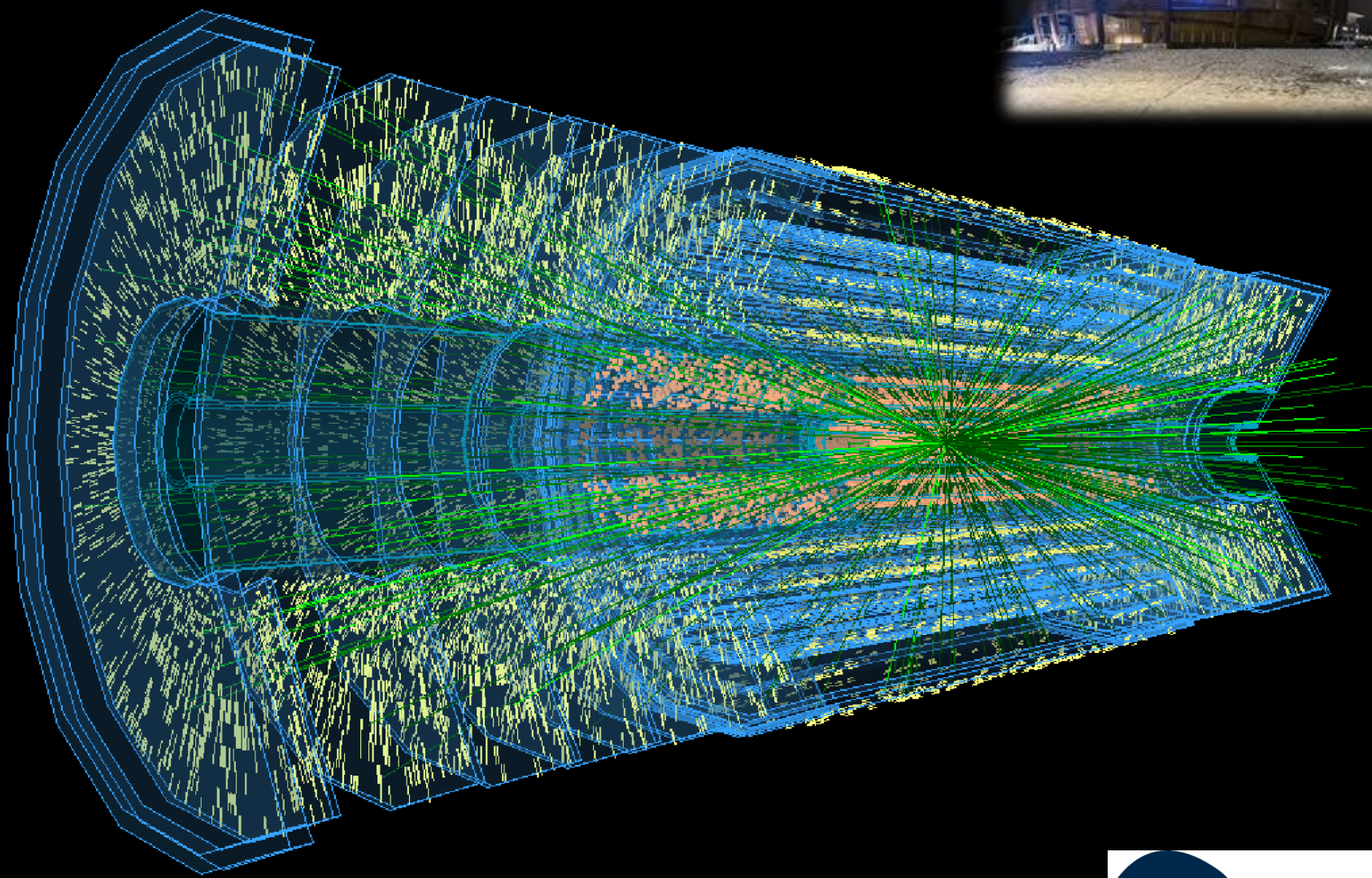




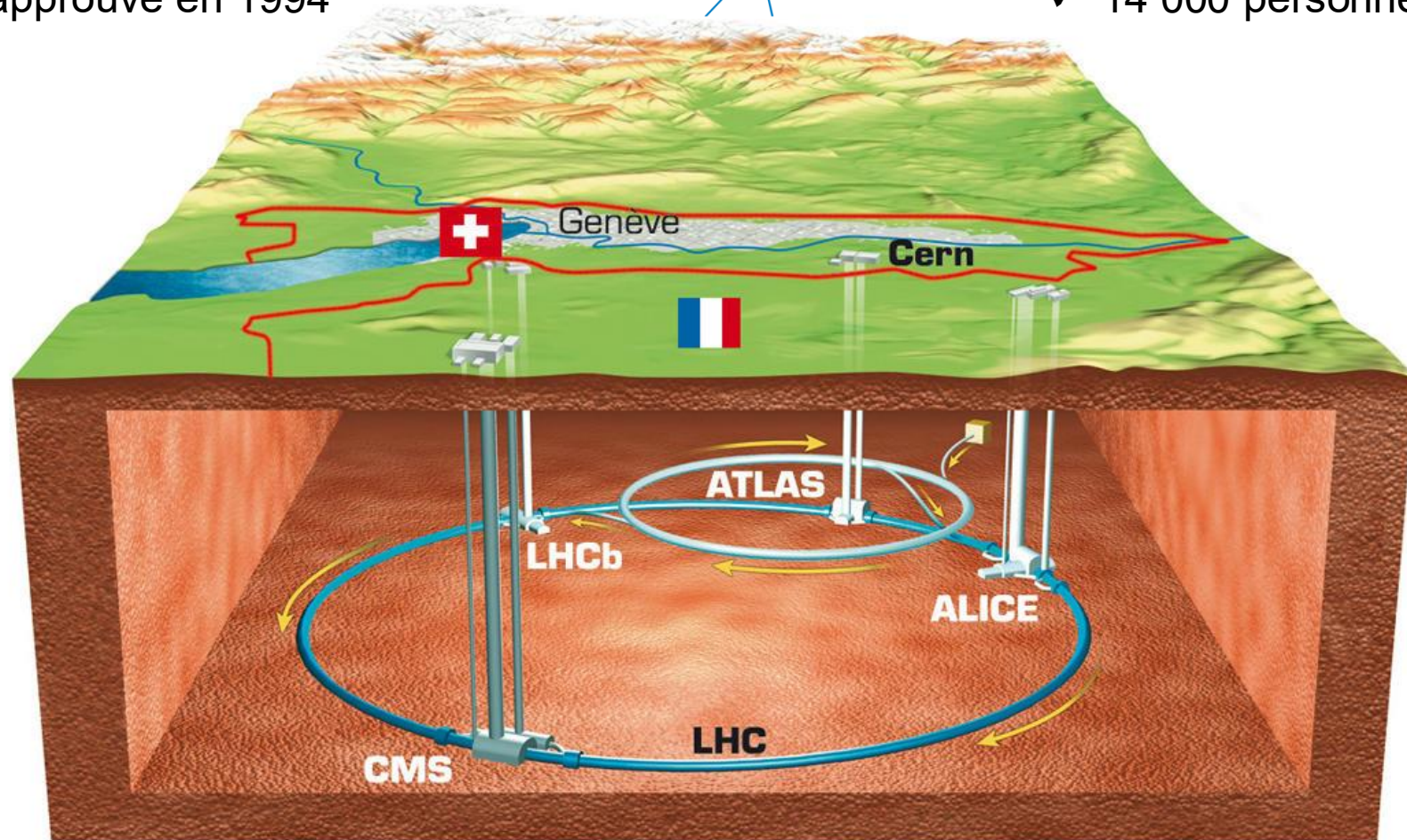
Eric Chabert
DS HL-LHC

Le LHC



- ✓ Plus de 15 ans de R&D – construction
- ✓ Projet approuvé en 1994

- ✓ 4 principales expériences
- ✓ 14 000 personnes impliquées



- ✓ Démarrage le 10/09/2008
- ✓ 3 périodes de prises de données
- ✓ Fin le 29/06/2026



