

Travailler en micro-électronique au CNRS/IN2P3

Version 25 septembre 2024



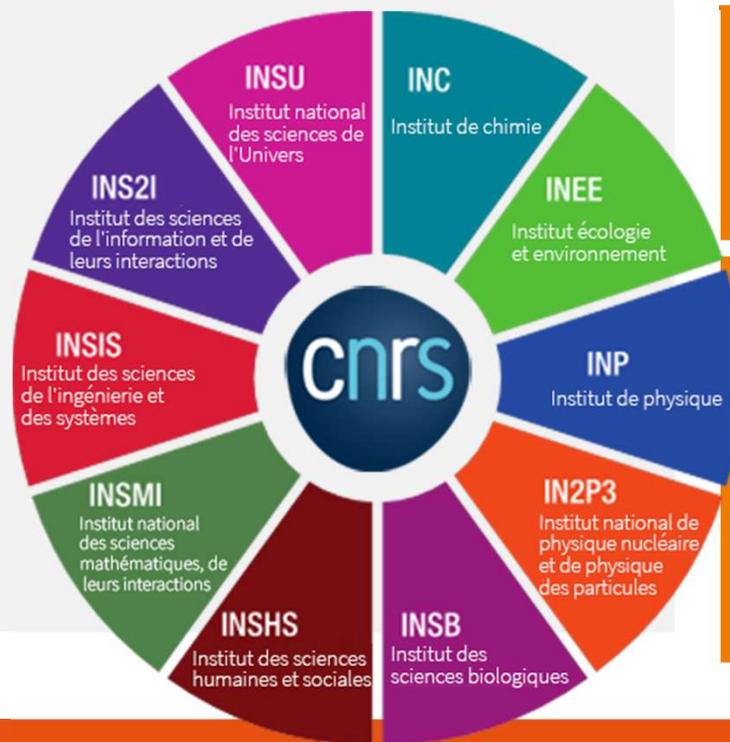


Le CNRS en quelques chiffres

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

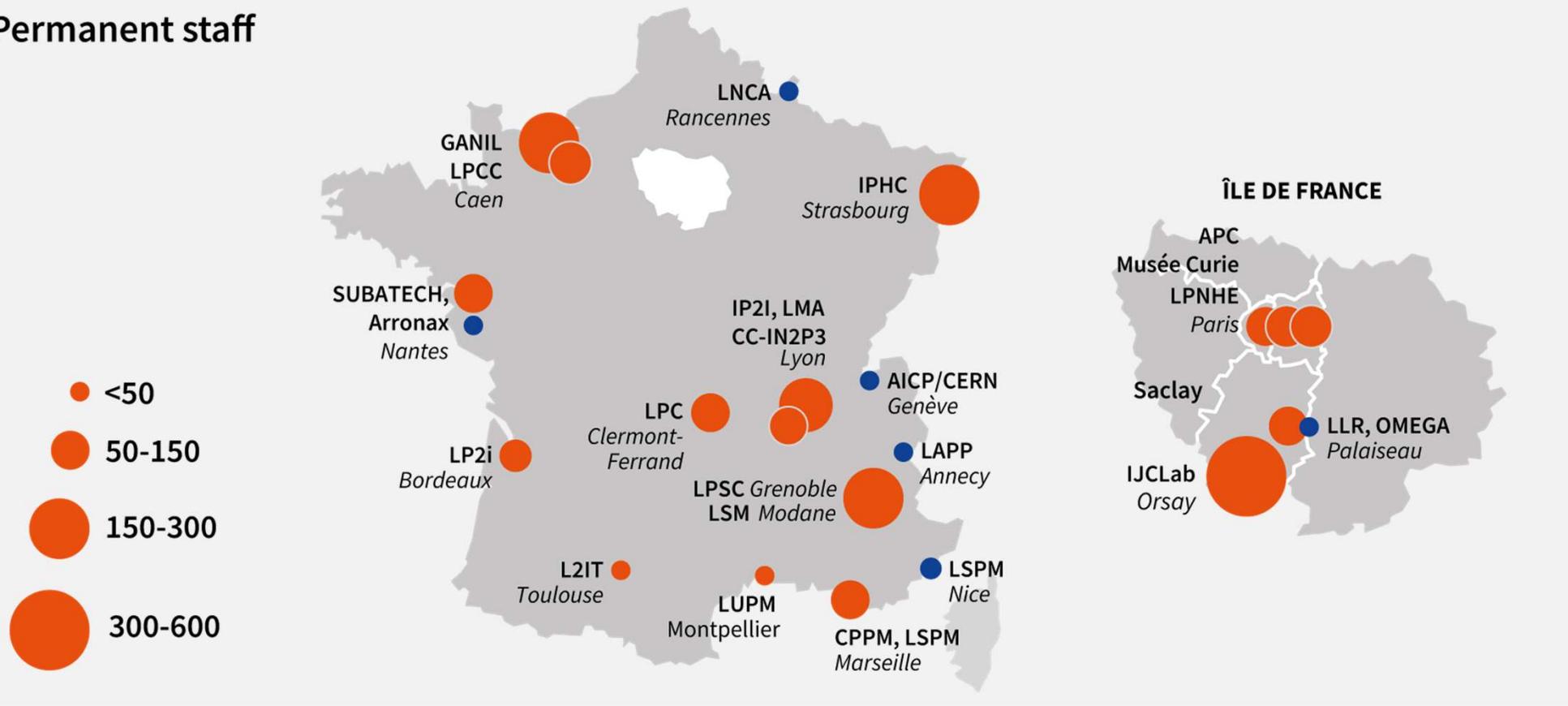


© CERN

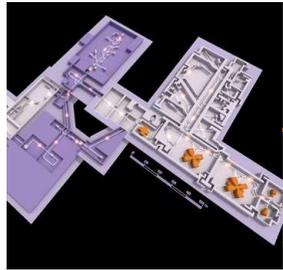
Les laboratoires de l'IN2P3 en France



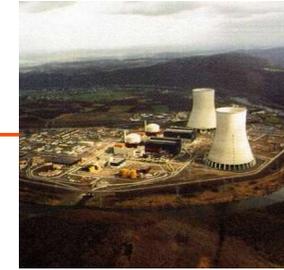
Permanent staff



Les grandes infrastructures de recherche en France



GANIL
Spiral 2



LNCA
DChooz



IJCLab
Alto



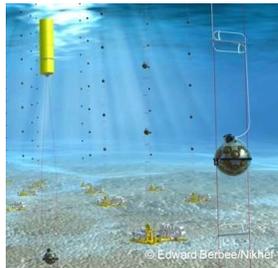
© CC IN2P3/CNRS

CC-IN2P3



LSM
Edelweiss
