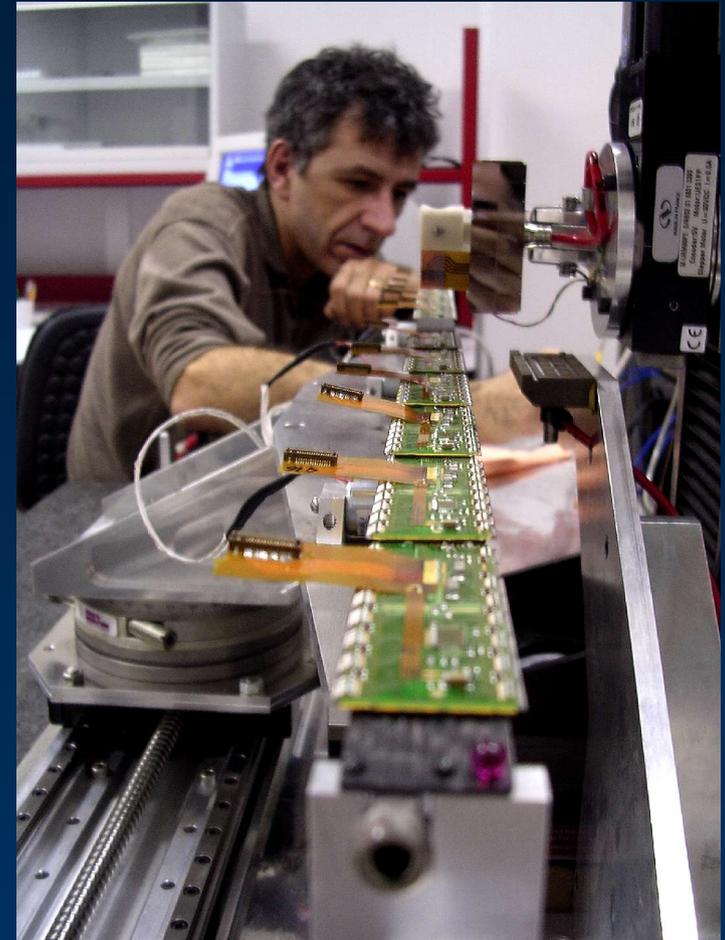
Le LHC et le détecteur ATLAS

- ◆ le 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 lecture et de transmission de l'information extrêmement performantes (CPPM)



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 gravés chaque 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

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 attendues

Les retombées attendues

- ◆ 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 attendues

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 attendues

- ◆ 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 attendues

- ◆ le projet PixScan

- ◆ merci à Pierre DELPIERRE

IMAGEUR A PIXELS « INTELLIGENTS » POUR RAYONS-X
en vue d'un appareil multi-mode pour
L'IMAGERIE DU PETIT ANIMAL

CPPM/IN2P3/CNRS, 163 Av. de Luminy, case 907, F-13288 Marseille Cedex 9, France

P. Breugnon, J.C. Clemens, P. Delpierre, I. Koudobine,
P. Pangaud, R. Potheau, B. Dinkespiler, E. Vigeolas

Laboratoire de Cristallographie/CNRS, BP 166, F-38042 Grenoble Cedex 09, France

J.F. Berar, N. Boudet, B.Caillot, C. Mouget

OBJECTIFS

Associer un scanner-CT rapide
à un Tomographe par Emission de Positrons (TEP)
pour l'imagerie du petit animal

associer une **image anatomique** à l'image des
lésions actives (tumeurs) donnée par le TEP

Corriger les données du TEP
pour l'absorption des rayons
gamma par les organes
traversés

Donner la possibilité de **corriger** les données du
TEP pour le mouvement du patient et de ses
organes durant la prise de vue du TEP

ORGANISATION

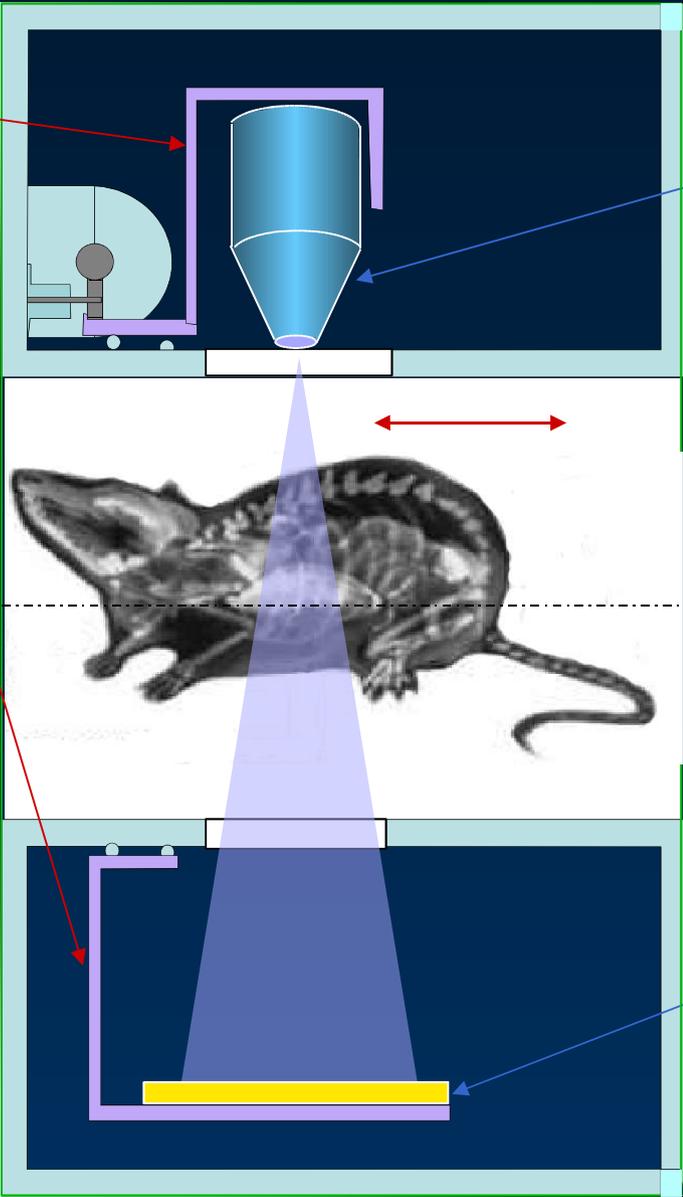
- La collaboration **CPPM-ESRF développe le scanner-CT**, basé sur les détecteurs semi-conducteurs à pixels hybrides
- La collaboration « **Crystal-Clear** » **développe le « CLEAR-TEP »**, micro-TEP pour le petit animal, basé sur des cristaux de hautes performances (électronique IPNL/IN2P3, Lyon).
- Un groupe de **CREATIS** (CNRS/INSA) est prêt à développer le **software de reconstruction** d'image (dans la géométrie particulière proposée).
- La plate-forme **ANIMAGE** (Génopole Rhône-Alpes, Lyon), nous accueille pour des **discussions avec les biologistes** et le **test sur le petit animal** jusqu'à la validation.