- ✓ 10 laboratoires IN2P3
- ✓ Presque 300 personnes impliquées
- ✓ De nombreuses responsabilités

Production scientifique

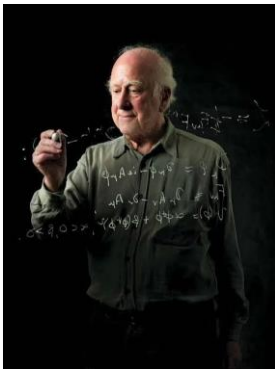
Publication de plus de 4500 articles scientifiques



Liste restrictive de résultats ...

Plasma de quarks et gluons

- État de l'univers μ s après le big bang
- ALICE a montré que cela se comportait comme un **liquide presque parfait**

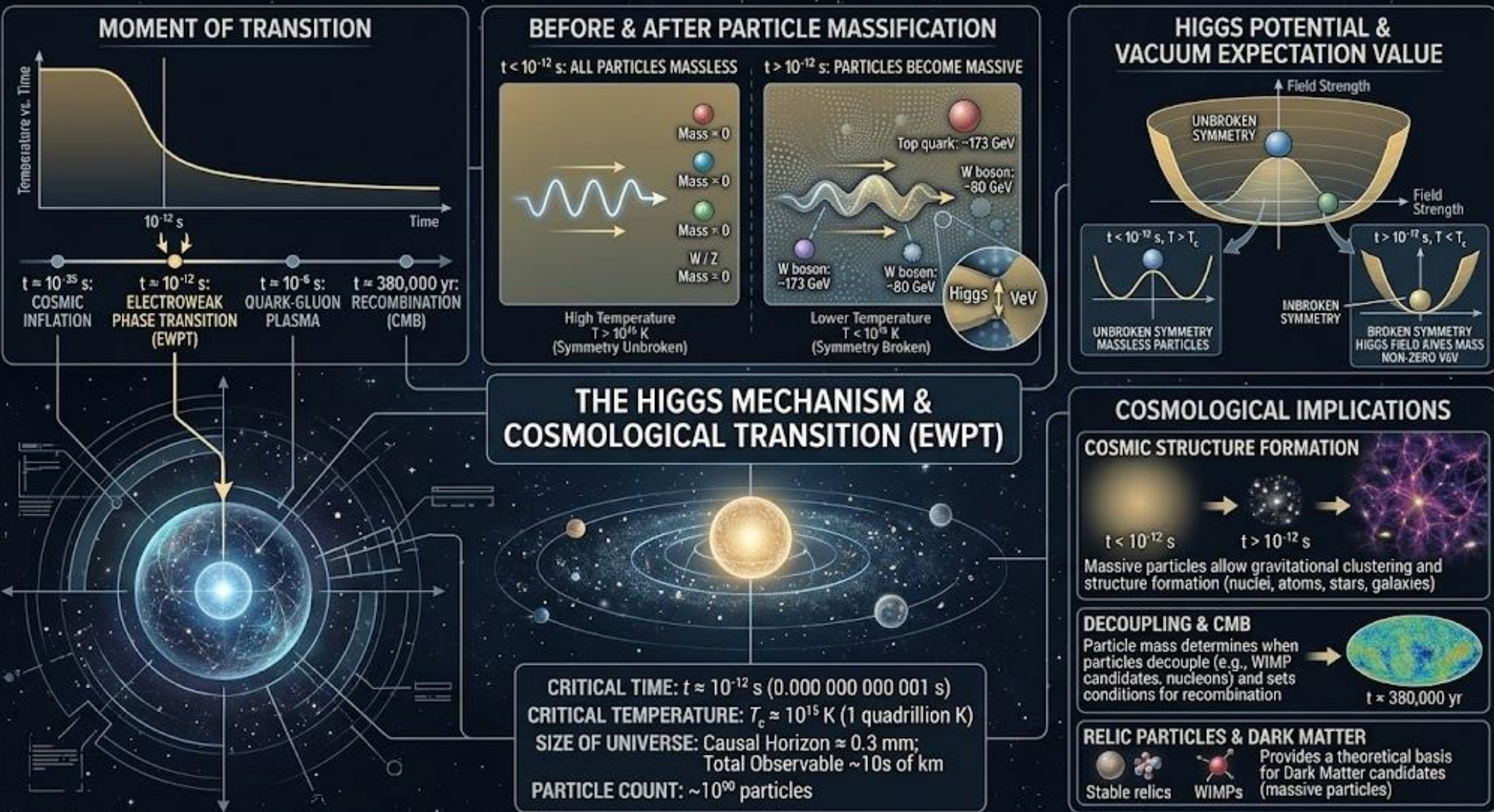


Découverte de 76 **nouveaux hadrons**
Découverte de **tétraquarks et pentaquarks**

Découverte puis étude du **boson de Higgs**
Découverte de **processus très rares**