SuperNemo

© Mathis Koroglu



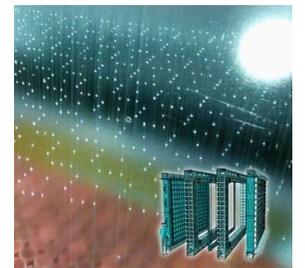
© Edward Berbee/Nikhef

LSPM
KM3NET



© J.L. Baudet/ILL

ILL
Stereo



© SuperNEMO Collaboration

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

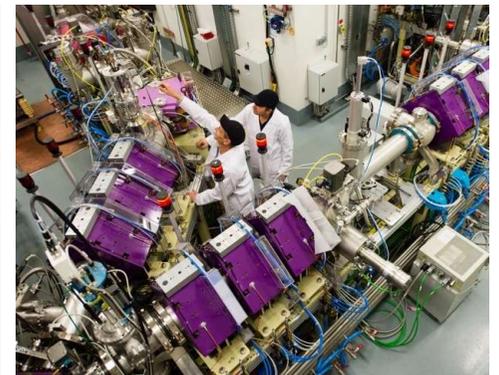
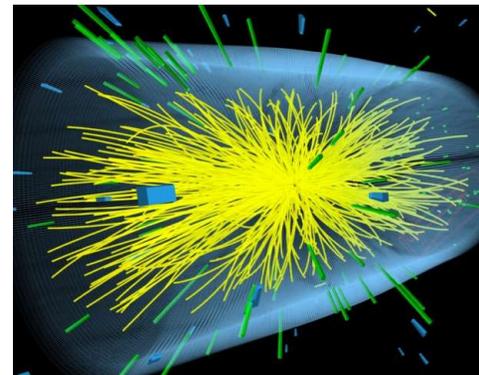
- Composition de l'Univers et son évolution

Accélérateurs et technologies

- Recherche et développement

Calcul & données

- Sciences des données et du calcul



© CERN, © Patrick Dumas / CNRS, © ESA-S. Conveja, © 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



