

# Utilisation des diapositives

---



Ces diapositives peuvent être utilisées, et/ou modifiées par tous les membres de la MI2I. Elles ont pour but de présenter les métiers de la micro-électronique aux étudiants. La version de base s'adapte suivant le temps disponible et vos envies :

- Les transparents 8 à 11 présentent les domaines de l'IN2P3 et peuvent être enlevés
- 2 exemples de projets sont inclus (transparents 15 à 21), vous pouvez les utiliser ou mettre les vôtres
- Le slide 28 sert à mettre votre CV afin d'ouvrir les discussions

Ce document est en constante évolution, assurez-vous d'avoir la dernière version. Afin de l'améliorer, envoyez vos remarques, suggestion de modifications et retours d'expériences à [herve.chanal@clermont.in2p3.fr](mailto:herve.chanal@clermont.in2p3.fr)

# Travailler en micro-électronique au CNRS/IN2P3

Version 25 septembre 2024

Document de travail

Auteur, événement





# Le CNRS en quelques chiffres

## Le Centre National de la Recherche Scientifique

- Organisme public de recherche pluridisciplinaire
- Sous la tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche

10 instituts



4 G€  
Budget

33 000  
Agents

28 000  
Scientifiques

1 100  
Laboratoires





## L'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules

- Mission nationale : **animation** et de **coordination** dans les domaines de la **physique nucléaire**, de la **physique des particules** et des **astroparticules**
- Développement des technologies et applications associées, notamment dans le champ de la **santé** et de **l'énergie**

Ces recherches visent à explorer la physique des particules et des noyaux atomiques, les interactions fondamentales et les connexions entre l'infiniment petit et l'infiniment grand

**25**

Laboratoires

**10**

plateformes interdisciplinaires de recherche

**1 000** chercheurs et enseignants-chercheurs

**1 600** personnels ingénieurs, techniciens et administratifs

**300** post-doctorants

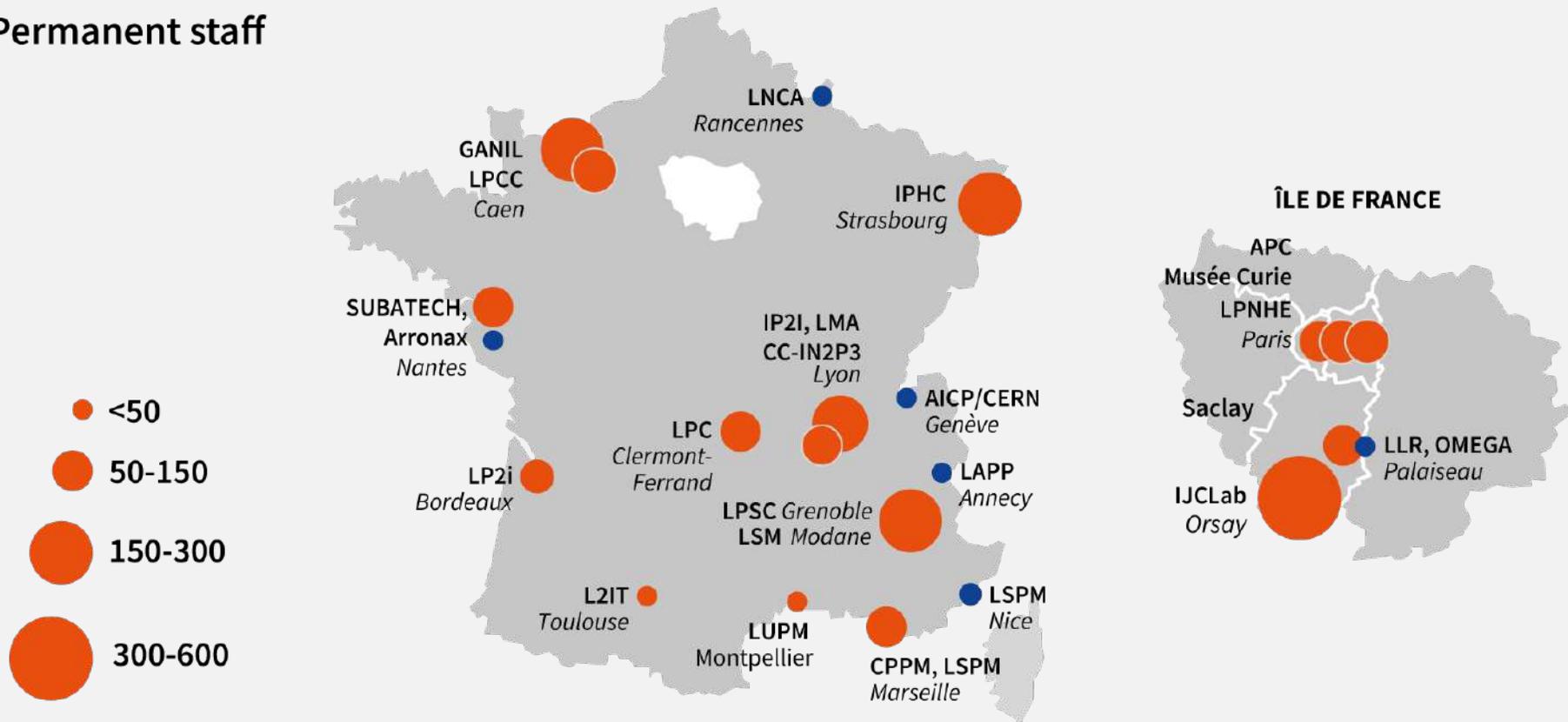
**450** étudiants en thèse





# Les laboratoires de l'IN2P3 en France

## Permanent staff





# L'IN2P3 : 5 domaines de recherche

## Physique des particules & hadronique

- Constituants élémentaires
- Interactions fondamentales

## Physique nucléaire & applications sociétales

- Structure de la matière nucléaire
- Energie nucléaire et applications médicales