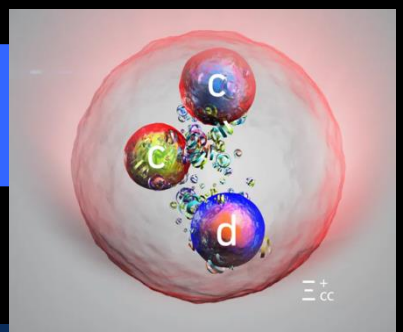


LHC highlights: ATLAS & CMS



AI-based

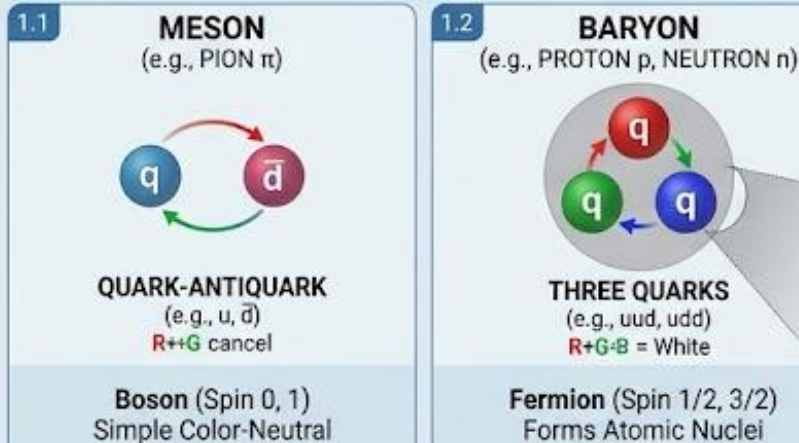
LHC highlights: LHCb



AI-based

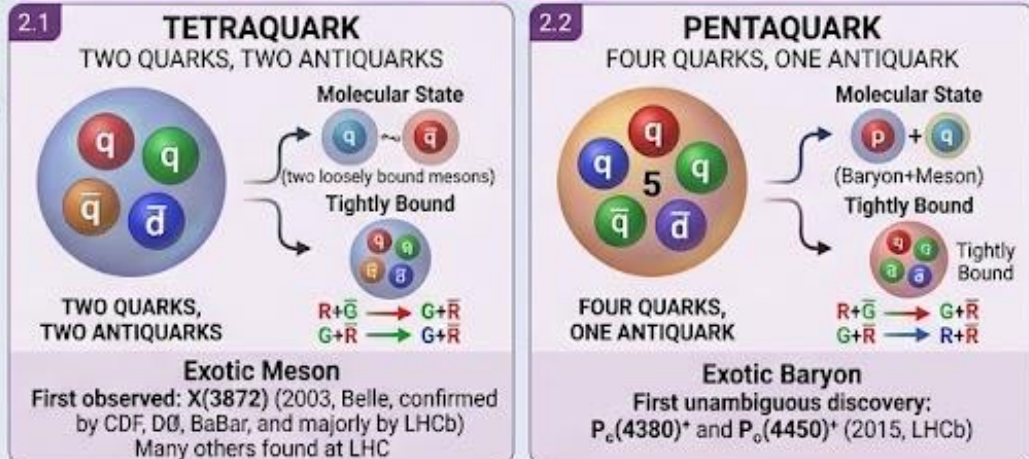
INTRODUCTION TO HADRONS (QUARK-BASED MATTER) · TETRAQUARKS

CONVENTIONAL HADRONS



THEORETICALLY
ALLOWED by
QCD, but elusive
until recently

EXOTIC HADRONS: BEYOND THE STANDARD RECIPE

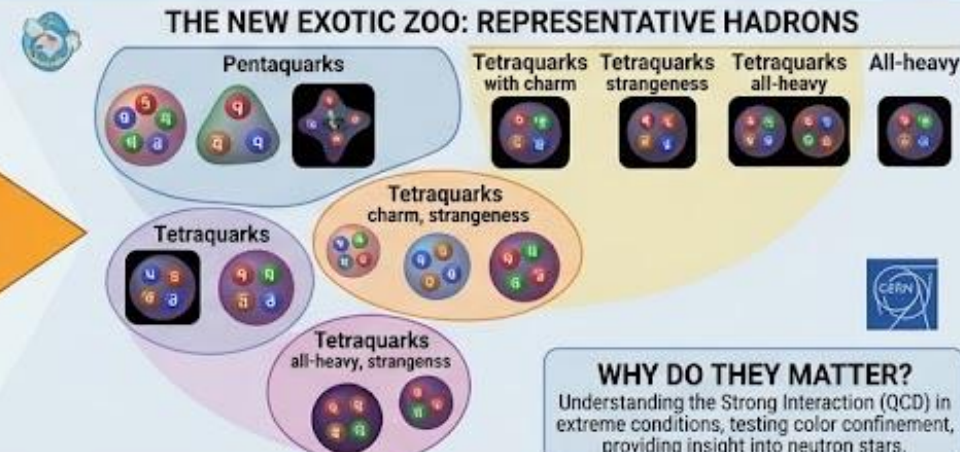


HIGHLIGHTS FROM LHC DISCOVERIES (PRIMARILY LHCb COLLABORATION)

TIMELINE OF EXOTIC HADRON OBSERVATIONS AT LHC



THE NEW EXOTIC ZOO: REPRESENTATIVE HADRONS

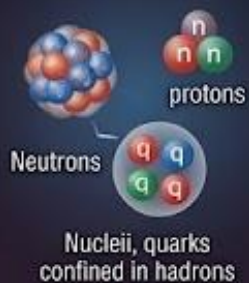


LHC highlights: ALICE

ALICE RESULTS: UNRAVELING THE QUARK-GLUON PLASMA (QGP)

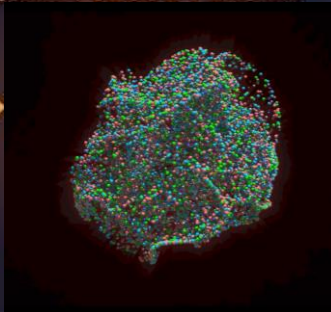
1. WHAT IS A QUARK-GLUON PLASMA (QGP)?

NORMAL MATTER



MELTING

QUARK-GLUON PLASMA



A state of matter where quarks and gluons, usually confined, are "deconfined" due to extreme temperature and density.

They move freely over a volume larger than a proton.

It's a "Strongly Coupled Liquid," not an ideal gas.

2. ALICE MEASUREMENT: SPEED OF SOUND (c_s) AND PERFECT FLUIDITY

Measure: 49% c

Perfect fluid: 58% c

QGP exhibits the lowest specific viscosity ever measured, approaching a "perfect fluid".

3. FORMATION TEMPERATURE AND UNIVERSE TIMELINE

QGP FORMATION TEMPERATURE



$\approx 100,000$ times hotter than the core of the Sun

≈ 2 to 3 Trillion Degrees Celsius
(2 to $3 \times 10^{12} \text{ }^\circ\text{C}$)

$\approx 150 - 160 \text{ MeV}$

THE EARLY UNIVERSE WAS A QGP



≈ 1 MICROSECOND (10^{-6} s)

THE QGP UNIVERSE

QUARK-GLUON PLASMA PHASE



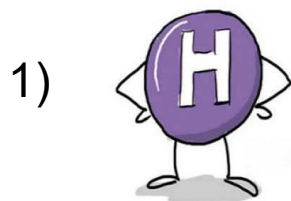
Universe cools and transitions from QGP to Hadronic matter at $t \approx 10$ to $30 \text{ } \mu\text{s}$

ALICE EXPERIMENT AT THE LHC



AI-based

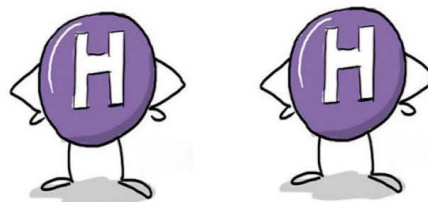
Une question de probabilité



2)



4)



a) 1 chance sur 19 millions

b) 1 chance sur 139 millions

c) 1 chance sur 1 800 millions

d) 1 chance sur 2 800 000 millions



Les collisions proton-proton : une **roulette russe** avec des probabilités très déséquilibrées

Chaque collision de deux protons au LHC est comme tirer le coup de feu d'une roulette russe : on ne sait pas quel résultat on va obtenir, mais certains sont bien plus probables que d'autres.