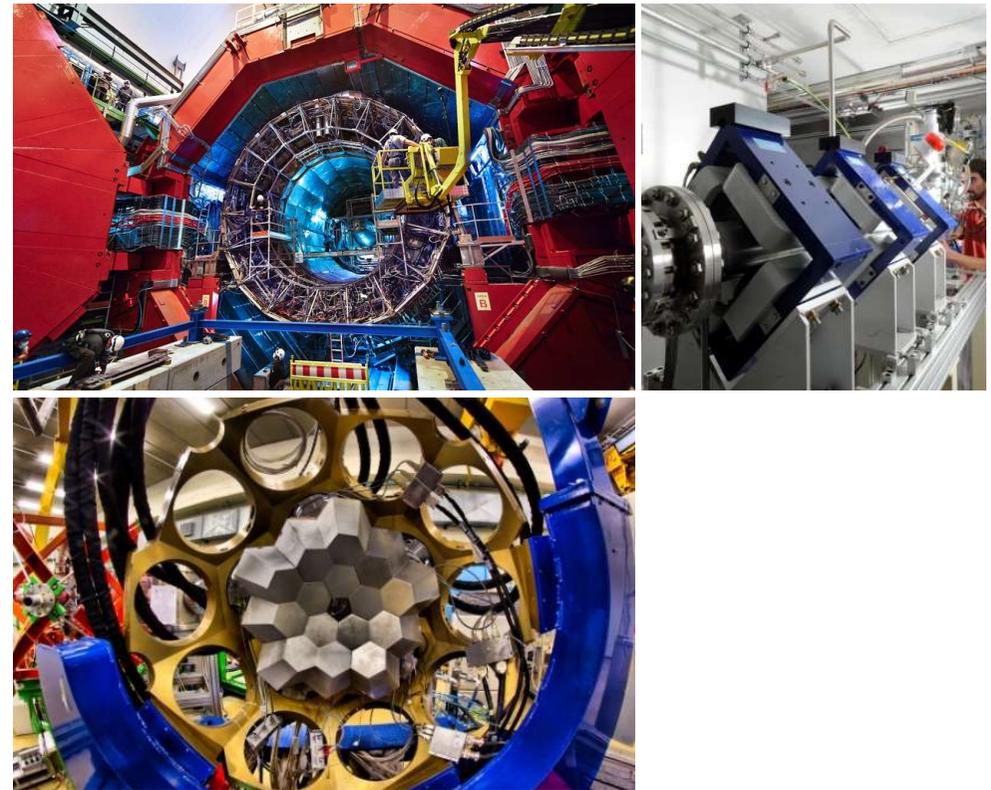
© CERN

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

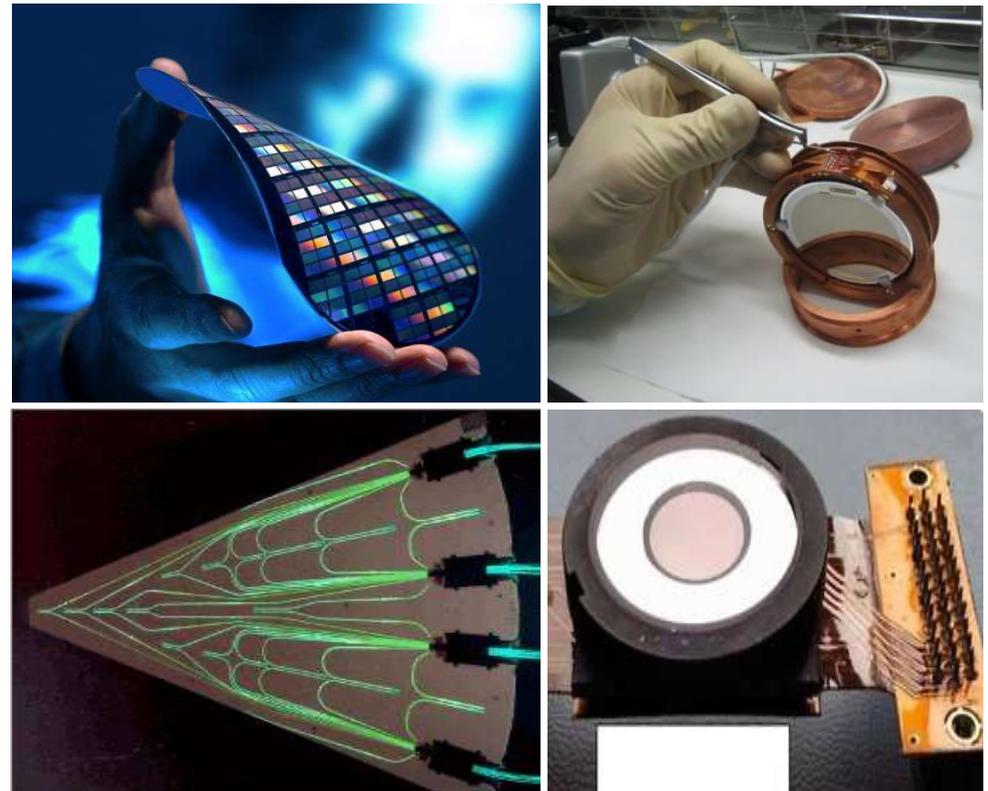




La place de l'électronique et de l'instrumentation

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...)



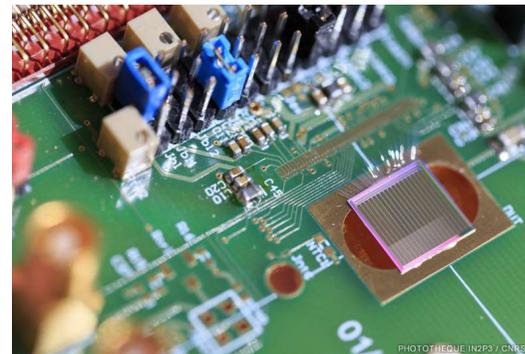
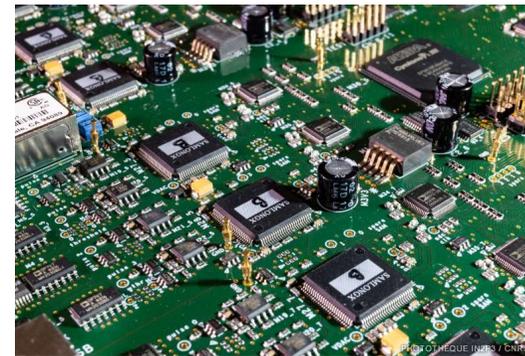
+ photo pci40

