

Journée P2I

9 Janvier 2024

R&D sur les détecteurs

Giulia Hull

Université Paris-Saclay, CNRS-IN2P3, IJCLab

Sommaire

★ Introduction

★ Les techniques de detection

- Détecteurs gazeux
- Détecteurs à semi-conducteurs
- Détecteurs cryogéniques
- Calorimétrie et photo détection
- Capteurs quantiques

★ Les technologies habilitantes

- Circuits intégrés et DAQ
- Mécanique

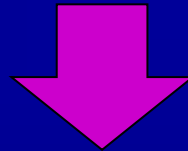
★ Conclusions

- 
- Défis pour le future
 - Axes de R&D
 - Un exemple de développement

Introduction: les motivations

Le développement de détecteurs de particules innovants est au cœur de notre mission

- Détection de processus toujours plus élusifs
- Dans des environnements plus difficiles
- Avec des fluxes des plus en plus importants



Effort accru pour développer d'avantage des techniques éprouvées mais aussi pour imaginer et concevoir les détecteurs de demain

Animation scientifique locale et nationale finalisée à intensifier l'effort de la R&D des détecteurs

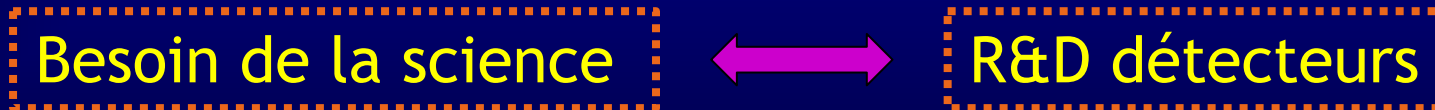
Introduction: les motivations

Nos laboratoires ont une solide expérience dans la construction des systèmes de détections complexes



L'activité de R&D est un moment essentiel dans la définition des instruments de recherche scientifique des projets futurs

→ Se doter de la capacité de mener des R&D risquées sur toute l'échelle de TRL au sein de nos laboratoires



Les défis du future

Les détecteurs peuvent utiliser des technologies très différentes qui nécessitent le développement de programmes de R&D dédiés capables de conduire à des ruptures technologiques de pointe dans ces domaines.

- **Sensibilité améliorée et bruit réduit**
 - pour détecter des événements très rares et/ou à faible rapport signal sur bruit
- **Meilleure résolution énergétique, temporelle et spatiale**
 - pour améliorer l'identification des particules
- **Efficacité accrue, fiabilité et durée de vie accrues**
 - Pour une utilisation dans des conditions extrêmes
- **Lecture à haut débit et à grande vitesse avec DAQ efficace**
 - Pour les expériences HEP et de physique nucléaire

Détecteurs à gaz

Détecteur intrinsèquement polyvalente. Pour des technologies bien connues, les détecteurs sont toujours conçus et assemblés dans nos laboratoires

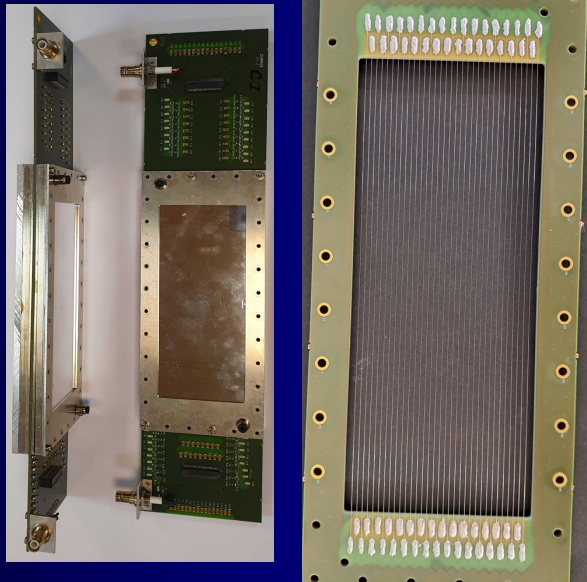
Défis pour le futur:

- Amélioration de la résolution énergétique, temporelle et spatial
- Seuil en énergie plus bas
- Plage dynamique plus large
- Majeur durabilité à flux élevé

Axes de R&D:

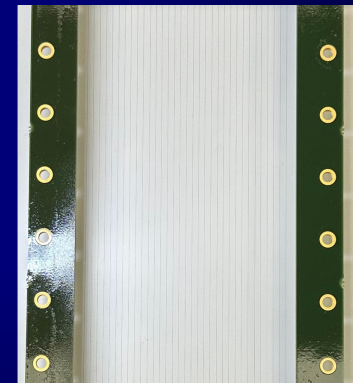
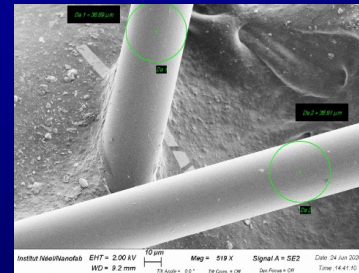
- Minimisation du budget matière
- Nouveaux mélanges de gaz
- Mesure, en coïncidence temporelle, du signal de ionisation et de la lumière émis
- Électronique frontal pour un meilleur timing

CHANGE: CHAmbre à fils de Nouvelle GENération



- Tester différents types de fils: Al ou C de divers fournisseurs.
- Partager les connaissances entre les laboratoires de l'IN2P3: moderniser le métier de tissage de fils
- Développer un détecteur polyvalent pour les tests (dureté du rayonnement, gain, résolutions, l'homogénéité...)

Une mécanique simple, 6 ensembles disponibles
 PCB 32 voies, chaque fil est lu des deux côtés
 Changement de PCB facile pour tester les différents types de fils
 Données acquises avec sources pour certains détecteurs, analyse en cours



Détecteurs à semi-conducteurs

Famille de détection largement utilisée en PHE, PN, astro et medical

Défis pour le futur:

- Granularité élevée
- Temporisation ultra rapide
- Budget de matière réduit
- Bonne tenue aux radiations

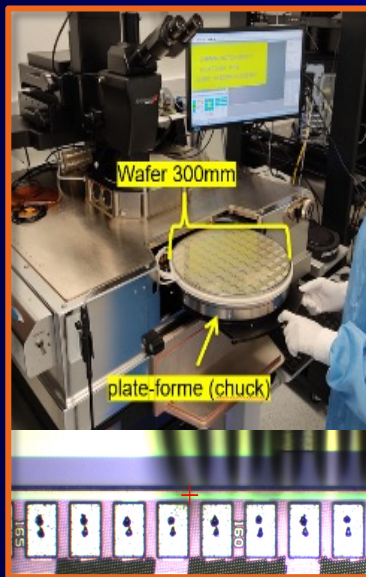
Axes de R&D:

- Géométries complexes
- Détecteurs massives à bas bruit
- Amélioration de la résolution énergétique, spatial et temporelle
- Développement d'une lecture de données à haute débit

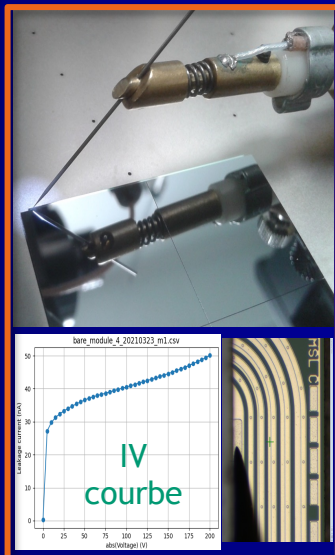
ATLAS - ITk pixel prod for HL-LHC

Paris Cluster (IJCLab + LPNHE + CEA-IRFU) :
50 wafers à tester + 1500 (+600 spares) modules à assembler et tester en 3 ans