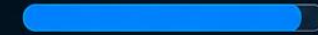
Comme dans une roulette russe, on ne peut pas prédire le résultat d'une collision, mais on sait que certaines « cases » sont beaucoup plus probables que d'autres



Quarks

Très probables
(la plupart des résultats)

99 %



Bosons W et Z

Moins probables
(quelques résultats seulement)

0,0003 %



Higgs

Extrêmement rare
(un seul résultat sur des millions)

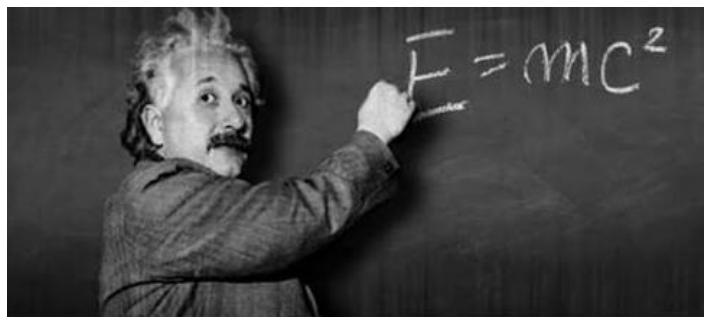
0,00000006 %



Même si le Higgs est rare,
il fait partie du jeu !

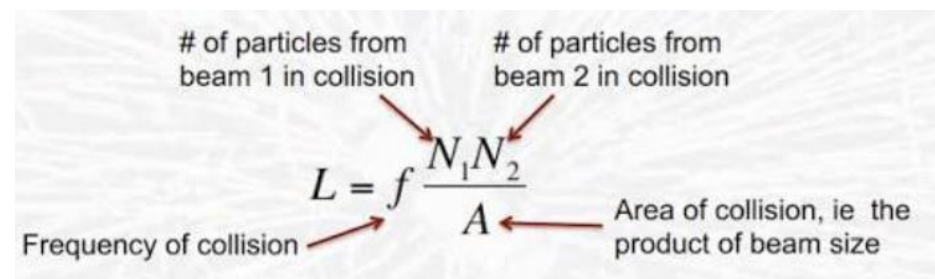
Les ingrédients du succès

Énergie



Luminosité

$$N_{collisions} = L \times \sigma$$



The diagram shows the formula $L = f \frac{N_1 N_2}{A}$ with arrows pointing to each term and explanatory text:

- N_1 : # of particles from beam 1 in collision
- N_2 : # of particles from beam 2 in collision
- f : Frequency of collision
- A : Area of collision, ie the product of beam size

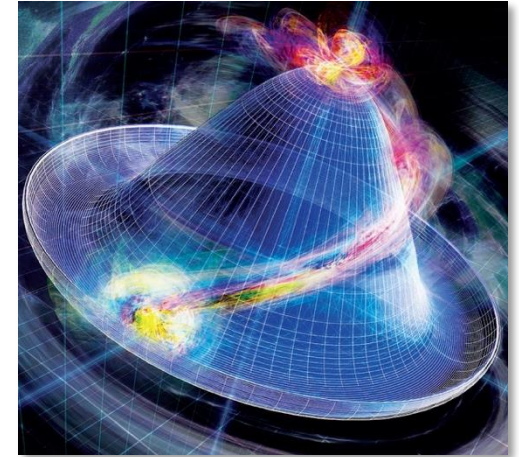
- ✓ Produire des particules très "massives"
- ✓ Tester les lois de la physique à haute énergie

- ✓ Améliorer les précisions expérimentales
- ✓ Découvrir des phénomènes rares

Pourquoi une phase à “haute luminosité” ?

Boson de Higgs

- Étendre nos connaissances
- Confirmer la **nature de boson de Higgs**
- Découvrir le phénomène de production par paires



Tests de la théorie

- Améliorer la précision sur nos mesures
- Tester le modèle standard à haute énergie

Nouveaux phénomènes

- Accroître nos chances de faire une nouvelle **découverte**
- **Pas de collisions aussi énergétiques avant 2070 ...**

Projets ambitieux



Objectifs scientifiques



Défis technologiques



Complexité et taille des projets



Engagement fort de l'institut

→ valorisation / communication

Calendrier



Phase préparatoire

- 2013: Priorité européenne
- 2016: Projet approuvé au CERN
- R&D
- Construction (←)



Opération

- 2030: redémarrage
- 2030-2033: run 4
- 2034-2035: arrêt
- 2036-2041: run 5

ATLAS & CMS

- ✓ Nombreux sous-détecteurs mis à jour ou remplacés
- ✓ 10 laboratoires impliqués
- ✓ Nombreux personnels scientifiques et techniques
- ✓ Activités en cours dans les laboratoires (production)
- ✓ Activités au CERN en cours et surtout à venir