La micro-électronique

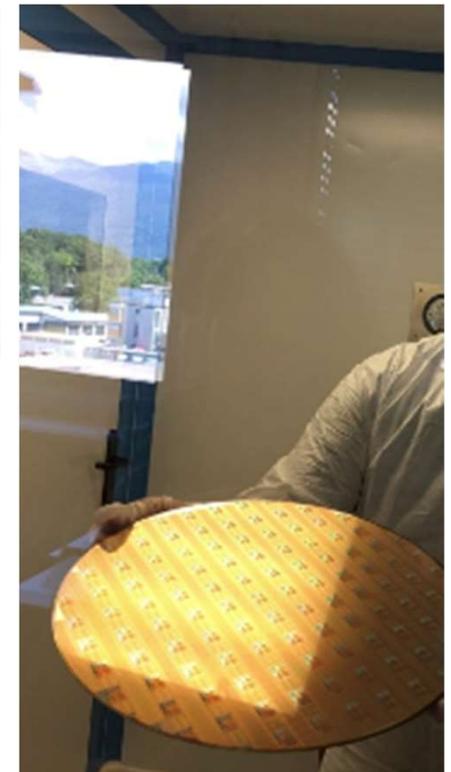


Une composante fondamentale, au cœur des expériences

- 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

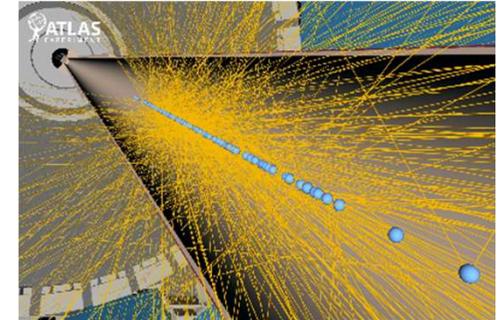
- Permet d'améliorer la précision des mesures de physique
- Chaque interaction du faisceau, toutes les 25 ns, produira en moyenne 200 collisions (au lieu de 30) qu'il faut reconstruire

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

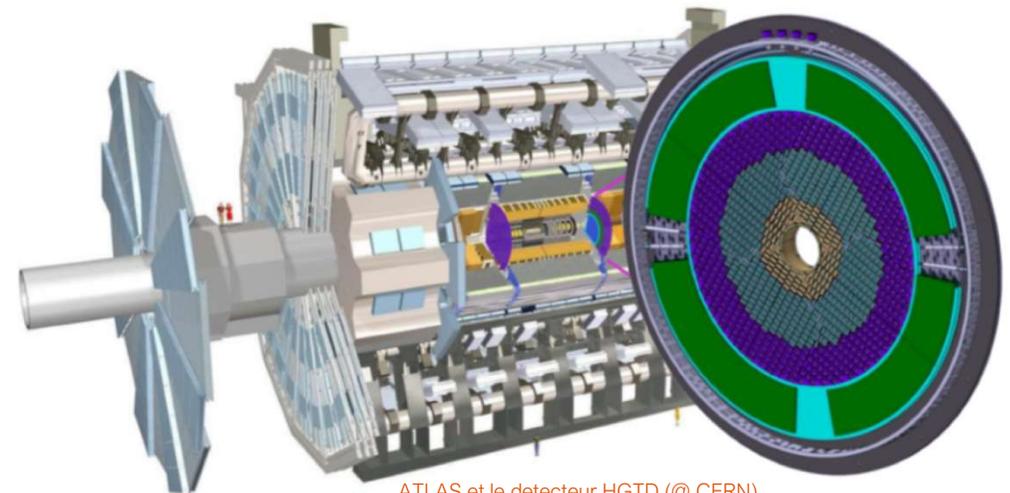
- 3.6 millions de canaux
- Résolution en temps 30 ps/trace, 50 ps en fin de vie
- Soumis à d'intenses radiations

Basé sur des LGAD

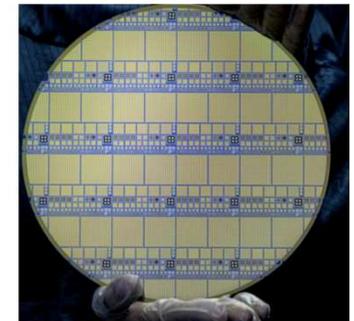
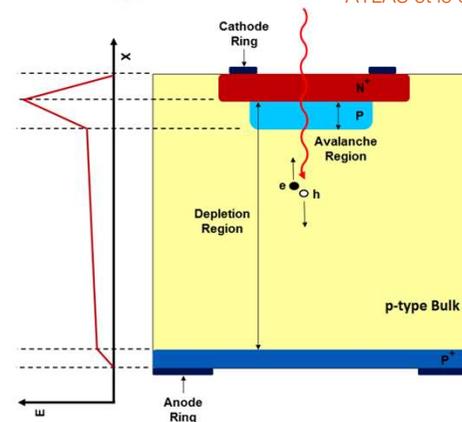
- Low Gain Avalanche Detector
- Diode (jonction p-n) avec une couche additionnelle dopée p
- Taille : 1.3 x 1.3 mm²