Une demande de brevet est déposée à la DAE/CNRS
« Scanner à rayons-X en vue d'images simultanées CT-TEP pour la tomographie du petit animal »

Scanner-CT

Ensemble tournant

Source-X

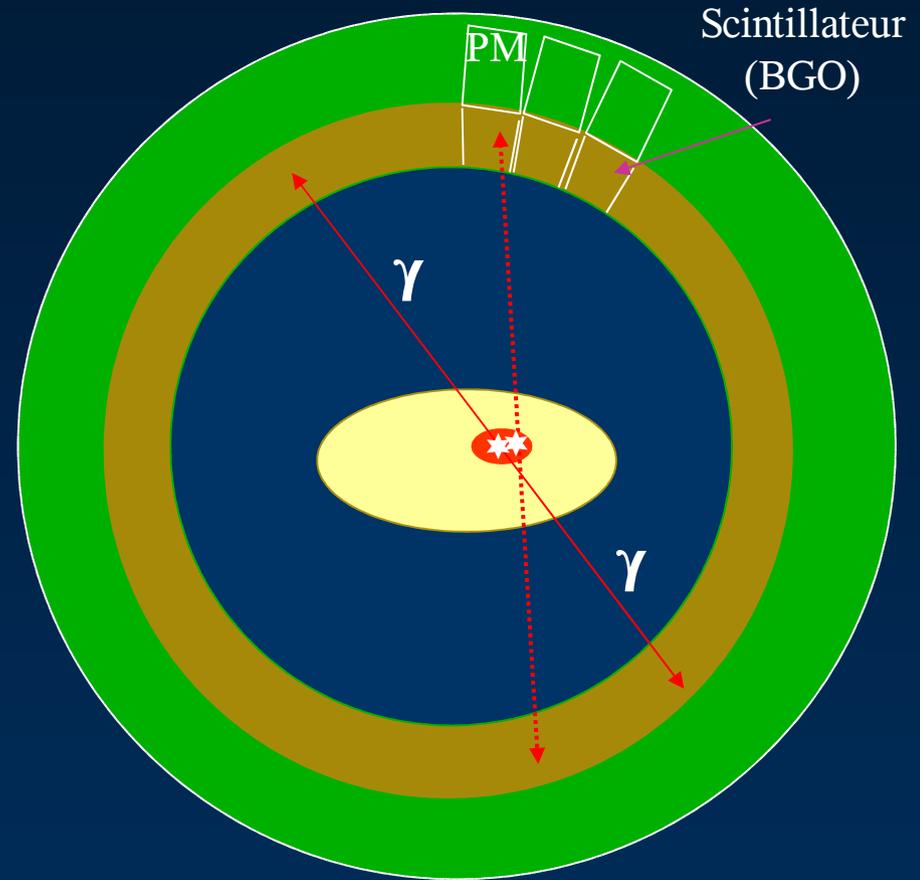
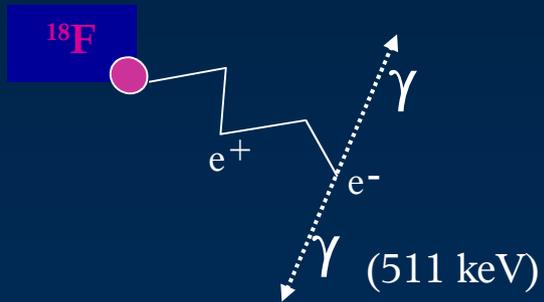
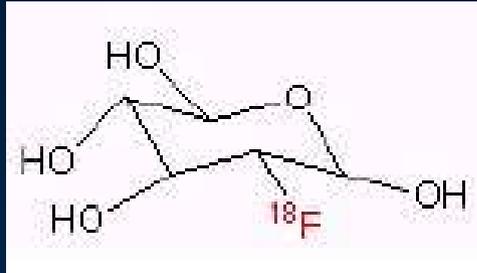


Ø 13 cm

Détecteur de rayons X

Principe du TEP

Glucose marqué par un radioélément β^+



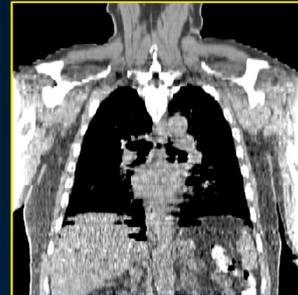
État de l'art

Scanner Spirale

(1-5 min total)



Scanner

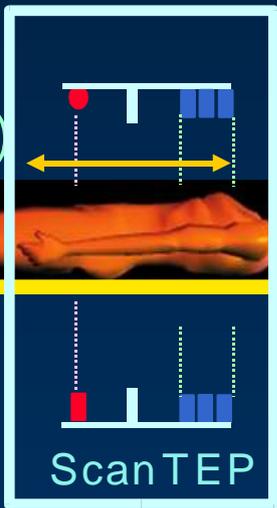


Correction de diffusion
correction d'atténuation



TEP Corps entier

(6-40 min au total)