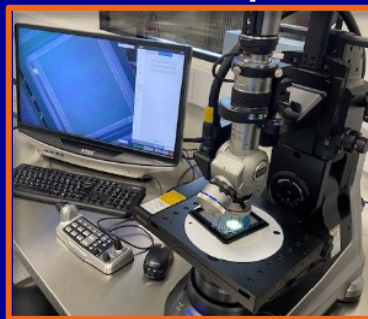
Probe station



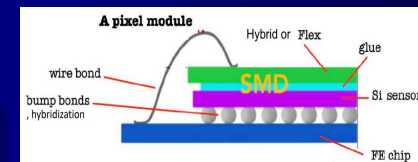
Probe station



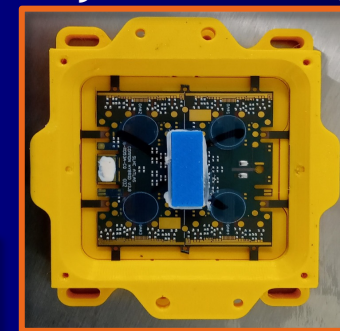
Microscope



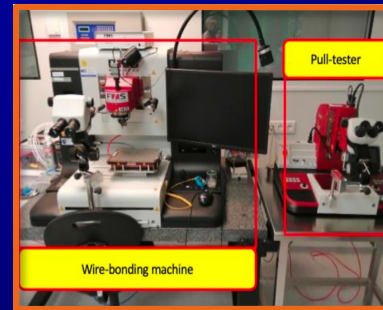
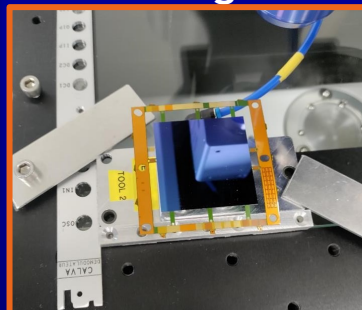
Collage



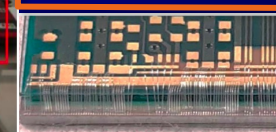
Parylene masking



Metrologie 3D



Wire-bonding



Wafer probing
Test ITkPix ASIC

Courbe IV du capteur et du module nu

Inspection des modules nus et des Flex

Collage de modules nus et des Flex (+ inspection)

Wire bonding

Dépôt d'une couche de Parylene

Cycles thermiques:
10 x (-45°C, +40°C)
1 x (-55°C, +60°C)

Test des modules
90Sr scan

[Credits: Ana Sofia Torrento pour ATLAS-ITk]

Détecteurs cryogeniques

Largement utilisée en physique des astroparticules et en cosmologie

Défis pour le futur:

- Diminution du bruit de fond
- Amélioration de la sensibilité
- Amélioration de la résolution énergétique, temporelle et spatial
- Meilleure intégration entre les détecteurs

Axes de R&D:

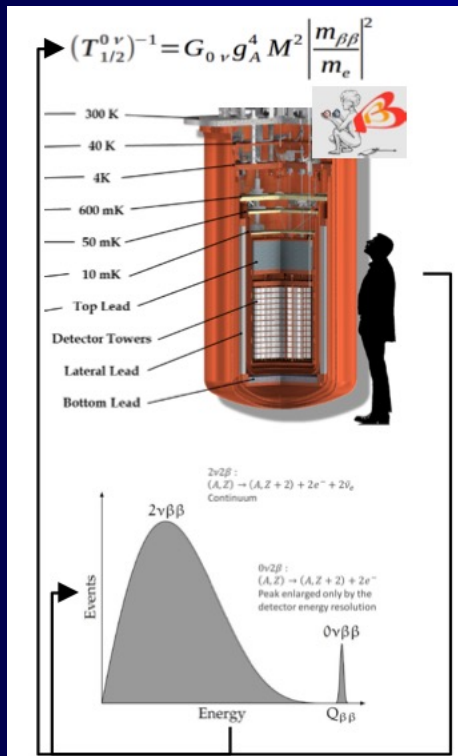
- Mesure simultanées de la chaleur et de la ionisation ou de la lumière
- Réseaux des bolomètres
- Développement des ASICs dédiés pour une consommation réduite, multiplexing pour réduire les voies

CUPID-Cuore Update with Particle ID

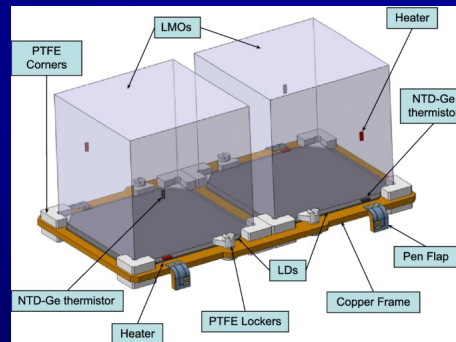
Expérience de double décroissance beta sans émission de neutrino → masse des neutrinos et hiérarchie des masses