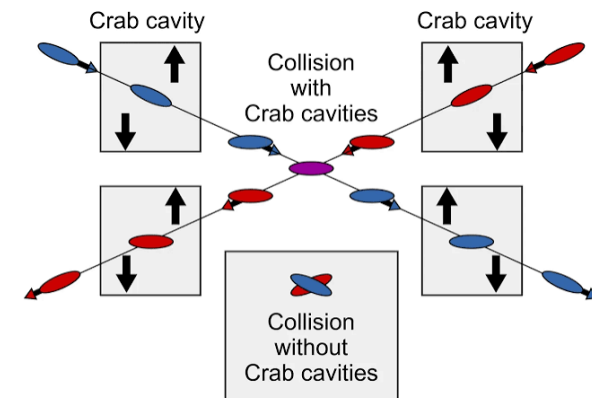
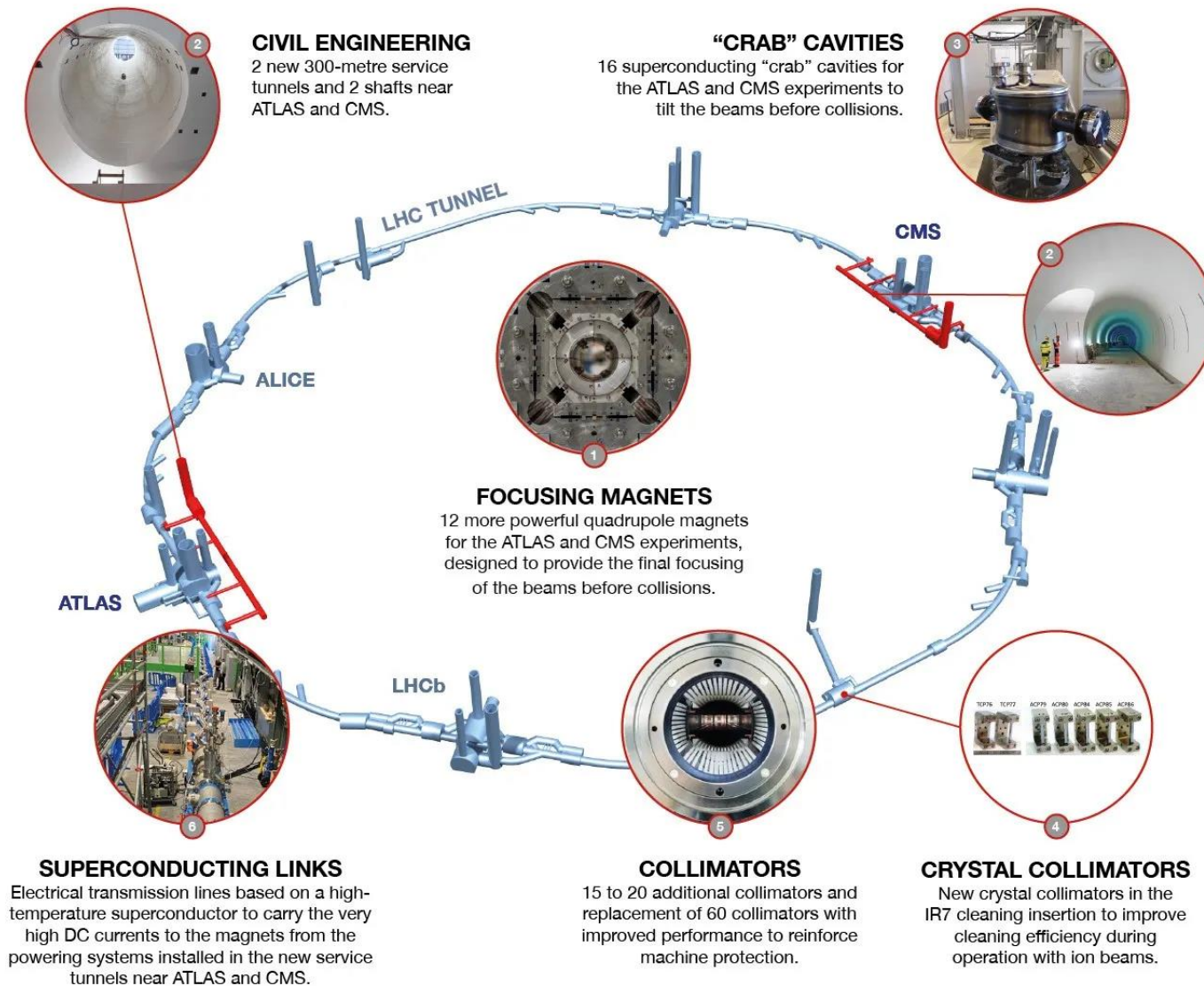
ALICE & LHCb

- ✓ Principale jouvence pour le run 5
- ✓ Pas encore d'engagement officiel

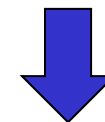


Upgrade de l'accélérateur

NEW TECHNOLOGIES FOR THE HIGH-LUMINOSITY LHC



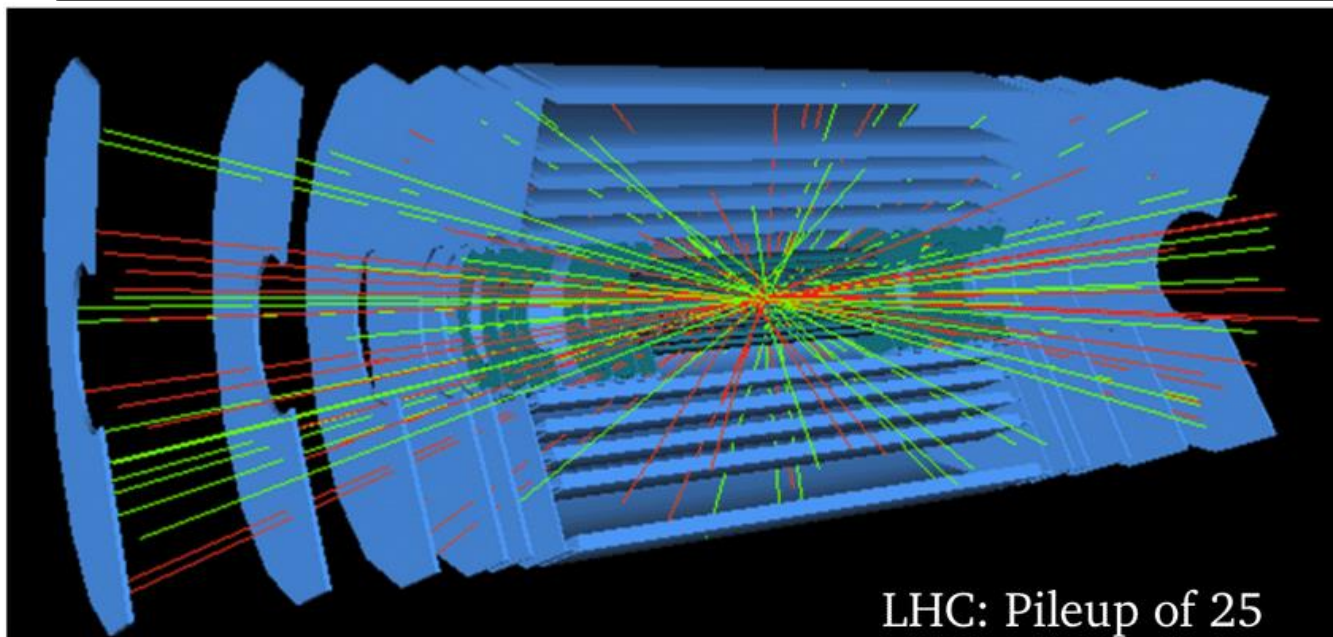
$$\sim 16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m} \times 7.5 \text{ cm}$$