## Physique des astroparticules & cosmologie

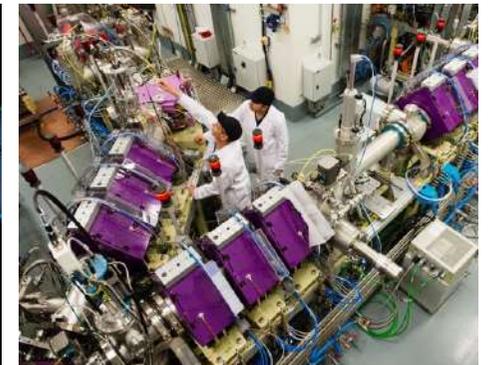
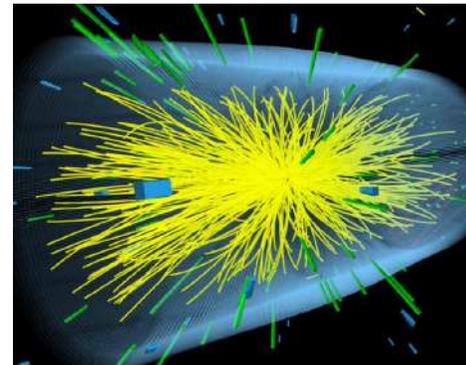
- Composition de l'Univers et son évolution

## Accélérateurs et technologies

- Recherche et développement

## Calcul & données

- Sciences des données et du calcul



© CERN, © Patrick Dumas / CNRS, © ESA-S. Corvaja, © Vincent Moncorgé / CC IN2P3 / CNRS, © CERN, © Philippe Stroppa / CEA / CNRS



# Physique des particules et physique hadronique

## Composants ultimes et interactions fondamentales

- Recherche de nouvelle physique
- Boson de Higgs
- Interactions quarks-gluons
- Symétrie matière/antimatière
- Supersymétrie
- Neutrinos issus des accélérateurs
- Mesures de précisions



© CERN



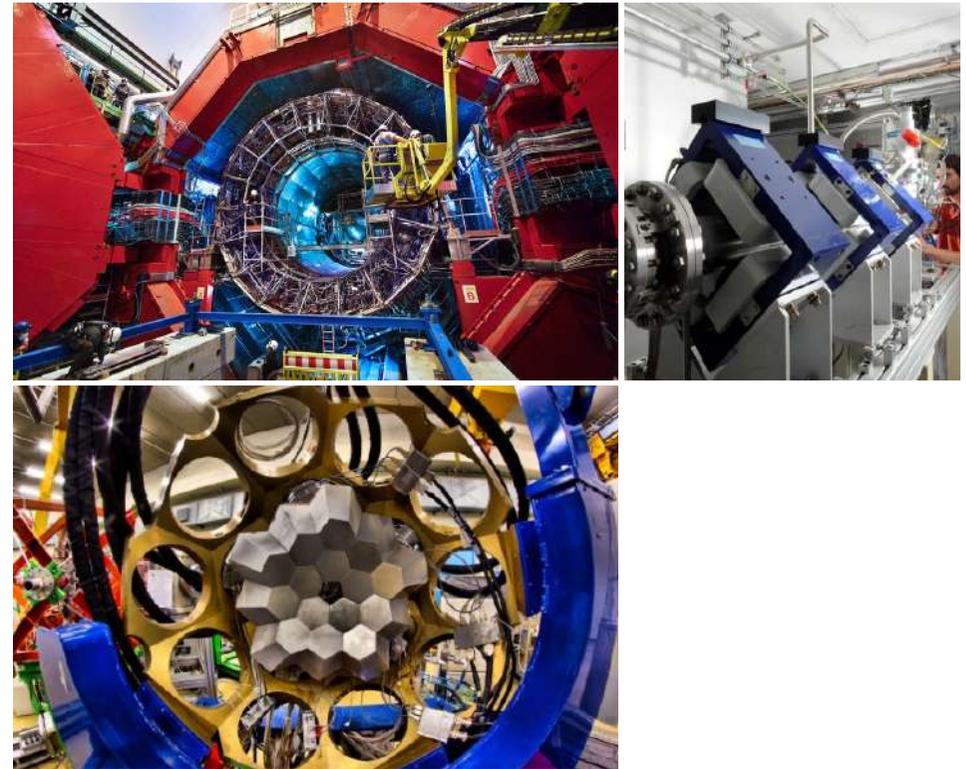
© CERN



# Physique nucléaire et applications

## Noyaux atomiques

- Structure nucléaire
- Noyaux exotiques
- Astrophysique nucléaire
- Neutrinos auprès des réacteurs
- Énergie nucléaire
- Applications médicales
- Radiochimie, radiobiologie, radiothérapie
- Dosimétrie / R&D moniteurs de faisceau
- Imagerie, simulations



# Astroparticules et cosmologie



## Composition et comportement de l'univers

- Evolution et histoire de l'Univers
- Matière noire et énergie noire
- Ondes gravitationnelles
- Rayons cosmiques
- Astronomie gamma
- Neutrinos cosmiques
- Désintégration Double Beta