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

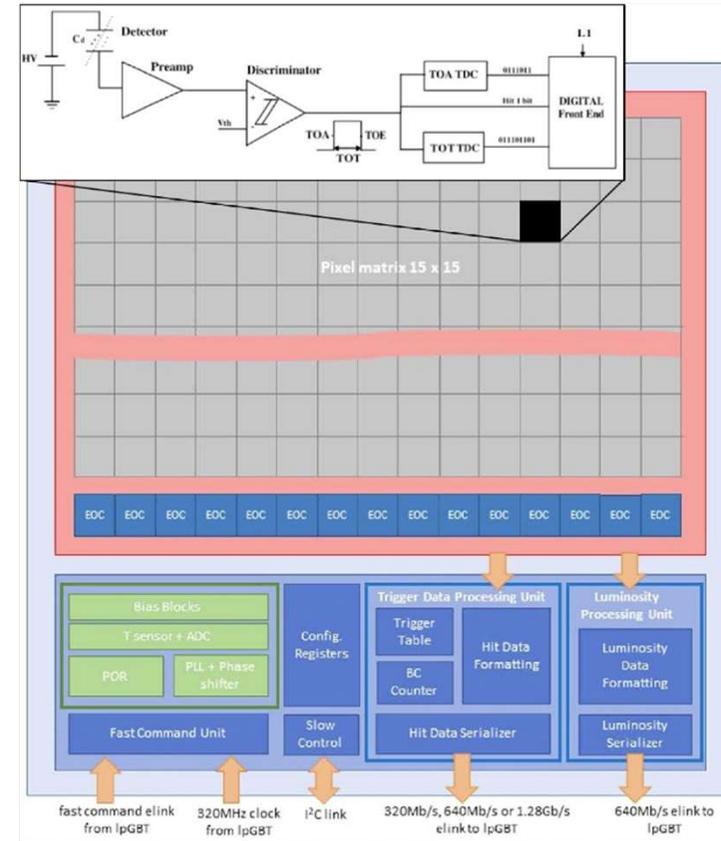
- Développée en technologie CMOS 130 nm
- 225 pixels de 1x1 mm
- Mesure de la charge déposée et du temps d'arrivée pour chaque pixel
- 5 mW/canal, tolérance aux radiations jusqu'à 4.5 MGray

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

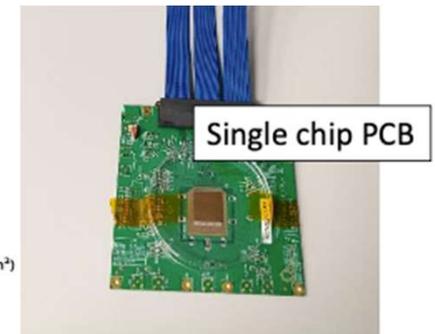
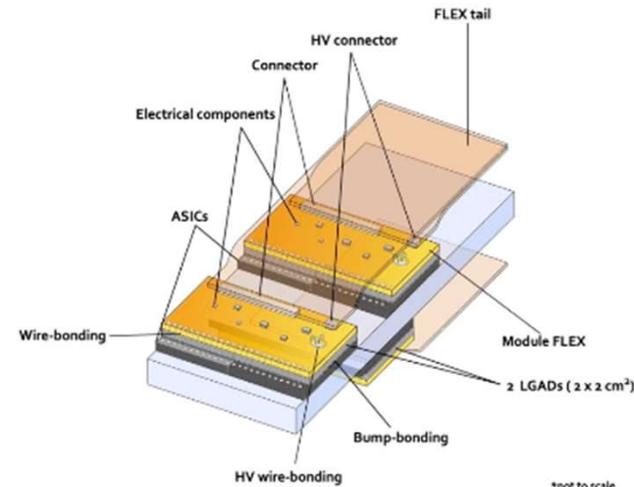
- Alignement entre les circuits ALTIROCs et les LGADs
- Refroidissement du système
- Gestion des masses électroniques

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'interconnection 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