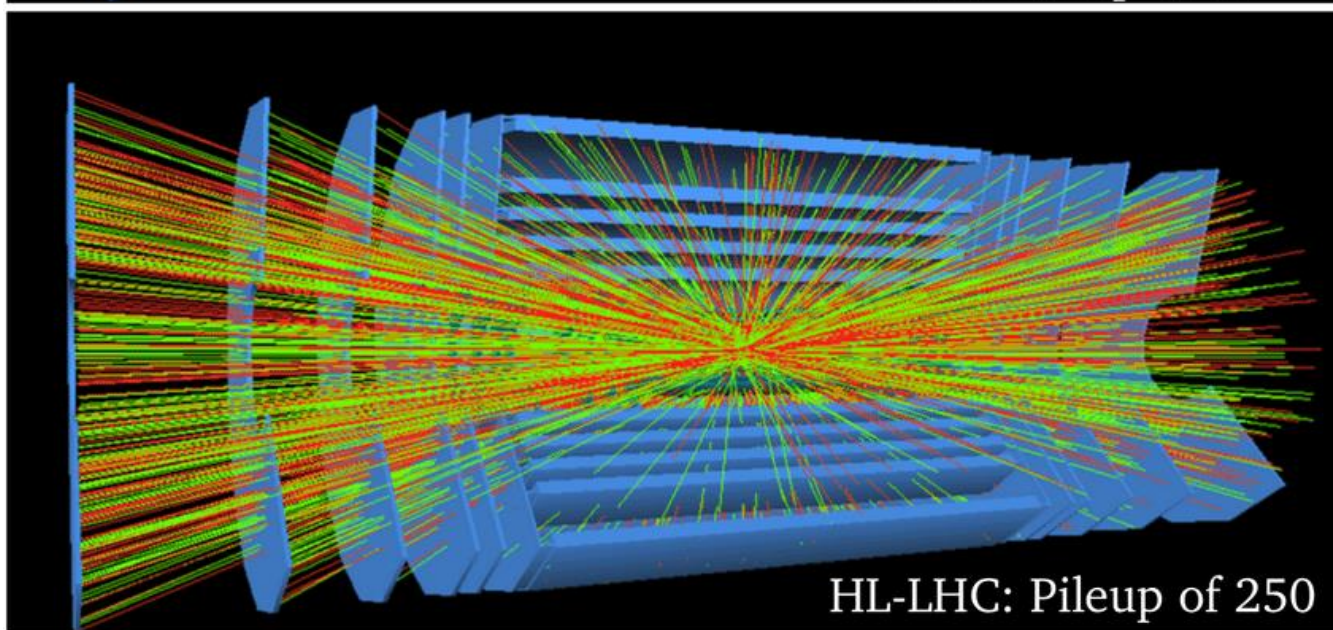
$$\sim 7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m} \times 7.5 \text{ cm}$$

CERN March 2022

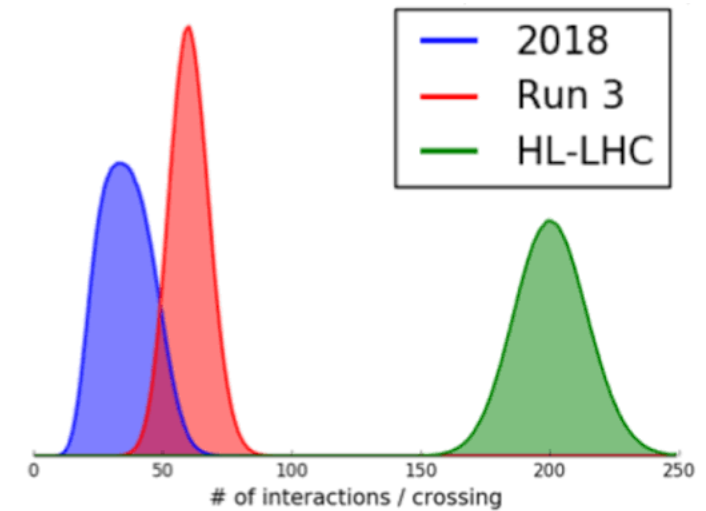
Collisions simultanées = empilement



LHC: Pileup of 25



HL-LHC: Pileup of 250



Augmentation du nombre **moyen** de collisions simultanées

- ✓ 140 en 2030
- ✓ 200 en 2036

Défi:

Identifier la collision d'intérêt parmi l'ensemble



Défis instrumentaux

HL-LHC : des détecteurs qui voient l'infiniment petit

Au HL-LHC, des faisceaux de protons se percutent à des vitesses proches de celle de la lumière. Les détecteurs de physique des particules analysent les milliers de milliards de collisions pour reconstituer les particules produites.

Comme un appareil photo...
mais à l'échelle de l'infiniment petit
et de l'infiniment rapide !

proton
→

←
proton

Les détecteurs du HL-LHC

Des couches de capteurs qui mesurent :



Les trajectoires des particules
(avec une très grande précision)



Leur énergie
(électromagnétique et hadronique)



Les muons
(les plus pénétrants)



Ensemble, ils offrent une image complète de chaque collision, comme un appareil photo qui capte une scène en 3D, en couleur, et dans le temps.



Résolution spatiale : comme un zoom

Les détecteurs du HL-LHC peuvent distinguer des détails à l'échelle de quelques milliardièmes de mètre (10^{-18} m).

Zoom optique

On rapproche physiquement l'objectif.



Le zoom optique garde la qualité de l'image.

Zoom numérique

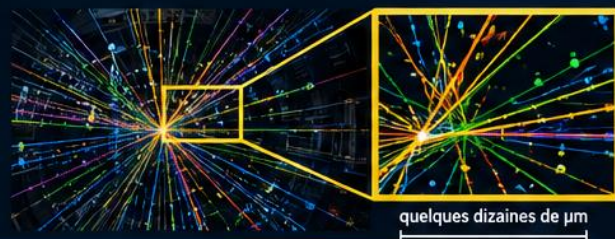
On agrandit l'image par traitement logiciel. La qualité se dégrade.



Le zoom numérique peut être flou et faire apparaître des pixels.

Dans le détecteur du HL-LHC

Une résolution spatiale d'environ quelques dizaines de micromètres (10^{-5} m) pour les trajectoires, et encore meilleure pour certaines mesures (ex. vertex).



quelques dizaines de μm



Résolution temporelle : comme la HD et le slow motion

Les détecteurs du HL-LHC mesurent des événements extrêmement rapides, avec une précision de l'ordre de la picoseconde (10^{-12} s), voire mieux.

Vidéo HD

Une image nette, riche en détails, comme une vidéo en haute définition.



SD

HD

Slow motion

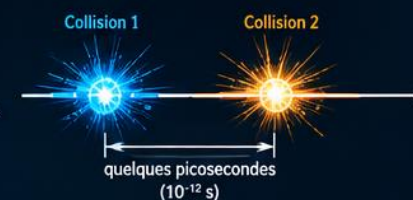
On peut ralentir le temps pour voir des phénomènes trop rapides à l'œil nu.



Des milliers d'images par seconde...
au lieu d'une seule !

Dans le HL-LHC

Une résolution temporelle de l'ordre de la picoseconde (10^{-12} s), ce qui permet de séparer des collisions très proches dans le temps.



quelques picosecondes
(10^{-12} s)



C'est **1 000 fois**
plus rapide qu'une
vidéo en haute définition
classique !

AI-based

HL-LHC — PLUS DE DÉTAILS / PLUS DE PRÉCISION / UNE VISION PLUS COMPLÈTE DE L'UNIVERS

Collisions → radiations

Radiation Effects on Detectors and Electronics

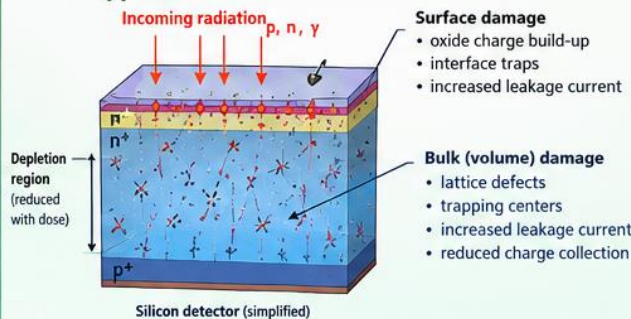
High-energy particles and photons can damage both the sensitive volume (sensor) and the electronics, through different mechanisms and with different consequences.