~ 1700 Bolomètre $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ à double lecture chaleur-lumière → $Q_{\beta\beta}$ at 3034 keV
 ~ 450 kg masse active de détection: fond (alphas) rejeté grâce à la scintillation, lu via les détecteurs de lumière au Ge Neganov-Trofimov-Luke (NTL-LD)

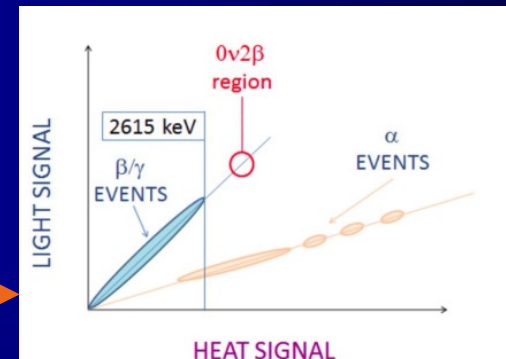
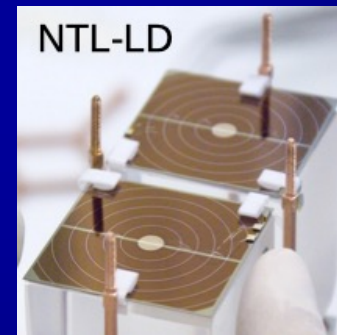
Le bkg ultime dû aux coïncidences aléatoires de la désintégration $2\nu\beta\beta$ est également activement rejeté via les NTL-LD (grâce à la vitesse).



Module bolomètre CUPID à double lecture



Heat detector τ : 10-20 ms
 Light detector τ : < 0.7 ms



BKG target: $\leq 1e-4$ counts/keV/kg/year

[Credits: Emiliano Olivieri pour CUPID]

Calorimétrie et photodétection

Photodétecteurs pour la lecture de la lumière de scintillation ou Cherenkov.

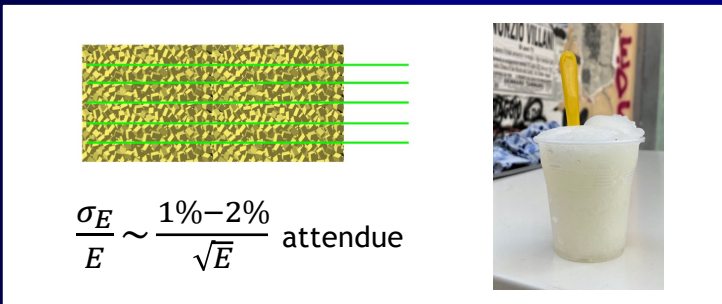
Défis pour le futur:

- Efficacité de détection élevée et large gamme dynamique
- Matériaux de scintillation ultra-rapides et résistants aux radiations
- Résolution temporelle et spatiale améliorée
- Photocapteurs peu coûteux et de grand surface

Axes de R&D:

- Nouveau matériaux
- Photodétecteurs compacts à plage dynamique et sensibilité élevée
- Nouveaux types de scintillateurs

GRAiNITA: mélange de grains de scintillateurs plongés dans un liquide dense



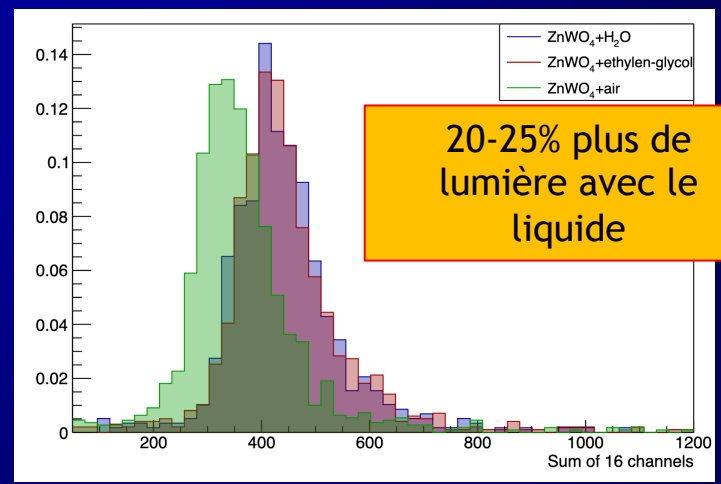
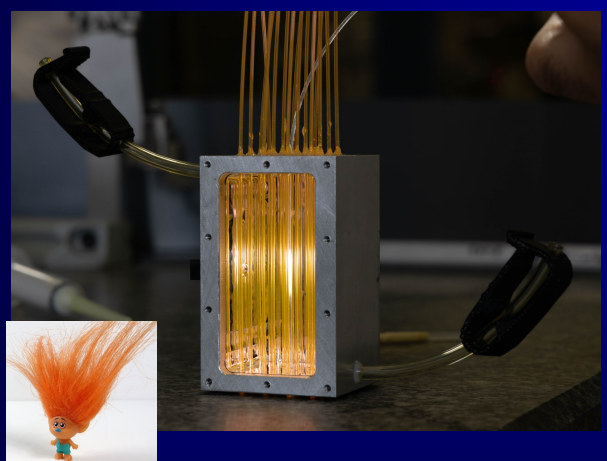
$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{1\% - 2\%}{\sqrt{E}} \text{ attendue}$$