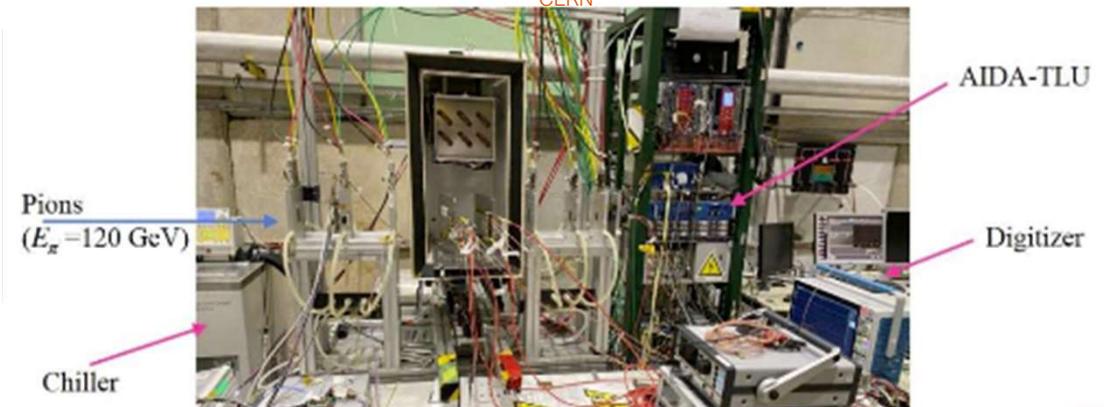
- La détermination des performances du détecteur nécessite des tests dédiés : les tests en faisceaux
- Flux de particules connues avec une énergie contrôlée
- Uniquement quelques plateformes dans le monde (DESY en Allemagne, le CERN, GANIL en France)
- Nécessite un développement spécifique d'une électronique,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

ALTIROC

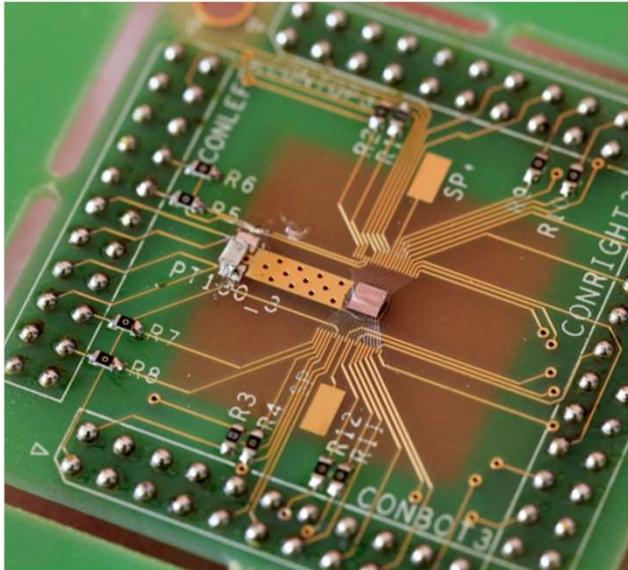
- Plus de 6 ans de développements



Tests en faisceaux du détecteur HGDT
DESY
CERN



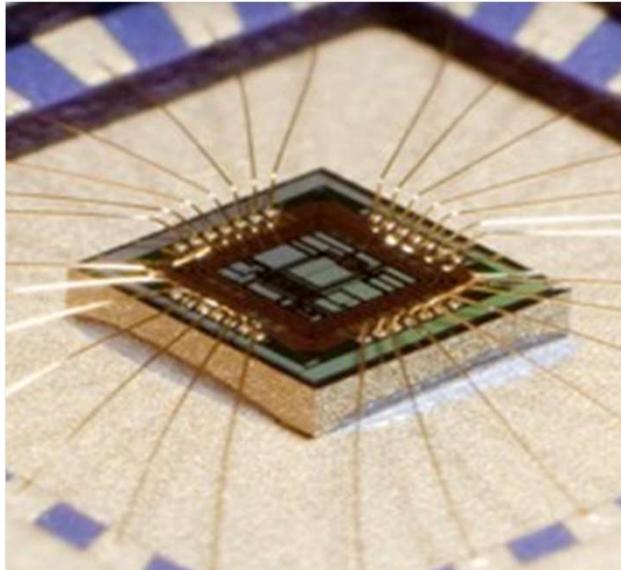
Exemple de circuits développés à l'IN2P3



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



IP21

Circuit LARZIC

Lecture de capteur à très basse température (-160°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

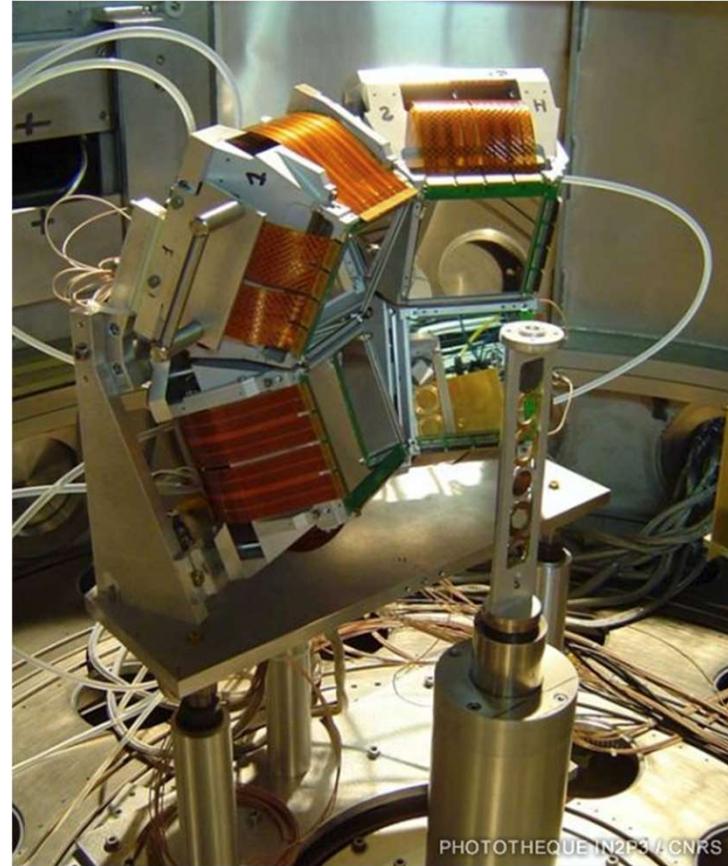
- Systèmes d'acquisition, Intégration
- Systèmes embarqués