TEP

FORE
OSEM

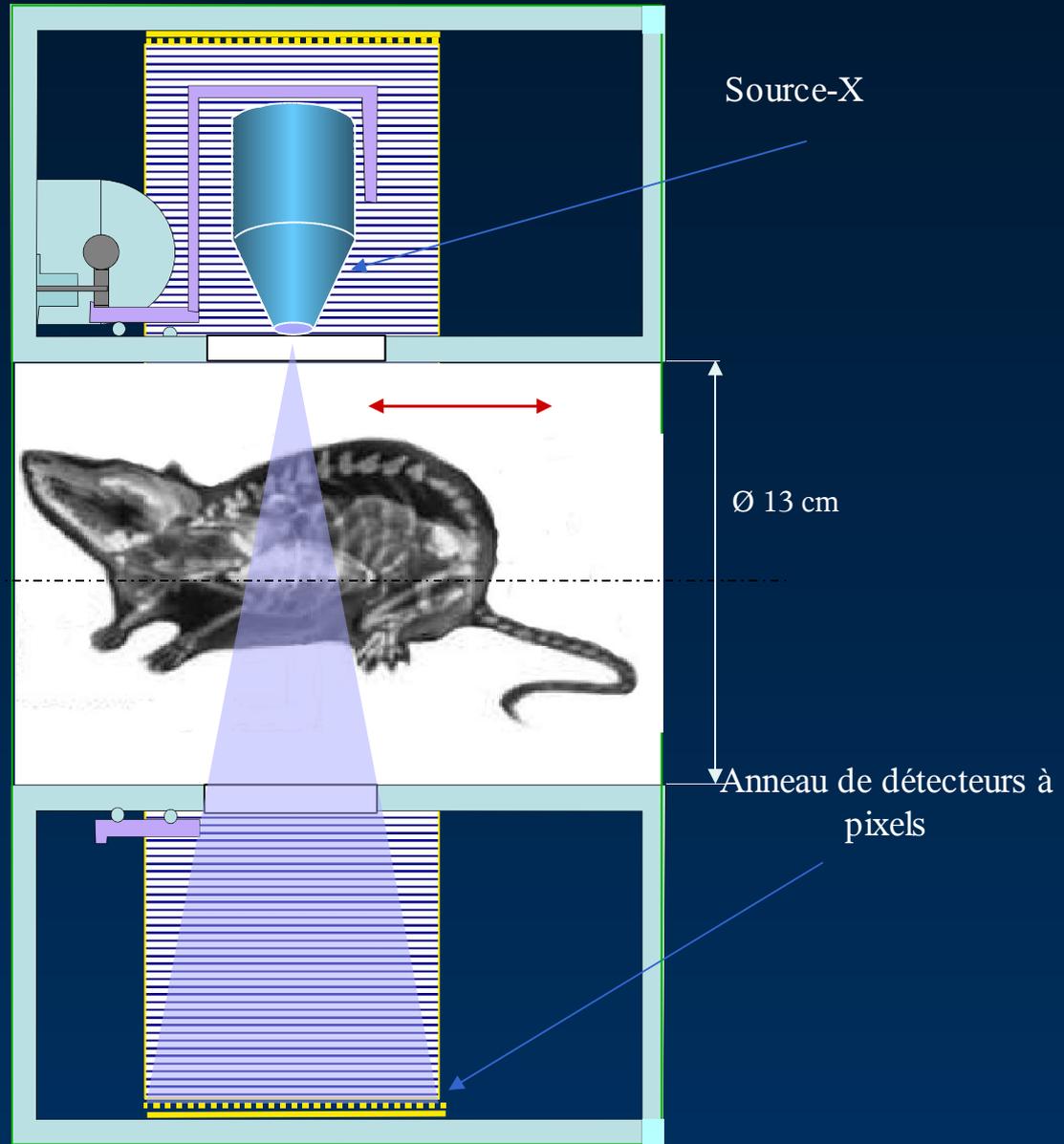


Image bi-
modalité

D'après David TOWNSEND, Pittsburgh

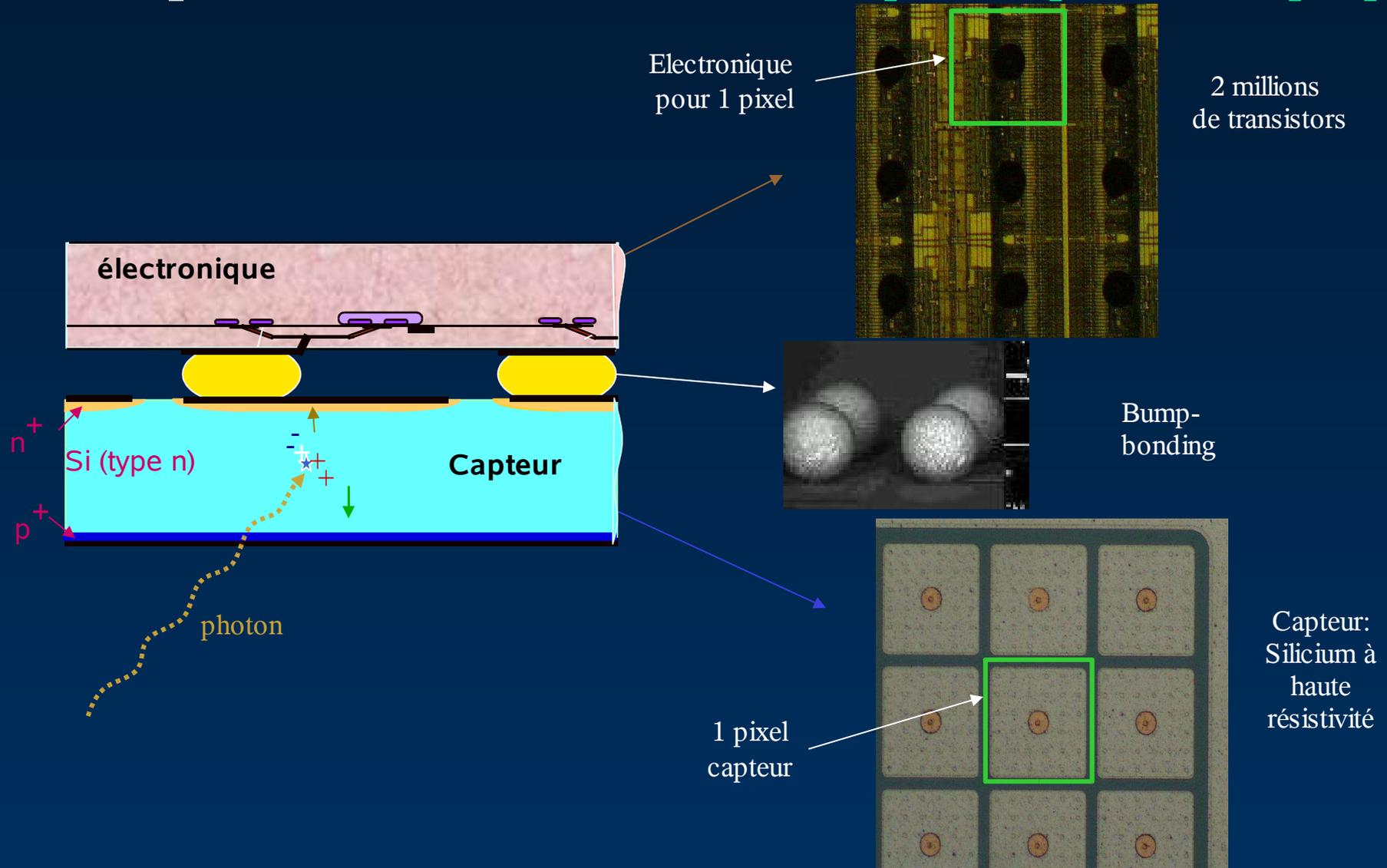
FUSION

Scanner-CT à pixels



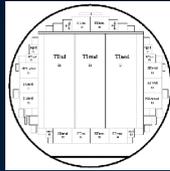
Pour le scanner => détecteurs à pixels hybrides (intelligents)