- Grains de haute densité et haute Z
- Liquide de haute densité et haute index de réfraction
- Fibres WLS pour collecter la lumière de scintillation

ZnWO₄

- LY= 10 000 ph/MeV
- Z_{eff}=61
- Densité = 7.62 g/cm³
- n=2.1-2.3
- τ = 20 μs
- λ_{max}^{em} = 490 nm

- Haute granularité
- Bonne résolutions énergétique



LY = 0(400phe/40MeV)
 → Contribution statistique = 1% pour photons de 1 GeV

Capteurs quantiques

Dispositifs opérant dans la limite quantique ou avec de propriétés quantiques

Défis pour le futur:

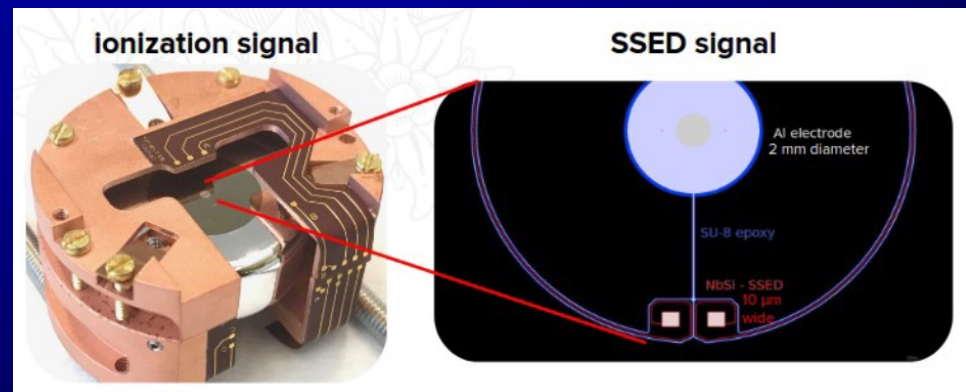
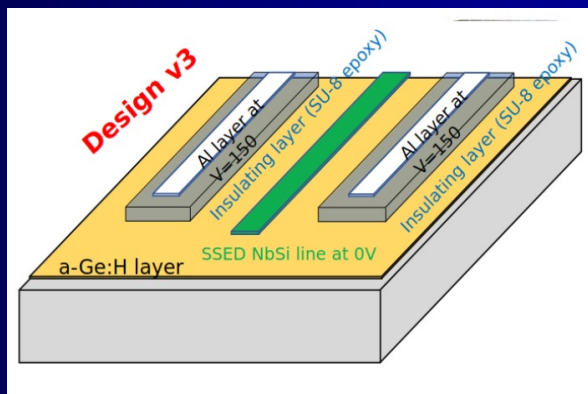
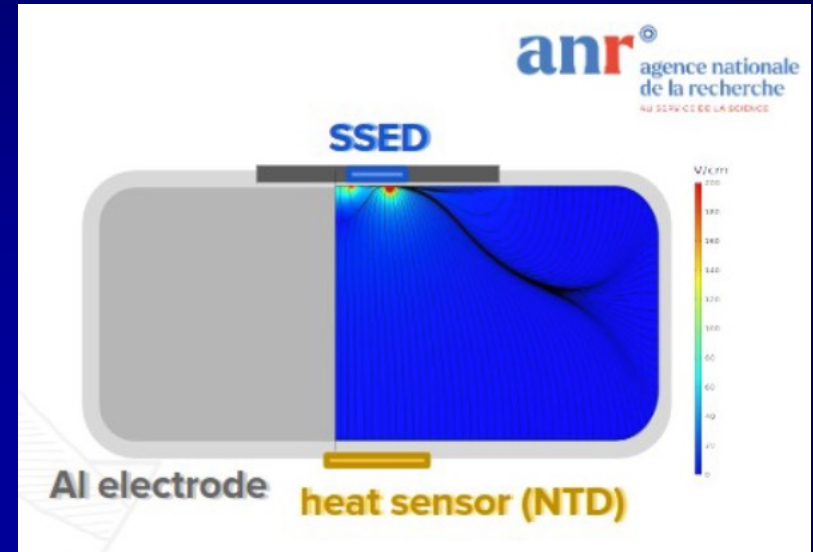
- Augmenter la sensibilité pour la détection des signaux faibles
- Elargir la bande passant à basses fréquences
- Réduire le bruit quantique des systèmes de détection