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

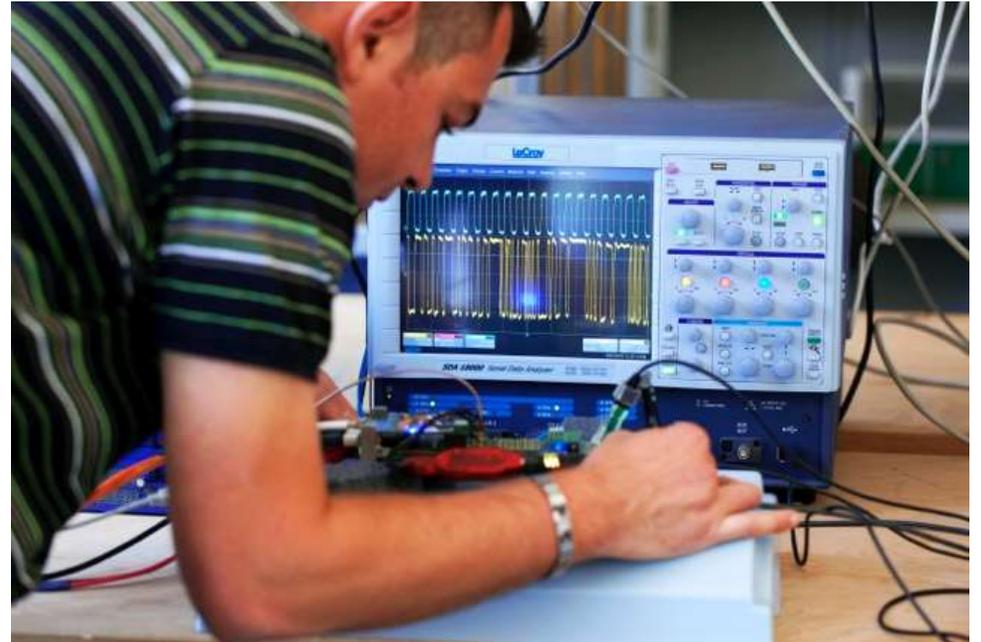
Analogique

- 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

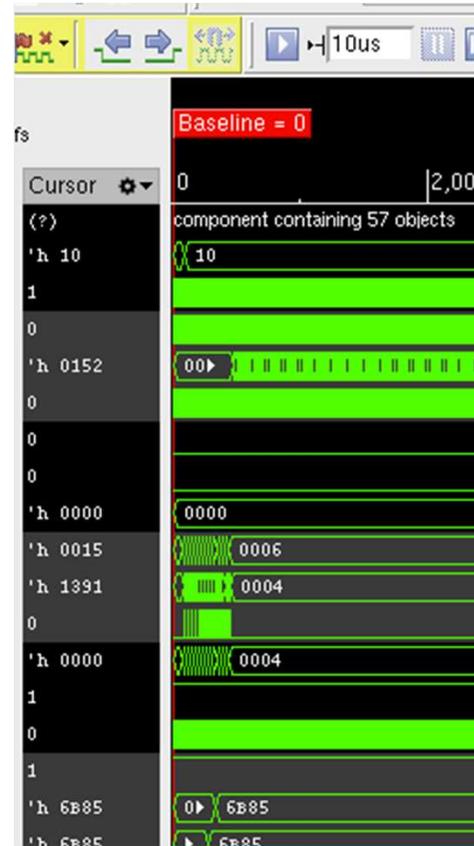
Numérique

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

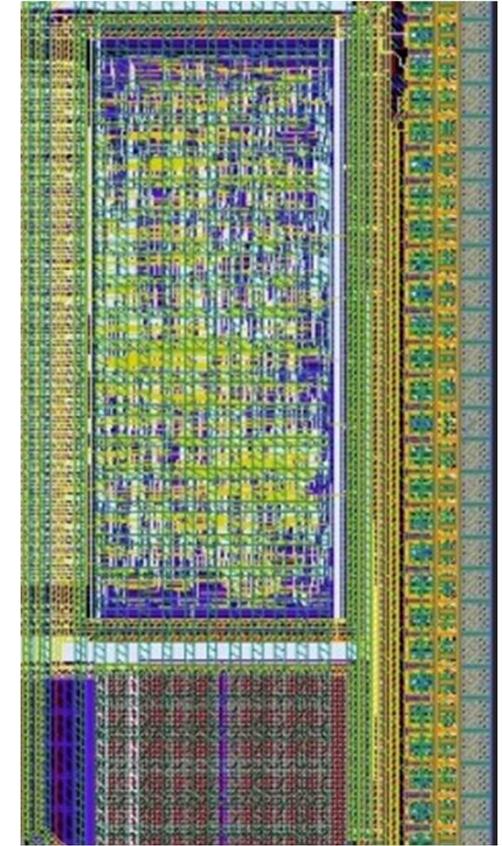
Travail collaboratif