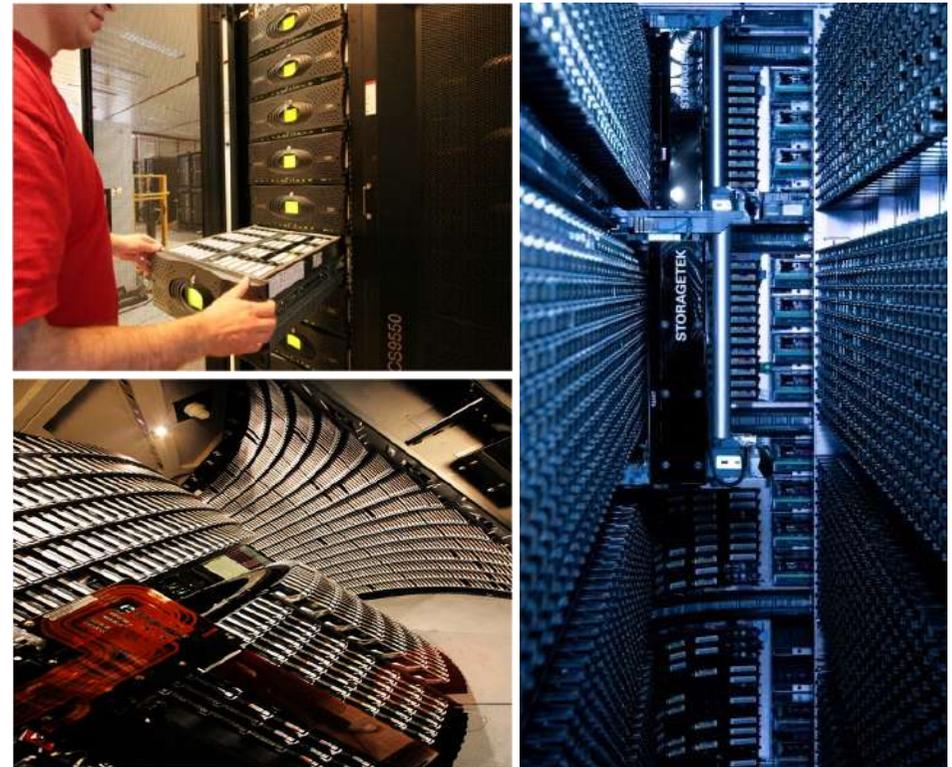
© CTA / Tomohiro Inada



# Calcul et données

## R&D autour du big data et des technologies de calcul

- Data management et Data mining
- Émergences de nouvelles technologies de calcul
- Interopérabilité des infrastructures
- Cloud européen
- Calcul LHC, Astroparticules...





# Liens avec l'industrie

## Développements industriels et applications

*Production des instruments*  
*Expertise*  
*Transfert industriel de nos compétences*

- Accélérateurs
- Santé (imagerie médicale)
- Spatial
- Environnement (mesure de faibles radioactivités, réseau Becquerel, LabCom P2R)
- Mécanique, Électronique, Micro-électronique
- Calcul

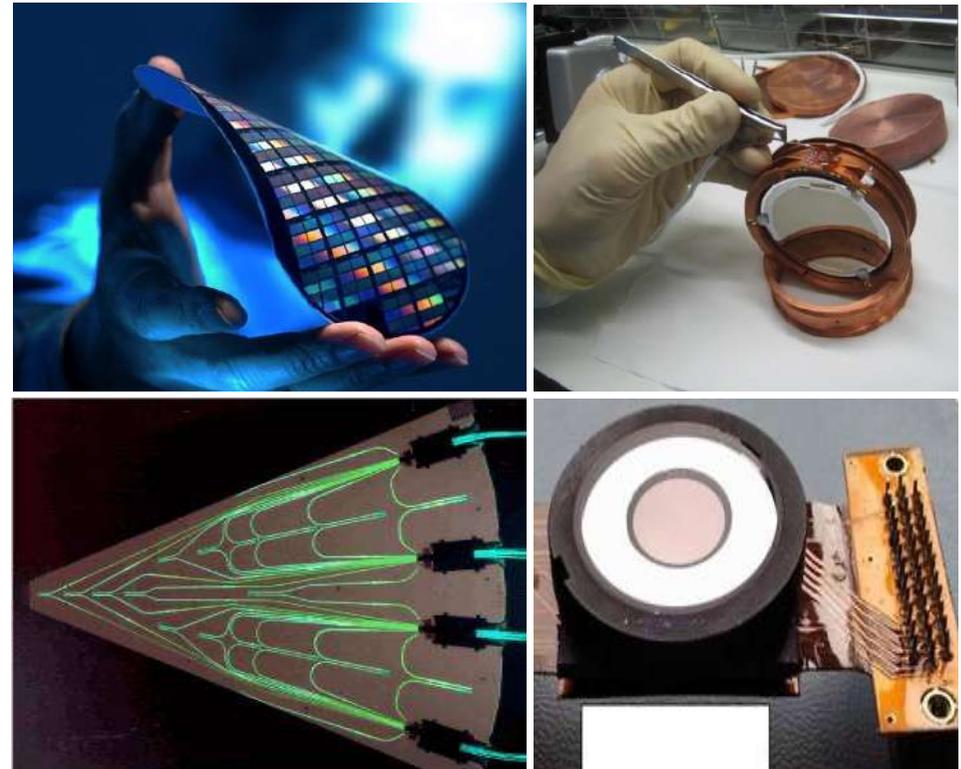




# La place de l'électronique et de l'instrumentation

## Capteurs, systèmes embarqués et d'acquisition de données

- Capteurs silicium
- Photo-détecteurs, scintillateurs, détecteurs gazeux
- Bolomètres
- Microélectronique
- Systèmes embarqués
- Développements pluri-disciplinaires (mécanique, chimie, électronique...)