Axes de R&D:

- Miroir à faible perte
- Squeezing de la lumière
- Détection de charge et photon unique

CRYOSEL

- Reduction de « Heat Only » → étiquette de production de charge
- Conserver la thermistance NTD en tant que capteur de chaleur fiable
- Nouveau petit capteur SSED:
 - les lignes de champ sont contraintes vers le SSED → création de "hotspot" de phonons NTL à proximité directe des capteurs
- 40g détecteur Ge, $\sigma_{\text{phonons}}=20$ eV, 200V bias



[Credits: Stefanos Manieros]

Circuits intégrés et DAQ

La micro-electronique et DAQ sont essentiels à la conception des détecteurs

Défis pour le futur:

- Augmentation de l'électronique numérique: données et algorithmes de décision intelligentes
- Evolution rapide du domaine, porté par les besoins de l'industrie
- Electronique plus rapide et augmentation des voies
- Composants résistants aux radiations

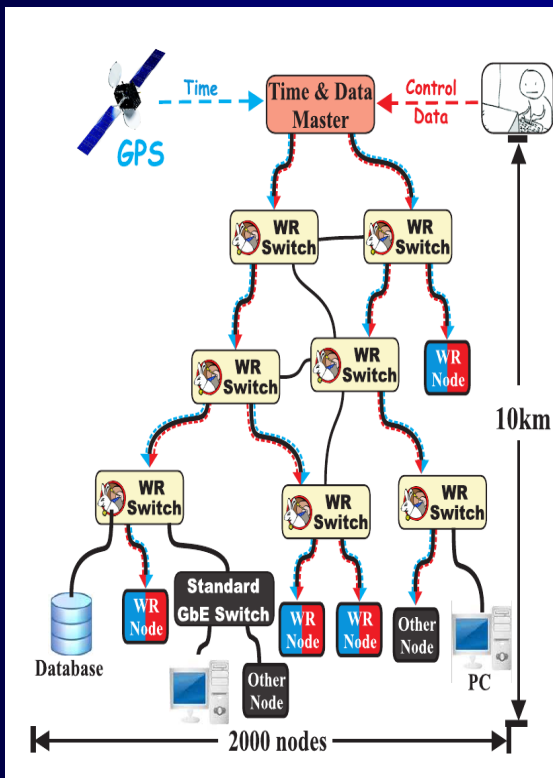
Axes de R&D:

- Amélioration de la réponse temporelle
- Réseaux de neurones embarqués sur les FPGAs
- Algorithmes plus complexes et flexibles.

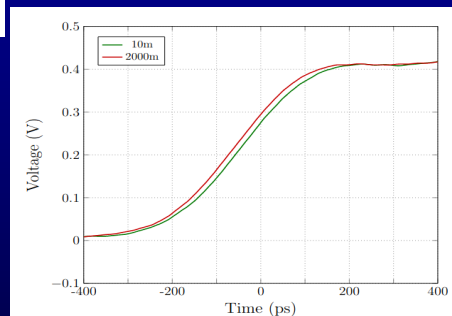


White Rabbit

Le White Rabbit permet une synchronisation du système sur une longue distance (jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres) avec une grande stabilité sur fibres optiques