1. Effect on the Sensitive Volume

(e.g. silicon depletion, crystal transparency, ...)

What happens?



Examples of effects

Silicon depletion

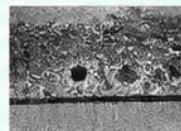
- effective doping changes
- depletion voltage increases
- reduced active volume

Crystal transparency (e.g. scintillators)



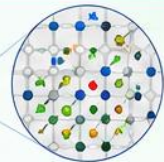
- color centers
- reduced light output
- light scattering

Surface damage



- oxide charge & interface traps (SEM/TEM)
- higher leakage current
- increased noise
- altered surface properties

Silicon lattice



Volume defects (in the bulk)

- vacancy
- interstitial
- complex defect

Surface defects (at interfaces)

- fixed oxide charge
- interface trap



2. Effect on the Electronics

(NIEL & TID and SEU)

Radiation effects mechanisms

NIEL (Non-Ionizing Energy Loss)

- displaces atoms in the lattice creates defects
- affects transistors (mobility, threshold, leakage)
- affects interconnects

TID (Total Ionizing Dose)

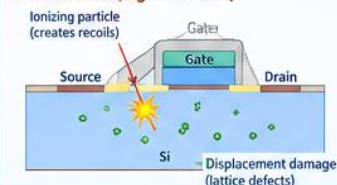
- ionization of oxides and dielectrics
- charge trapping
- threshold voltage shifts
- increased leakage currents

SEU (Single Event Upset)

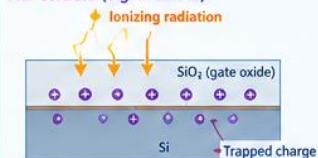
- charge collection by a single particle
- flips a bit in memory or logic
- can cause latch-up (in some cases)

Effects in the electronics

NIEL effects (e.g. in CMOS)



TID effects (e.g. in oxides)



SEU effects (e.g. in memory/logic)



- lower carrier mobility
- higher threshold voltage
- increased leakage current
- reduced performance (speed, gain, noise)

- oxide charge build-up
- interface trap generation
- threshold voltage shift
- increased leakage current
- parametric drift

- data corruption
- logic upset
- possible latch-up (at high LET)

How it compares to other environments

The same types of effects occur in space and in high-radiation places on Earth, but with different particle types and dose levels.



Space (satellites, deep space)

- high-energy protons, electrons, heavy ions
- significant TID, NIEL and SEU
- continuous low flux + occasional solar events



High altitude (aviation)

- increased cosmic ray flux
- mainly SEU (at altitude)
- lower TID/NIEL than space



Ground (accelerators, nuclear facilities)

- high particle flux (protons, neutrons, pions)
- important NIEL and TID
- SEU possible (depending on environment)



Medical (radiotherapy, imaging)

- high dose rate (X-rays / gamma)
- mainly TID
- limited NIEL and SEU (unless high-energy beams)



Natural (terrestrial, sea level)

- low background radiation
- negligible compared to space/accelerators
- long-term TID (very small)

Relative impact (typical)

Environment	TID	NIEL	SEU	Main particles
Space	●●●	●●●	●●●	protons, electrons, heavy ions
High altitude	●●○	●○	●●○	cosmic rays (p, heavy ions)
Accelerators	●●○	●●●	●●○	p, n, π, heavy ions
Medical	●●●	●○	●○	X-rays, gamma
Natural	●○	●○	○	ambient (low energy)

●●● high ●● moderate ○ low



In summary



The **sensitive volume** suffers from structure and optical degradation, reducing detection efficiency and performance.



The **electronics** suffer from NIEL (displacement damage), TID (charge build-up) and SEU (single event effects), affecting functionality, reliability and lifetime.

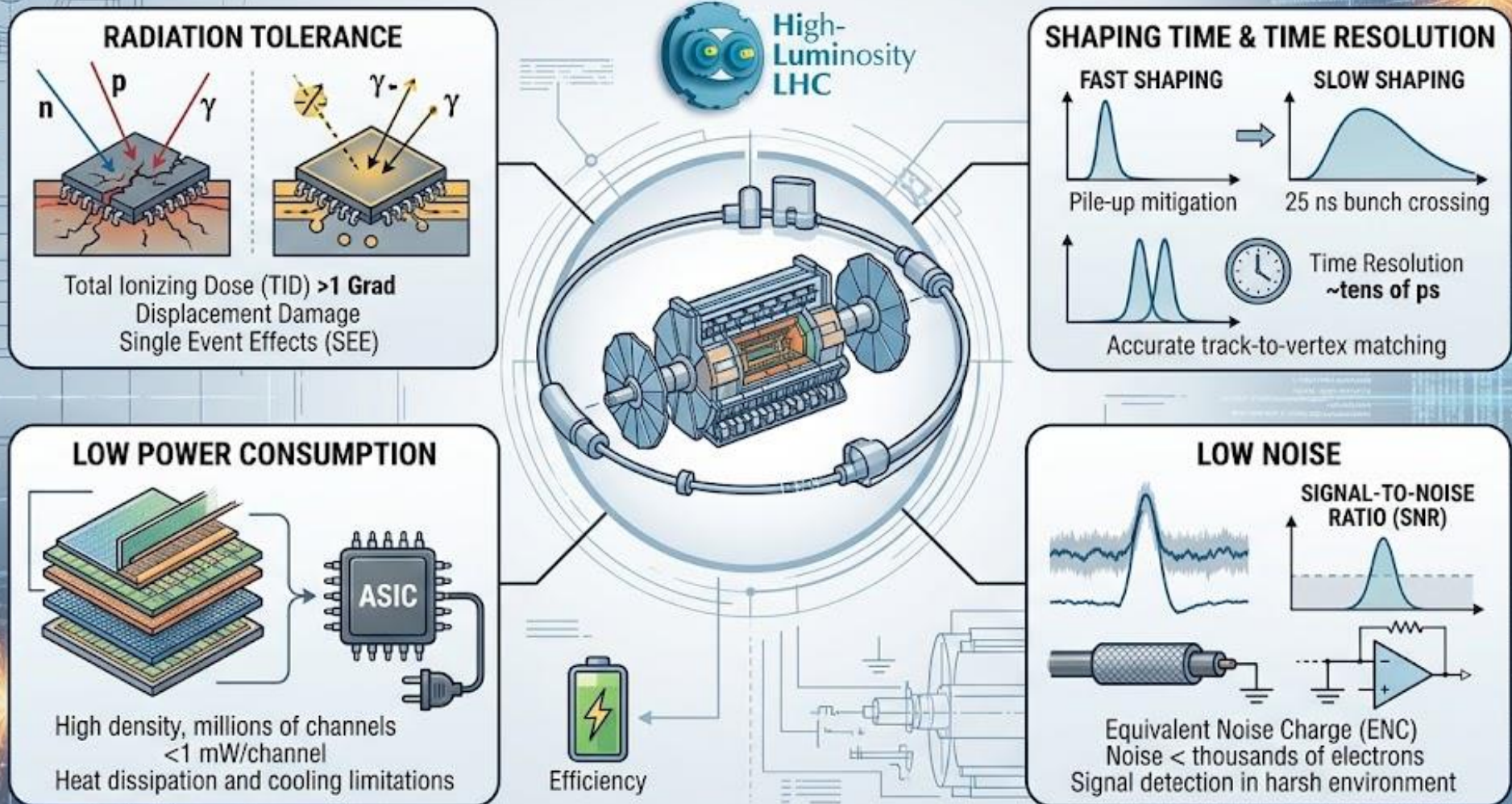


Space and other high-radiation environments expose systems to similar effects, but with different particles, doses and dynamics.