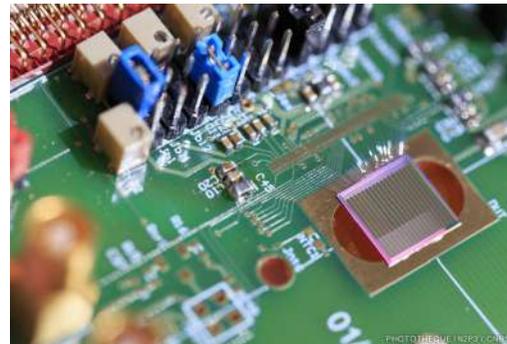
+ photo pci40



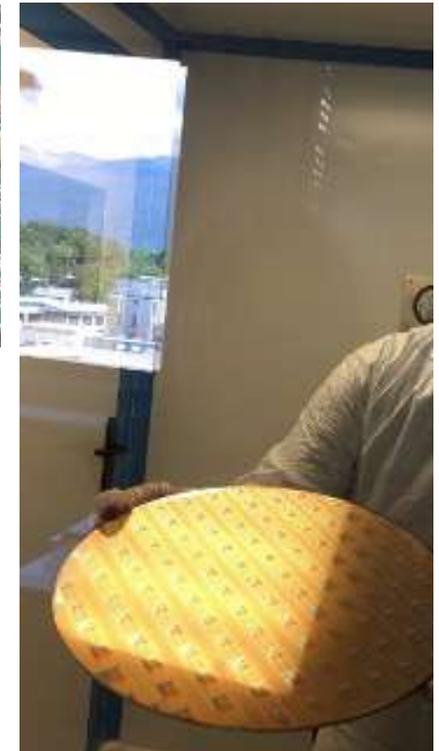
# La micro-électronique

## Une composante fondamentale, au cœur des expériences

- Intégration au plus proche des détecteurs de toute la chaîne de mesures (traitement analogique du signal, numérisation et transfert des données)
- Des expériences avec de plus en plus de canaux de mesure
- Permet de parvenir à des hautes densités d'intégration avec une dissipation thermique et un coût maîtrisé
- Développements utilisés dans des applications liées à la santé et à l'environnement



Phototèque IN2P3





---

## Des projets aux cœurs de la physique



# Un projet en physique des hautes énergies

## Le Large Hadron Collider (LHC) au CERN

- Plus et plus puissant grand collisionneur du monde
- 27 kilomètres de circonférence
- 4 expériences principales : ATLAS, CMS, LHCb et ALICE
- Fonctionne depuis 2008

## Une mise à jour des expériences est prévue en 2026

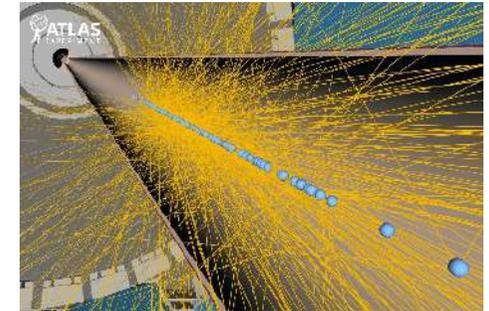
- Permet d'améliorer la précision des mesures de physique
- Chaque interaction du faisceau, toutes les 25 ns, produira en moyenne 200 collisions (au lieu de 30) qu'il faut reconstruire

## Développement de nouveaux détecteurs

- Intégration de la mesure précise du temps dans les circuits développés



Vue du LHC (@ CERN)



Simulation des collisions dans ATLAS (@CERN)

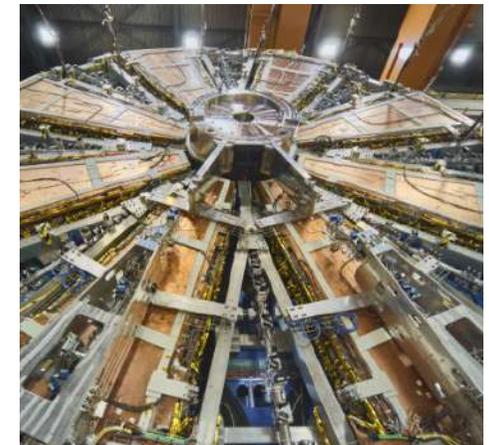


Photo d'un des bouchons d'ATLAS (@CERN)



# Le détecteur HGTD sur ATLAS

## Détecteur en silicium

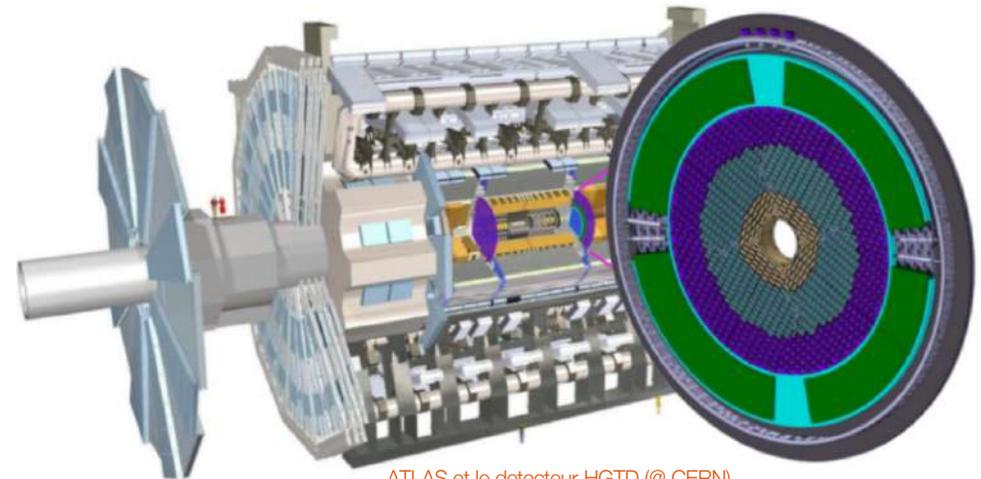
- 3.6 millions de canaux
- Résolution en temps 30 ps/trace, 50 ps en fin de vie
- Soumis à d'intenses radiations