Principe : associer une chaîne électronique complète à chaque pixel

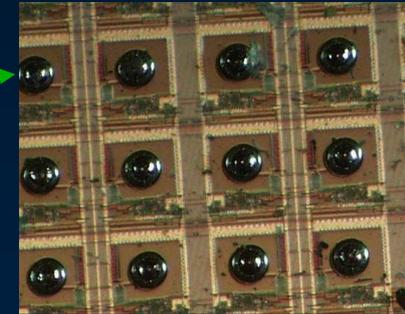


Ce que nous savons faire

substrat
Détecteur
Si ou CdTe
Ep: 0,3 mm



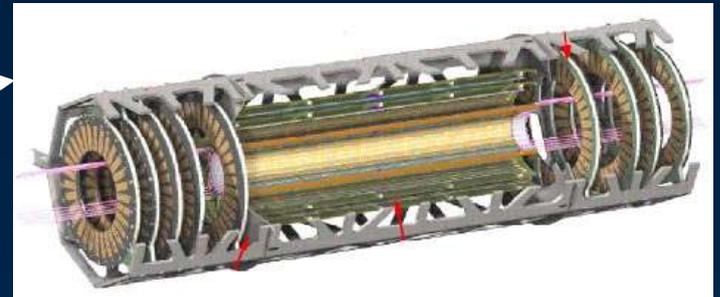
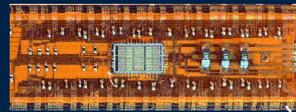
circuit
électronique
adapte à l'application
Pixels: 50 à 300 μm



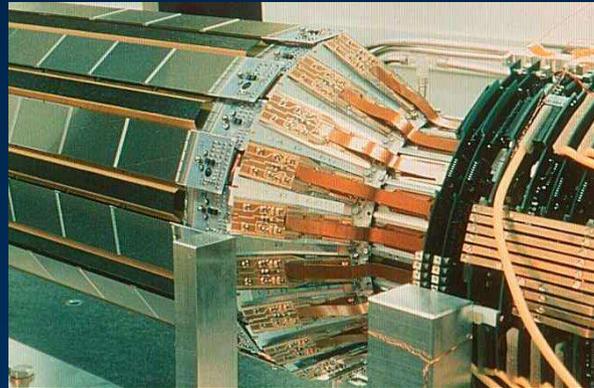
2 x 6 cm²



module

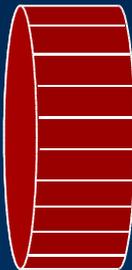
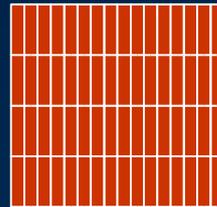


Projet ATLAS-CERN
110 millions de pixels, 2 m² de silicium



DELPHI-CERN (1995-2001)
1 million de pixels

cristallographie



Imagerie de
petit animal

Les pixels « intelligents »

- appellent la lecture quand ils sont touchés
- n'appellent la lecture que si ils sont touchés pour un croisement de faisceau comprenant un événement intéressant (en moins de 25 ns)

Intérêt des pixels hybrides

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

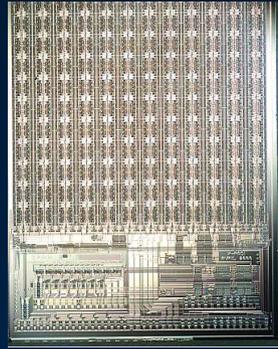
- ☺ **comptage individuel des photons**
 - **Suppression du bruit** électronique et physique (e^- , X hors énergie)
 - **Sélection d'une raie en énergie**
 - **Très grande dynamique** en luminosité intégrée (plus de 10^9) et en intensité lumineuse (de 0,01 ph/s/pixel à 5×10^6 ph/s/pixel)
- ☺ **Très grande rapidité d'acquisition** (< 2 ms)
- ☺ **Détecteur très mince** (conversion directe dans le cristal détecteur)

Premier prototype XPAD1

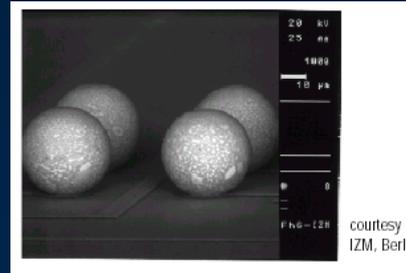
XPAD1

Circuit intégré qui comprend, par pixel:

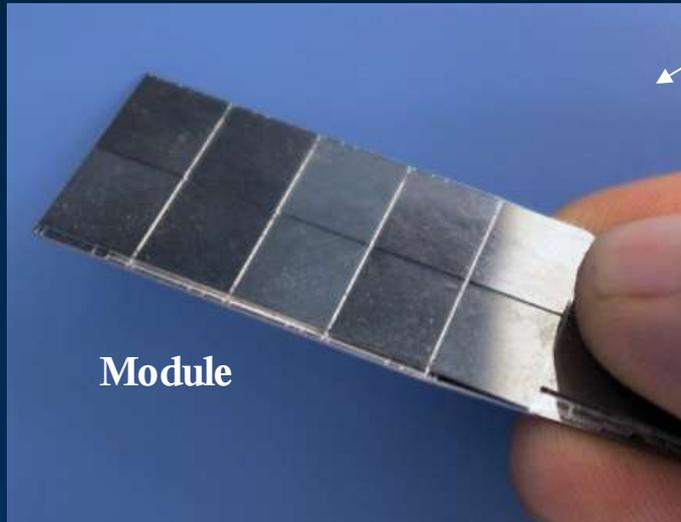
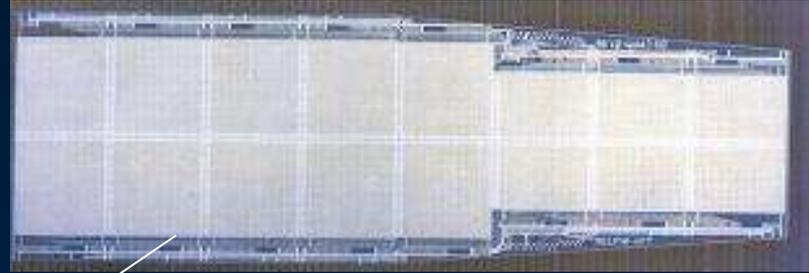
- Amplificateur
- Discriminateurs
- Compteur de 15-bit



Bump-bonding



Capteur silicium segmenté en pixels de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ (reliquat de DELPHI)