- Horloge et étiquetage temporel (TAI) avec une précision inférieure à la ns jusqu'à des milliers de nœuds.
- C'est une extension d'Ethernet qui permet :
 - Mode synchrone
 - Latence de routage déterministe
- Performances d'un ordre de grandeur supérieures à celles d'un système GPS
- Les évolutions actuelles permettent d'atteindre le ps
- Les développements futurs (IJCLab et observatoire de Paris) visent à atteindre des performances au fs



System	accuracy	Note
GPS	10ns -200ns	Propagation in non-stationary disruptive environment. Problem of the multi-way.
GPS-IPPP	2 – 3 ns	Resolution of phase ambiguities using RIMEX data. More complex implementation
On the shelf WR switch without calibration	500ps - 100ns	Tested with WR switch SAFRAN in master configuration
On the shelf WR switch with calibration	200ps – 2 ns	Tested with WR switch SAFRAN in master configuration
IDROGEN enhanced WR node	13 ps	Tested with WR switch SAFRAN in grand master configuration
IDROGEN enhanced WR node	1 ps	2 IDROGEN boards on the WR switch configured in Grand Master and synchronized by T+ REFIMEVE fiber from Paris Observatory (SYRTE)
In development : IDROGEN & external functions	< ps	Aim of T+REFIMEVE

[Credits: Daniel Charlet]

Mécanique des détecteurs

Défis pour le futur:

- Besoin de stabilité en température ou de refroidissement des détecteurs
- Miniaturisation des capteurs
- Augmentation du nombre de voies et câblage associé (intégration des détecteurs)
- Réduction du bilan matière

Axes de R&D:

- Amélioration des modèles numériques pour la simulation
- Augmentation de la puissance de calcul (serveur ou utilisation d'IA)
- Réduction des temps de conception
- Utilisation de nouveaux matériaux, impression 3D
- Simulation numérique de l'intégration des détecteurs

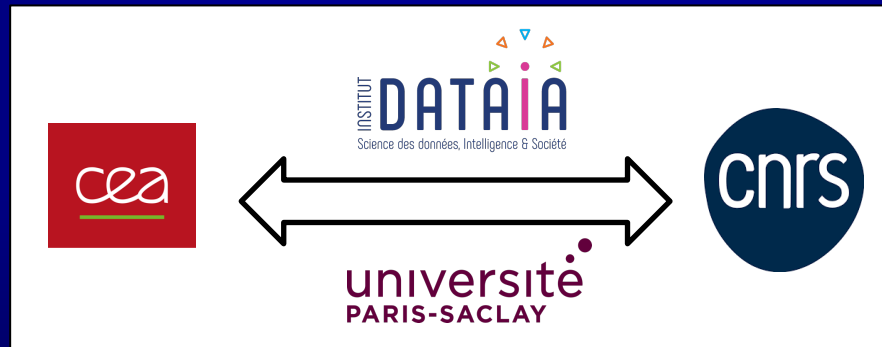
IA en ingénierie Mécanique

[Credits: Julien Bettane]

Conception et simulation avancées

Objectifs:

1. Veille technologique, sensibilisation des acteurs sur l'utilisation de l'IA dans la conception et la simulation mécanique
2. Etat de l'art, présentation par les industriels des recherches et de l'utilisation de l'IA en ingénierie mécanique
3. Créer un groupe autour des questions d'IA en ingénierie mécanique, faciliter les échanges, organisation d'évènements
4. Partenariat industriel-académique, inspirer de nouvelles idées et collaborations, stagiaires



*Réflexion en cours
sur l'organisation*

Start up:
DESSIA...

Industriels:
Airbus, EDF, Safran, Renault, Dassault ...

Logiciels:
Dassault, ANSYS, SIEMENS, Autodesk...

Conclusions

Les laboratoires de P2I sont impliqués dans la plupart des grands projets des roadmaps européennes avec en particulier des développements ambitieux de détecteurs

- Maintenir une forte activité de R&D sur les détecteurs afin de garder des connaissances de pointe et pousser les technologies associées au-delà de l'état de l'art
- Favoriser les échanges de savoir-faire entre laboratoires et l'émergence des idées technologiques innovantes
- Assurer un soutien technique qualifié pour la R&D des détecteurs via des stages, des doctorants et des postdoctorants ainsi que des ressources financières adéquates.