## Basé sur des LGAD

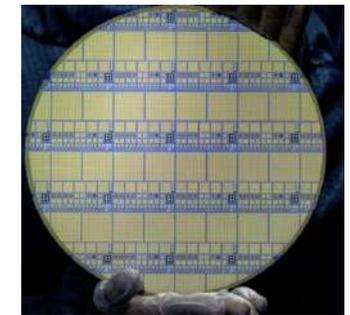
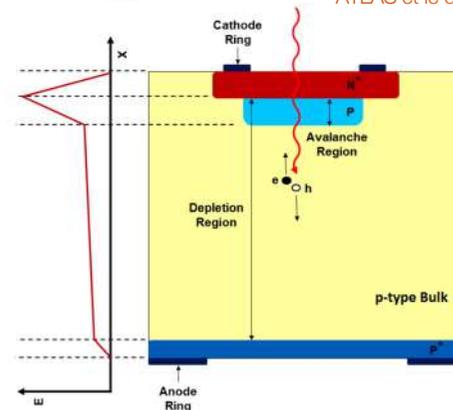
- Low Gain Avalanche Detector
- Diode (jonction p-n) avec une couche additionnelle dopée p
- Taille : 1.3 x 1.3 mm<sup>2</sup>

## Le circuit ALTIROC

- Développé dans le cadre d'une collaboration internationale IN2P3 / CERN / Fermilab
- Permet de lire les charges dans les LGADs générées par le passage des particules



ATLAS et le détecteur HGTD (@ CERN)



Wafer LGAD complet



# Le circuit ALTIROC

## Circuit avec une matrice de pixels

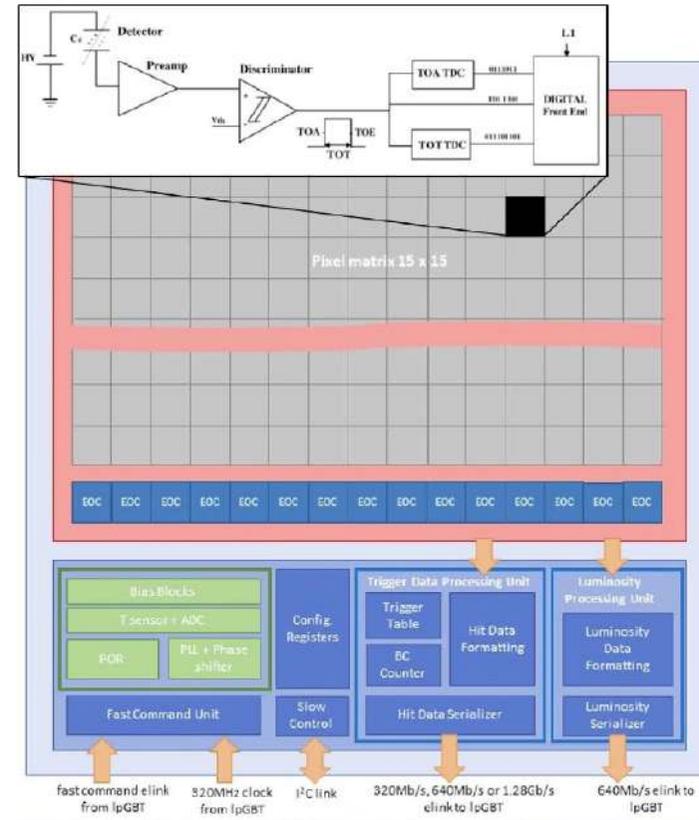
- Développée en technologie CMOS 130 nm
- 225 pixels de 1x1 mm
- Mesure de la charge déposée et du temps d'arrivée pour chaque pixel
- 5 mW/canal, tolérance aux radiations jusqu'à 4.5 MGray

## Circuit mixte

- Traitement analogique initial du signal (amplification puis discriminateur)
- Mesure du temps avec deux TDC (résolution 20 ps)
- Numérique pour le traitement des pixels touchés et la création de trames
- Techniques de conception tolérantes aux radiations
- La basse consommation est cruciale

## Flux de données

- Chaque circuit génère jusqu'à 2 Gb/s de données qu'il faut envoyer par fibre optique vers des ordinateurs



Schématique du circuit ALTIROC



# L'environnement du circuit ALTIROC

## Electronique

- Transfert des données de plusieurs circuits vers les fibres optiques
- Gestion des alimentations
- Développement des cartes de tests des prototypes