Module

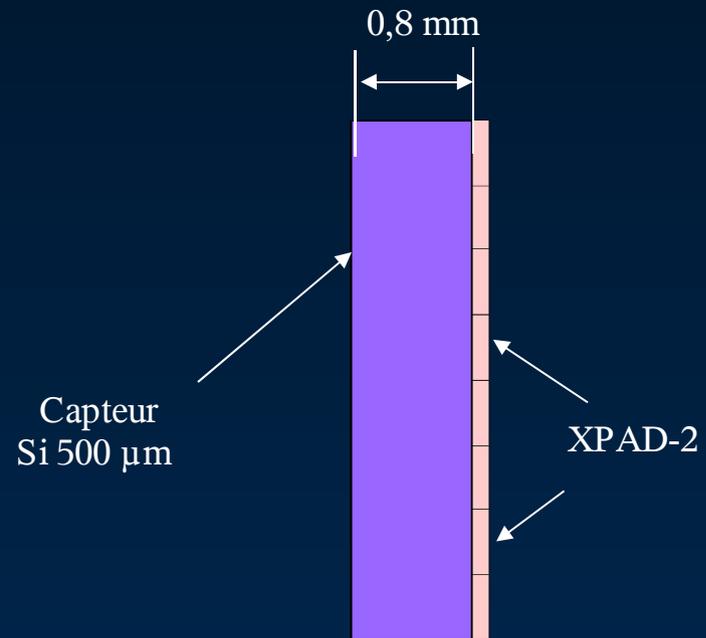
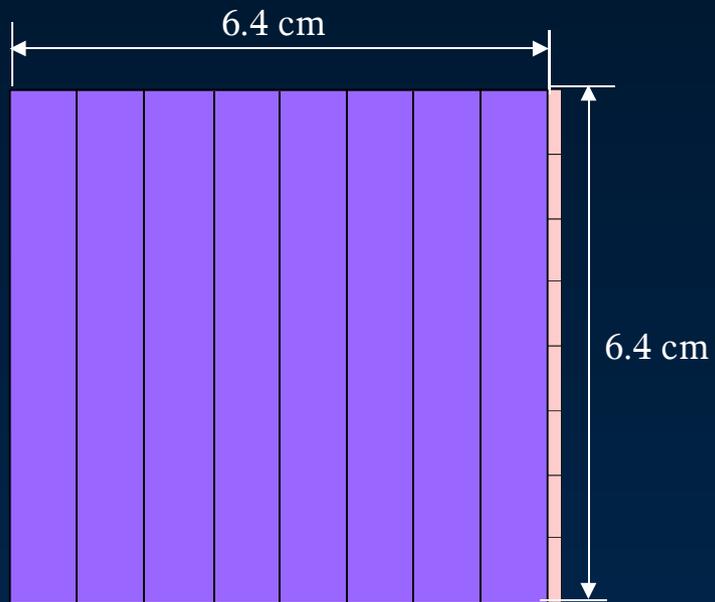
10 chips soudés par bump-bonding sur un capteur silicium de $4 \times 1.6 \text{ cm}^2$



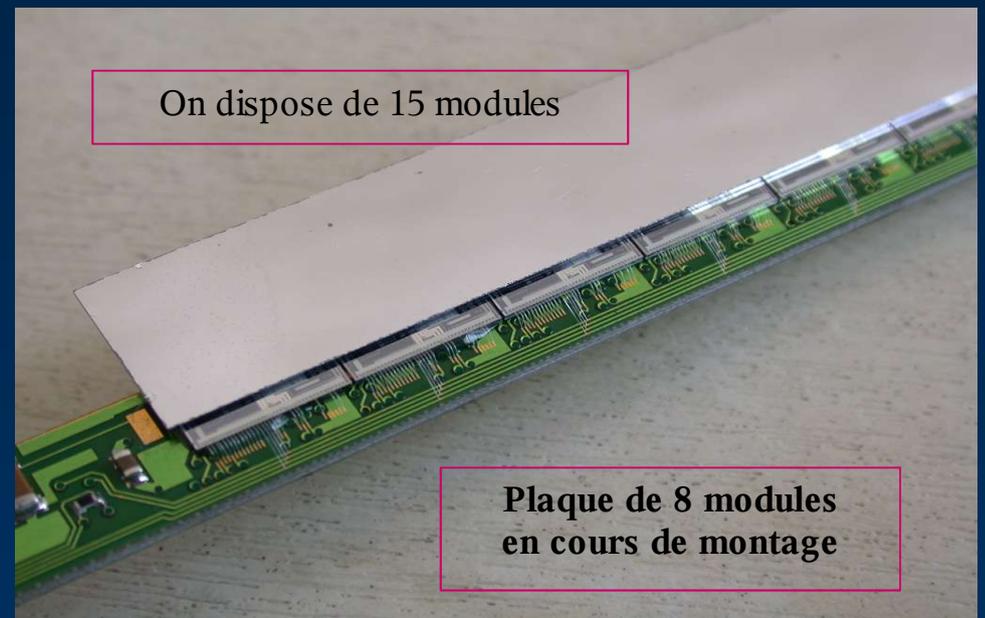
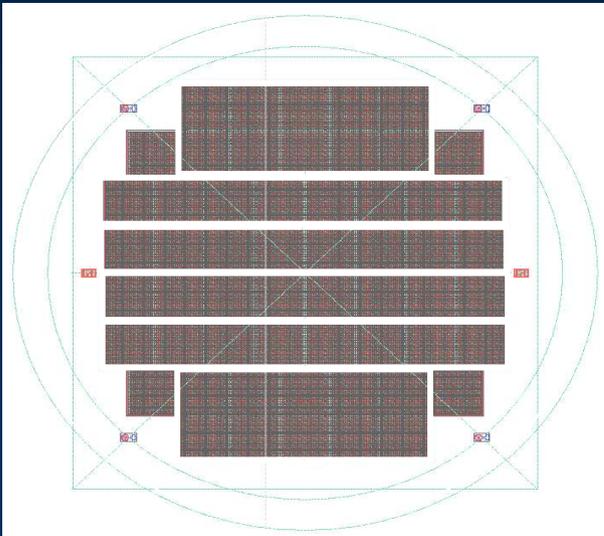
6000 pixels module