- Cliosoft 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

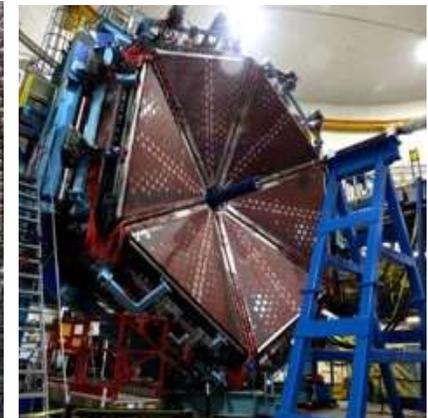
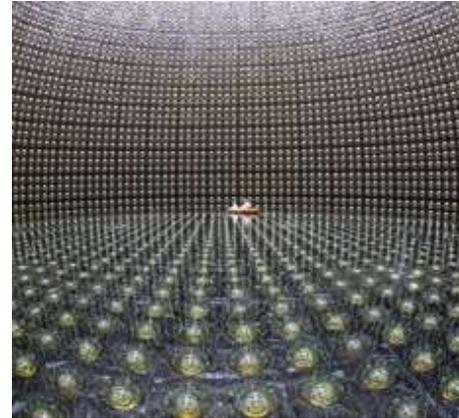


Grandes infrastructures de recherche

- 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

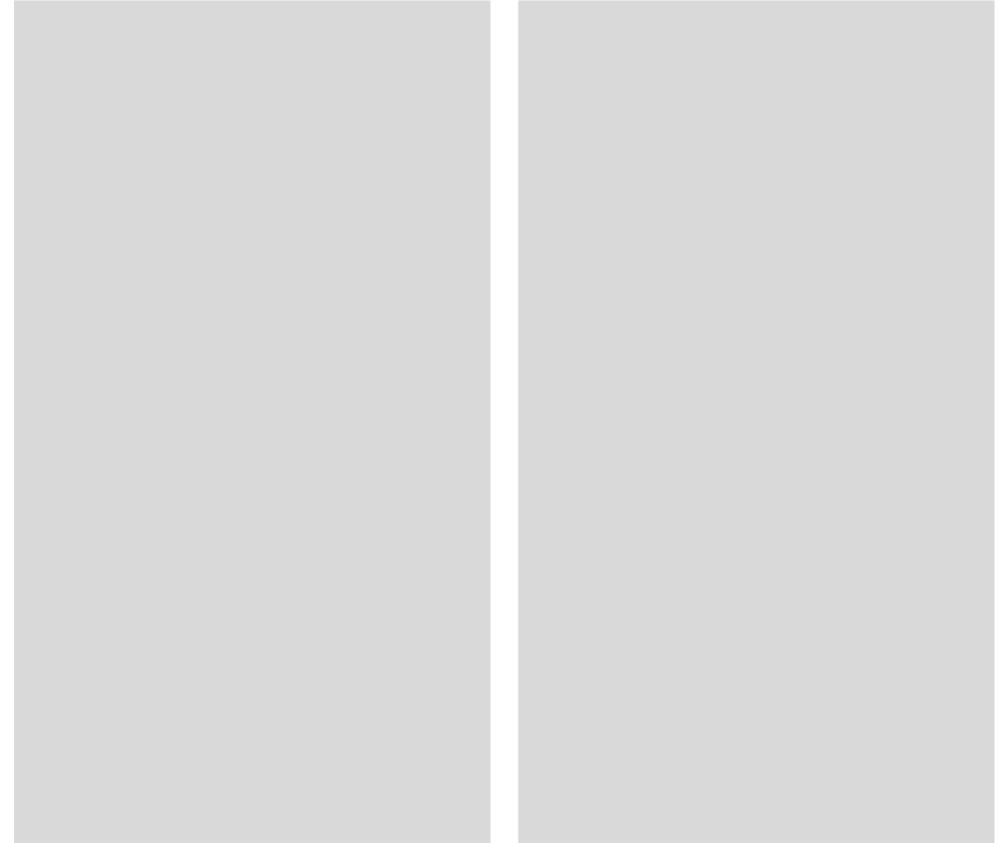
De la micro-électronique à l'enseignement

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)