## Mécanique

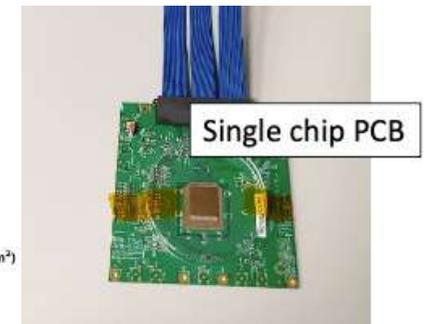
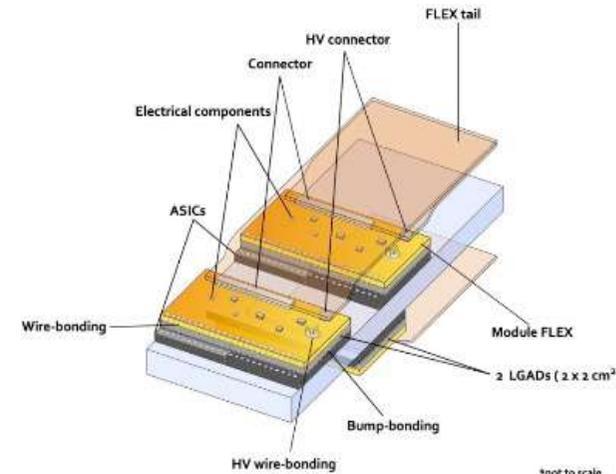
- Alignement entre les circuits ALTIROCs et les LGADs
- Refroidissement du système
- Gestion des masses électroniques

## Informatique

- Algorithmes de traitements des données
- Contrôle expérimental des circuits

## Etudes liées à la physique

- Test des performances des circuits soumis à un faisceau test de particules connues



ALTIROC sur sa carte de test

Détail de la mécanique d'interconnexion entre ALTRIIOC et les LGADs



Partie électronique du détecteur



# Le test du détecteur

## Les tests en laboratoire

- Caractérisation des performances du circuit
- Vérification de la concordance avec les simulations

## Les tests en faisceaux

- La détermination des performances du détecteur nécessite des tests dédiés : les tests en faisceaux
- Flux de particules connues avec une énergie contrôlée
- Uniquement quelques plateformes dans le monde (DESY en Allemagne, le CERN, GANIL en France)
- Nécessite un développement spécifique d'une électronique, d'une mécanique et d'un contrôle expérimental

## ALTIROC

- Plus de 6 ans de développements



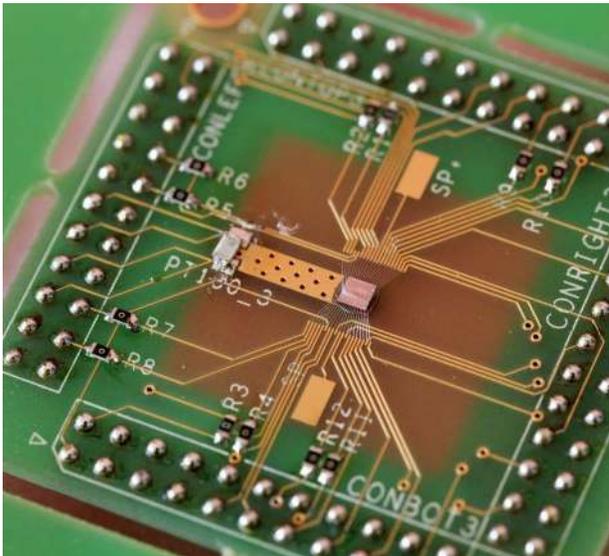
Tests en faisceaux du détecteur HGDT

DESY  
CERN





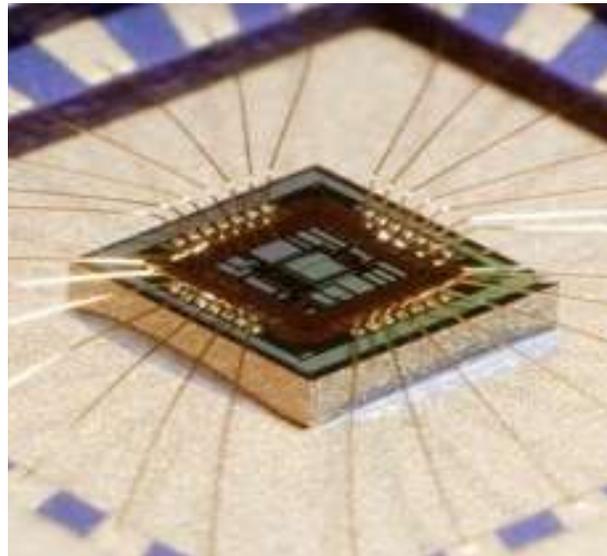
## Exemple de circuits développés à l'IN2P3



CCPM-Photothèque INP2P3

### Prototype pour le projet RD53

Circuit de mesure de charge et de temps



LPCA

### Circuit LOGIC

Lecture de capteurs de gaz pour des parking souterrains



IP2I

### Circuit LARZIC

Lecture de capteur à très basse température ( $-160^{\circ}\text{C}$ ) pour l'expérience DUNE