Prototype de détecteur à pixels

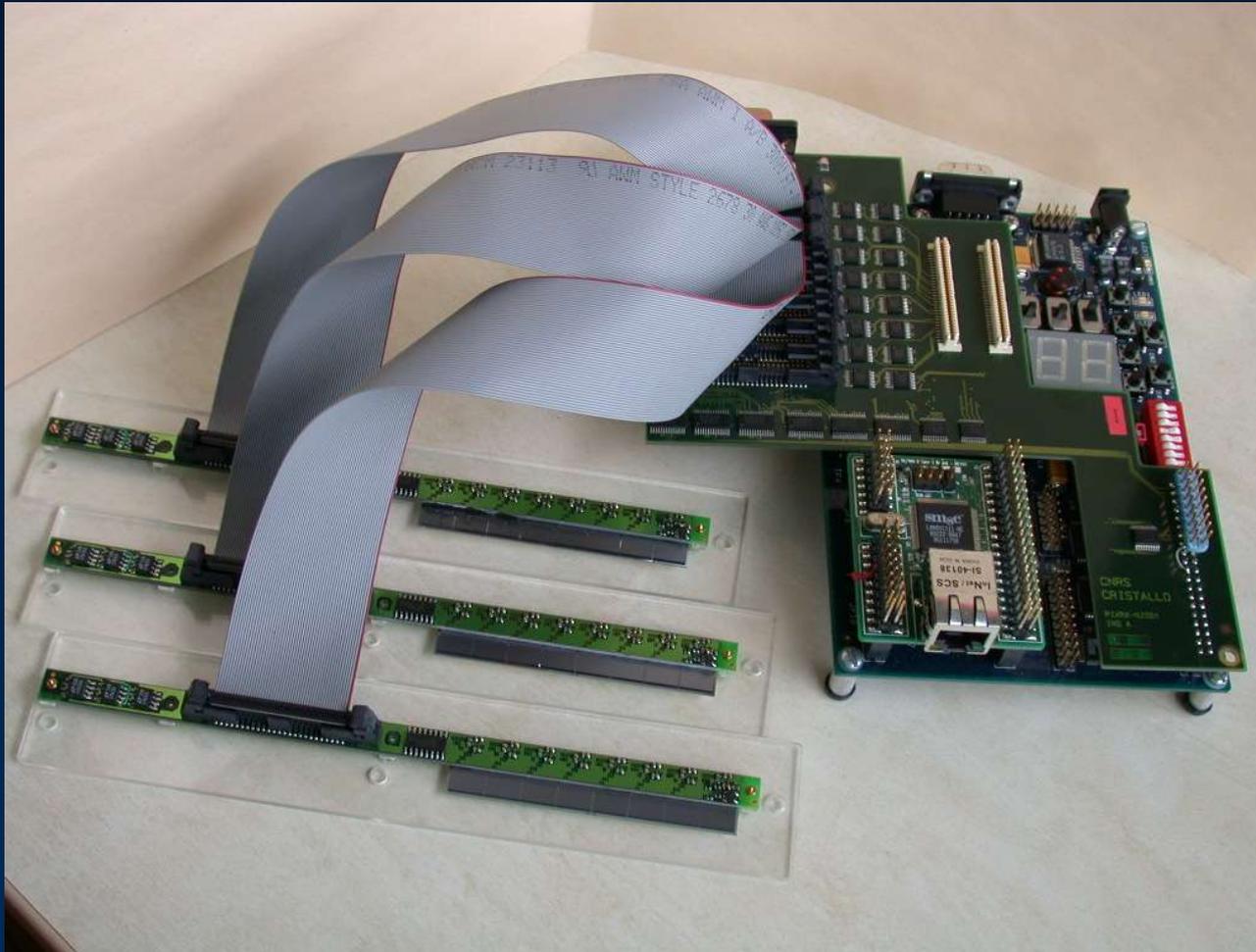
DEMONSTRATEUR: Plaque de 6,4 x 6,4 cm² pou la cristallographie



Wafer silicium d'épaisseur 500 μm/capteur



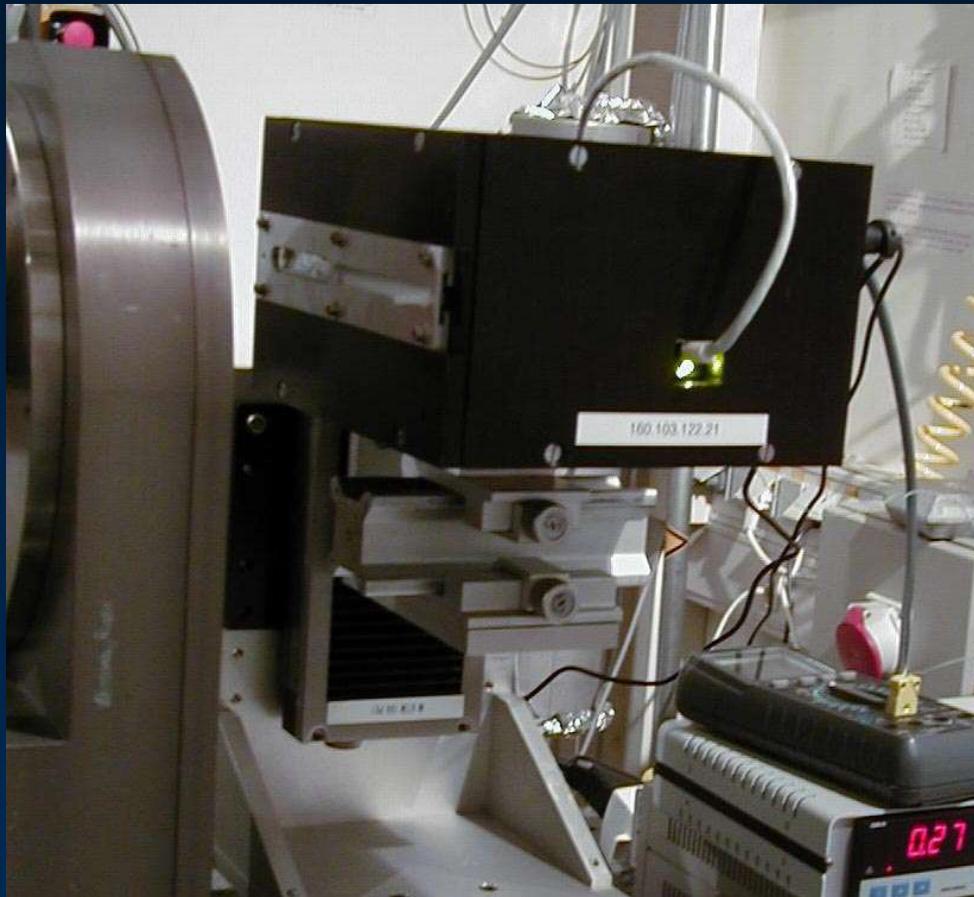
CIRCUIT DE LECTURE EXTERNE et SOFTWARE



1. **Scan des overflows** des compteur de 15-bit contenus dans chaque pixel
3. **addition** dans un compteur externe de 16-bit (1 par pixel)
5. **stockage** dans un module mémoire (423 images)

- Sortie sur **ETHERNET**
- **Monitoring** par un PC

Démonstrateur installé sur le goniomètre SAXS à 1' ESRF



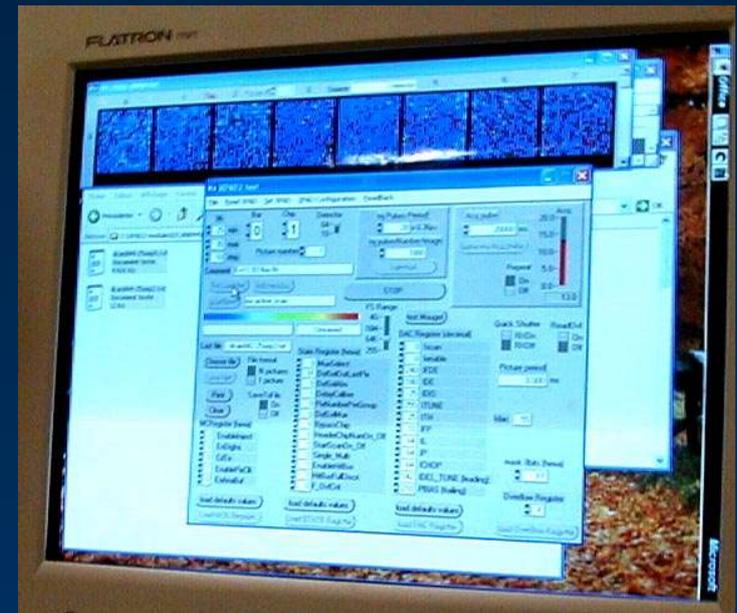
Mécanique:

Boîte en aluminium contenant le détecteur et l'électronique externe

- Un module linéaire $8 \times 0.8 \text{ cm}^2$
ou
- une plaque de 8 modules, de surface utile $6.4 \times 6.4 \text{ cm}^2$ (38400 pixels)

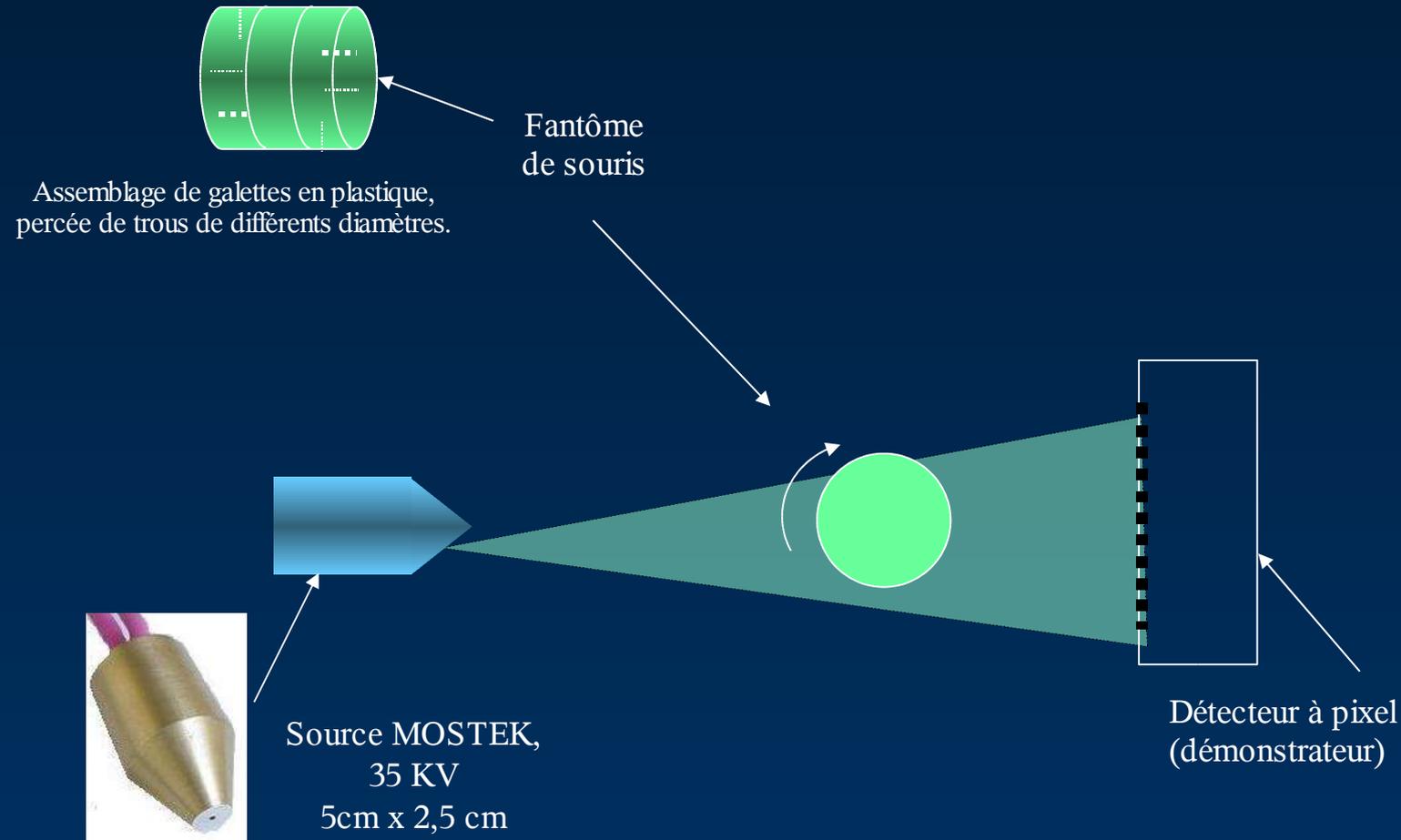
TEST:

423 images séparées de 2 ms



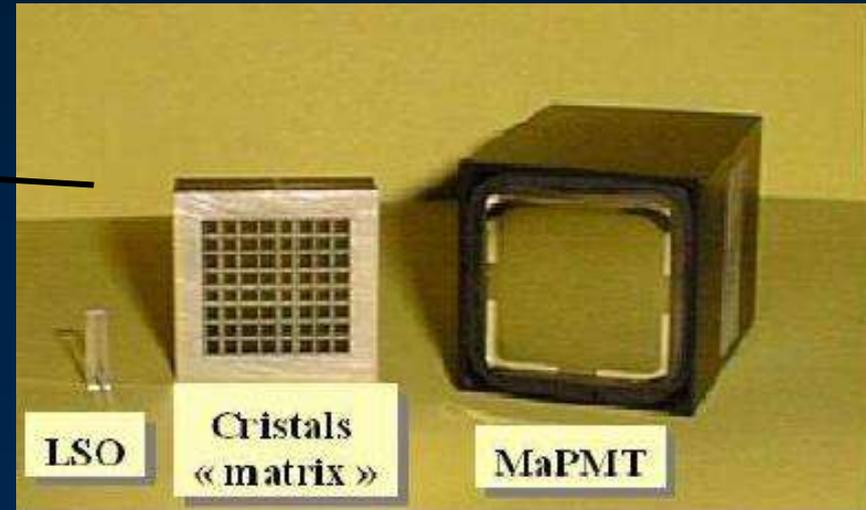
PLAN à COURT TERME (2004)

1. Assemblage d'éléments de scanner
2. Développement du software de reconstruction d'image dans une géométrie compatible avec le TEP en collaboration avec CREATIS, LYON



IMHOTEP

(IPNL/IN2P3)