---

# Le métier de micro-électronicienne et de micro-électronicien à l'IN2P3



# Les différents acteurs d'un projet technique

## Physicien·ne(s) référent·e(s)

- Défini le cahier des charges, suivi du projet
- Budget

## Service mécanique

- Structure, outillage, refroidissement

## Service électronique

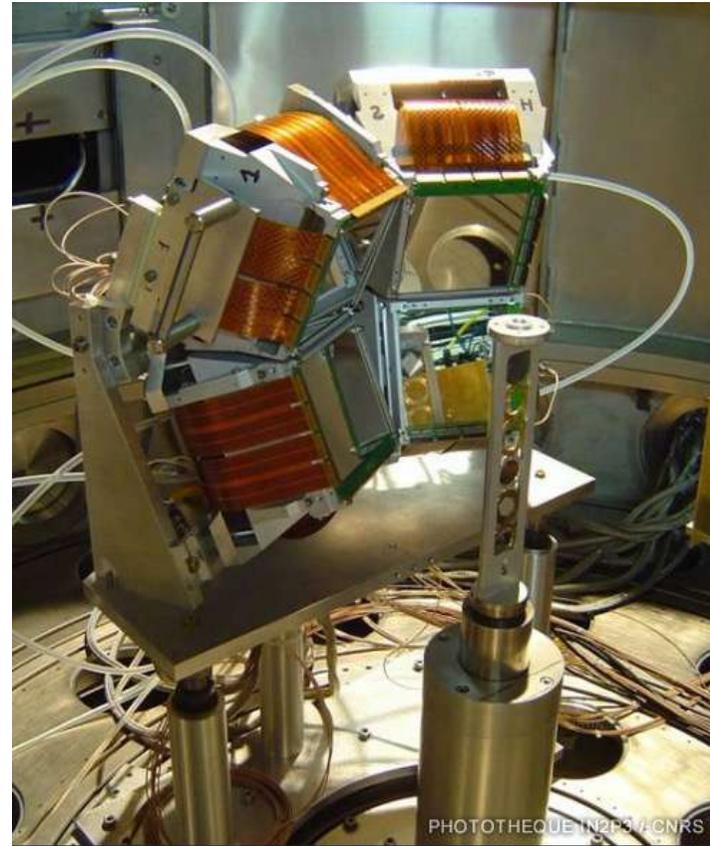
- Systèmes d'acquisition, Intégration
- Systèmes embarqués

## Service informatique

- Système de surveillance et de contrôle

## Service micro-électronique

- Capteur, mise en forme du signal
- Test de circuits



Détecteur de particule chargées MUST

Photothèque IN2P3



# Le métier de micro-électronicien·ne à l'IN2P3

## Numérique

- Développement de la partie numérique
- Synthèse et placement routage
- De plus en plus intégration finale

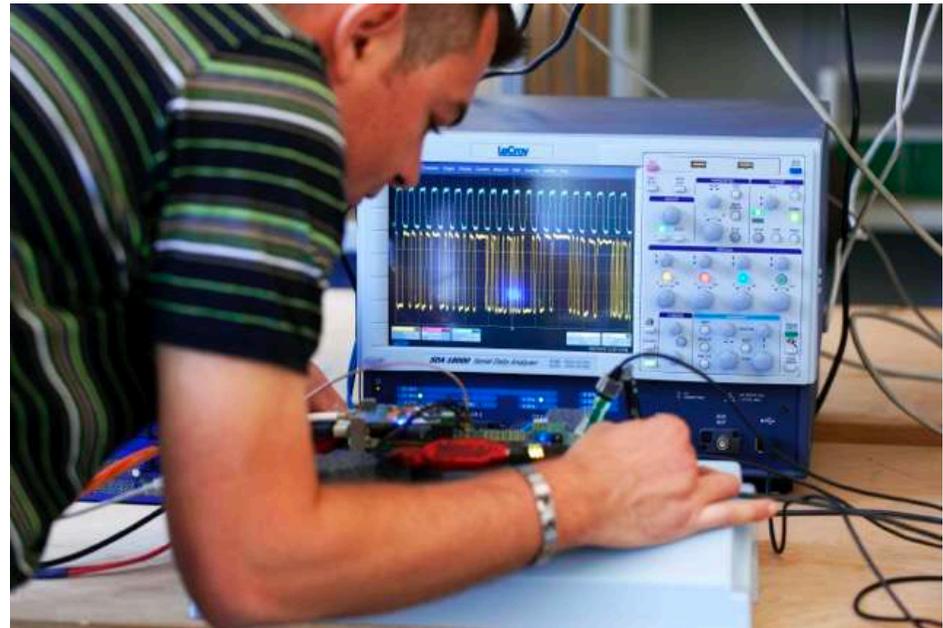
## Analogique

- Développement de l'ASIC/capteur
- Conception de la partie frontale du traitement du signal

## Layout

- Conception des couches géométriques des masques des parties analogiques

En plus de ces tâches les membres des services de micro-électronique réalisent **les tests des circuits** et participent à **leur intégration** sur les sites expérimentaux.



Test d'un circuit intégré au CPPM @ Camille Moirenc



# Flot de conception des circuits intégrés

## Utilisation du flot de conception Cadence

### Analogique

- Virtuoso
- Simulation Spectre, APS, AMS

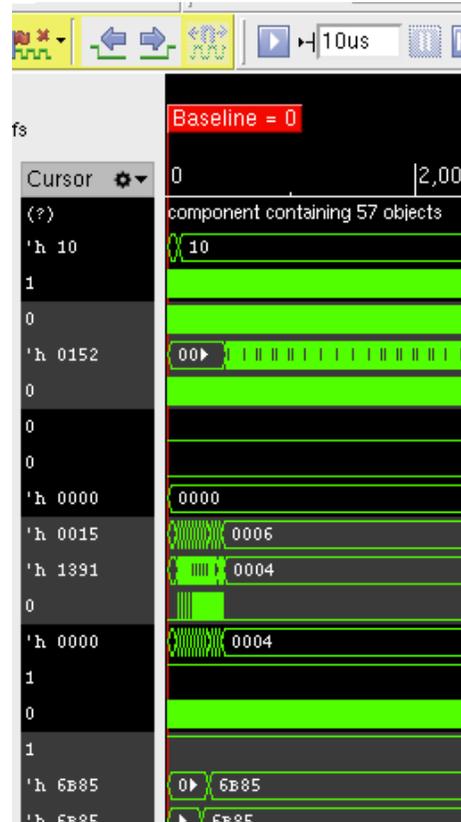
### Numérique

- Xcelium, Genus, Conformal, Innovus
- Développement en VHDL, systemVerilog, UVM

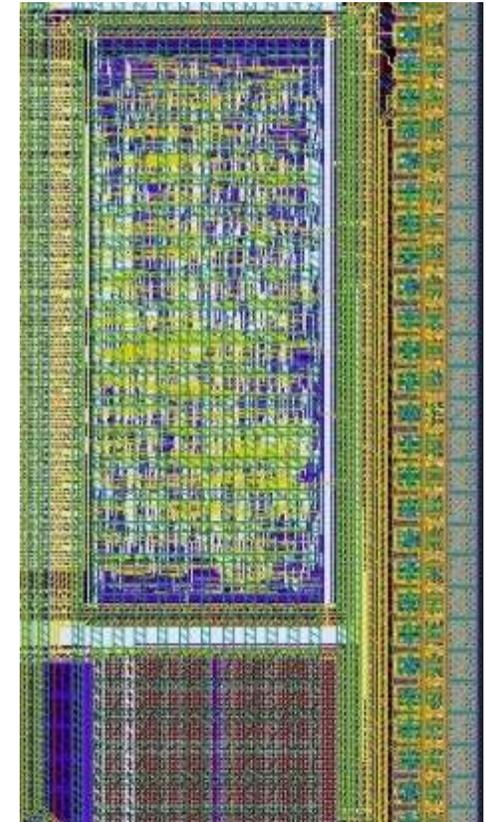
### Travail collaboratif

- Clisoft SoS

Technologies utilisées de 28 nm à 350 nm suivant l'application



Simulation numérique sous xcelium



Layout sous virtuoso



# Différences avec l'industrie

## Un environnement décloisonné

- Equipes multidisciplinaires
- Evolution des rôles au cours du projet

## Une compréhension globale du projet

- De la conception aux tests et à l'installation

## Implication pour la société

- Recherche publique, bien commun
- Enseignement

## Condition de travail

- Liberté d'entreprendre et d'apprendre
- Travail sur le long terme



L. Royer, Ingénieur dans l'équipe de micro-électronique du LPC installant un capteur sur l'ETNA



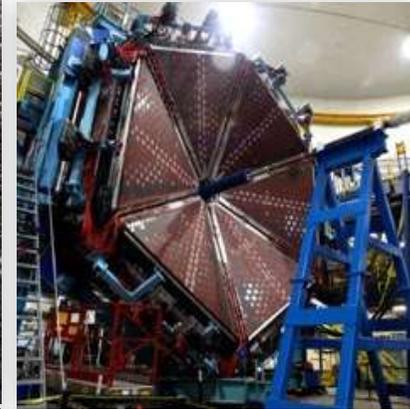
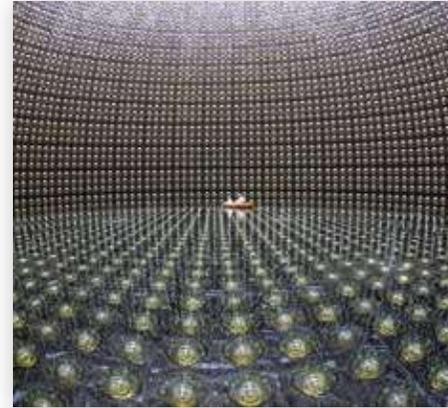
# Un environnement de travail international

## Grandes infrastructures de recherche

- Développements internationaux
- Physique des hautes énergies (ex: JLAB aux Etats Unis), astrophysique (KM3NeT dans la méditerranée), spatial (ex. satellite Euclid)...

## Exemple : CERN et LHC

- CERN : 23 états membres, 600 instituts et universités du monde entier
- Le LHC : Infrastructure internationale
- Début du design années 1980, mise en service en 2008
- 15 ans de construction
- 6000 utilisateurs



T2K et BELLE2 (Japon)

JLAB et DUNE (Etats Unis)



# Evolution dans le métier

## Diversité des profils

- Evolution possible dans toutes les facettes des métiers

## Exemple :

Hervé Chanal

De la micro-électronique à l'enseignement

**2002-2005** : Thèse en physique (électromagnétisme) à l'ONERA de Toulouse sur l'analyse de la diffusion par des peintures

**2006-2008** : CDD en électronique à l'IN2P3 (conception de carte et programmation de FPGAs)

**2009-2017** : Ingénieur de Recherche en micro-électronique à l'IN2P3 (conception de la partie numérique d'ASICs)

**2017-20..** : Maître de conférence attaché à la section Constituants élémentaires à l'Université Clermont-Auvergne (analyses de physique, conception d'instruments et enseignement)

# Rejoignez les micro-électronicien·nes à l'IN2P3



Pour un emploi, un stage, une thèse  
ou un apprentissage

## La MI2I

- Micro-électronique des deux infinis
- Le réseau IN2P3 en micro-électronique ouvert à l'international
- 70 Ingénieur·es en micro-électronique et test
- Lieu d'échange et d'émulation
- Formation continue et permanente

## Site web

<https://caemi2i.in2p3.fr/>



Rencontres Micro-électronique IN2P3/CNRS Oléron (2024)