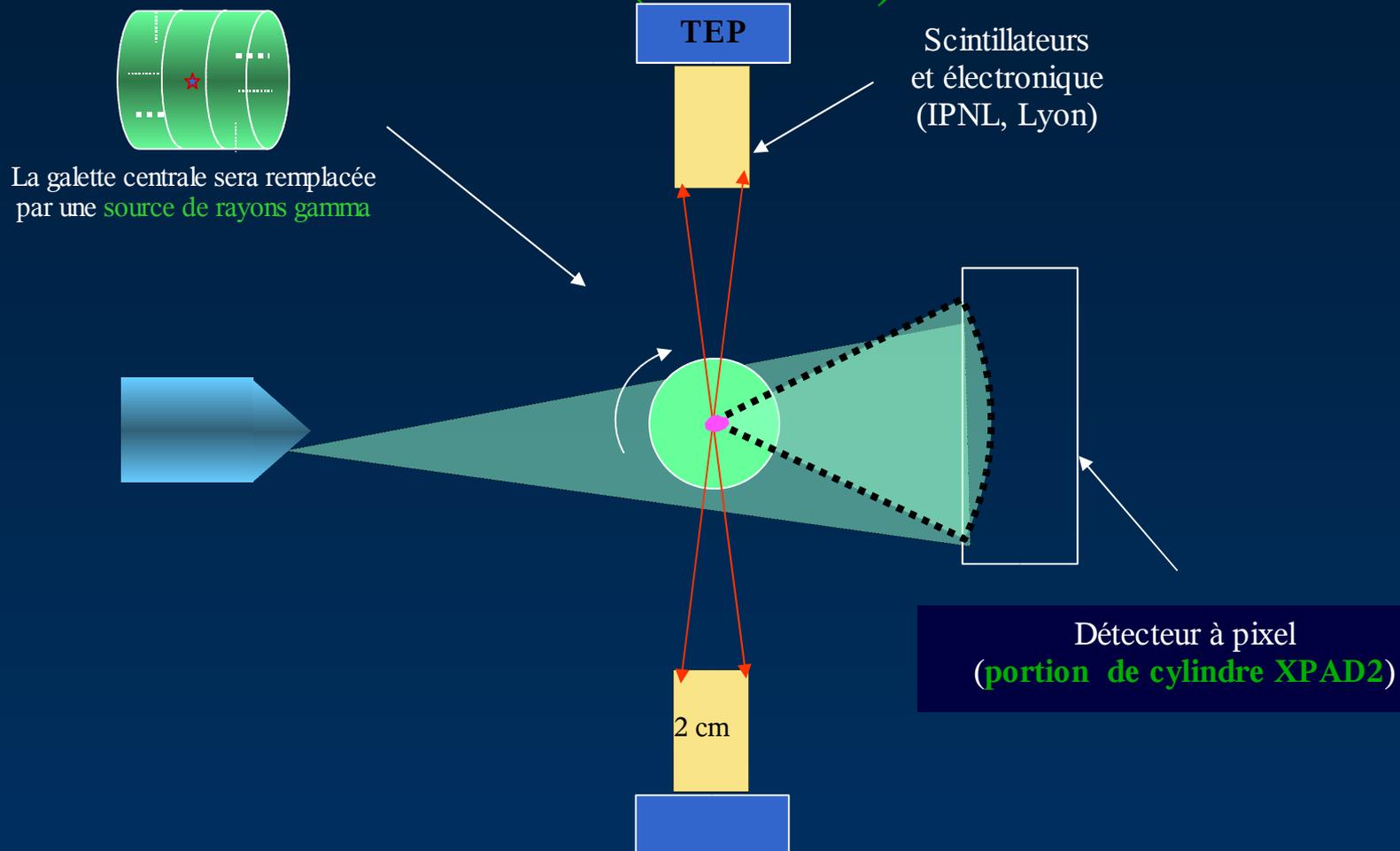
$2 \times 2 \times 10 \text{ mm}^3$

Électronique de lecture

Scanner-TEP tournants

3. Combinaison avec les éléments du TEP (IMHOTEP) de l'IPNL

4. Développement du logiciel de reconstruction d'images combinées Scanner-TEP (CREATIS)



Suite du projet scanner-TEP

PHASE 2 (2004), Images (3D) avec le démonstrateur, design XPD3

- Assemblage source-X et le détecteur XPAD2 et reconstruction d'images scanner
- Assemblage des éléments IMHOTEP avec une portion cylindrique de détecteurs XPAD2
- Finition du design du XPD3 (pixels de $125 \times 125 \mu\text{m}^2$), et circuits de test
- Modules CdZnTe avec XPAD2

PHASE 3 (2005-6), TEP-scanner version finale.

- Fabrication de 30 modules XPD3 de $1,5 \times 8 \text{ cm}^2$ et d'un cylindre de détection complet
- Fabrication du système de source-X tournante
- Fabrication de l'anneau de détecteurs du TEP (Clear-TEP, $\text{Ø}_{\text{int}} 13 \text{ cm}$)
- Montage de l'ensemble TEP-scanner-CT dans la géométrie proposée
- Images de souris vivantes à la plate-forme ANIMAGE et reconstruction d'image TEP-scanner
- Utilisation des données du scanner pour améliorer cette image en corrigeant de l'absorption et des mouvements du sujet et de ses organes

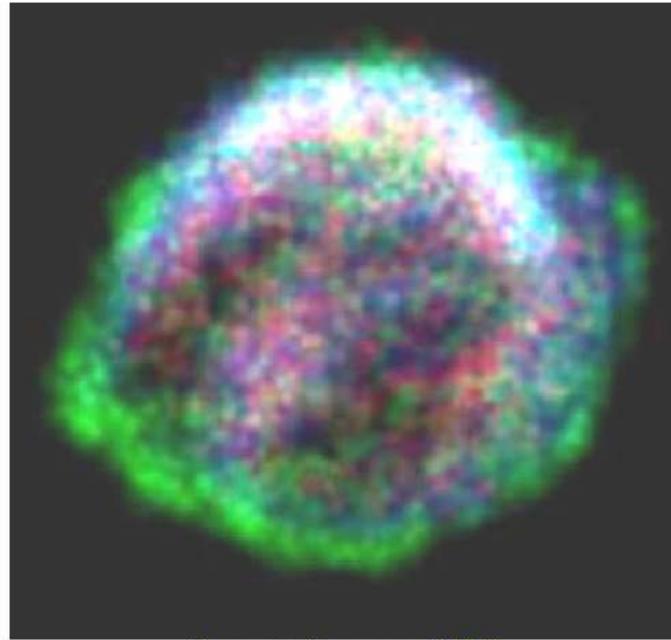
CONCLUSION

- Nous disposons maintenant d'un **démonstrateur** de détecteur à pixels pour scanner-CT, avec son électronique rapide d'acquisition de données.
- Le financement par IPA-2001 nous a, principalement, permis de fabriquer des capteurs adaptés aux circuits électroniques XPAD2 et compatibles avec la géométrie cylindrique du scanner, ainsi qu'une mini source de rayons-X.
- En 2004, l'effort portera principalement sur l'installation d'un dispositif minimum permettant de faire des images scanner-CT et TEP, et le développement du software de reconstruction de ces images.
- En 2005-6, construction de l'appareil final

merci de votre attention



La Supernova de Kepler a 400 ans !



Supernova de Kepler en rayons X, ©HST

Conférence grand public

De Charling TAO et André TILQUIN
Physiciens

Samedi 16 octobre à 10 h au CPPM
Entrée libre, sur réservation

Centre de physique des particules de Marseille
163, avenue de Luminy 13288 Marseille cedex 09
04.91.82.72.28, damoiseaux@cppm.in2p3.fr