Designing for radiation hardness is essential for reliable operation in all these environments.

Défis sur l'électronique

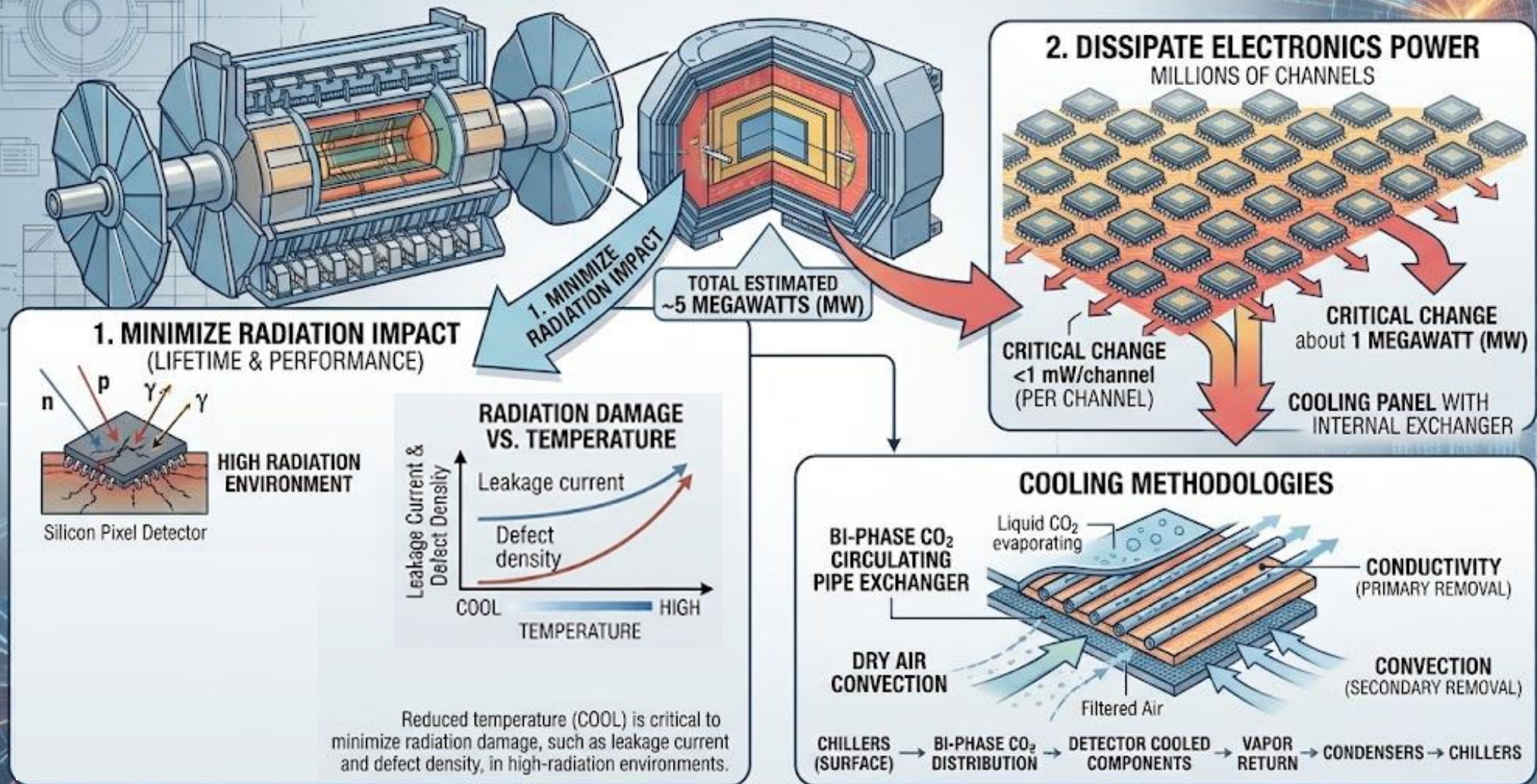
ELECTRONICS CONSTRAINTS AT HL-LHC



AI-based

Défis électriques et thermiques

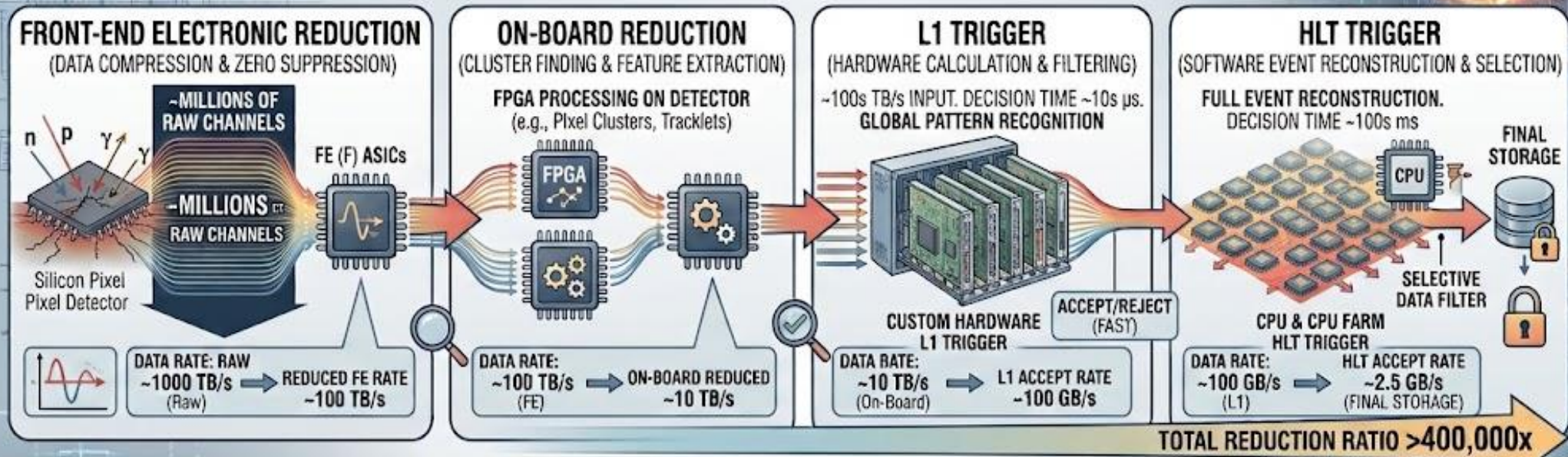
HL-LHC EXPERIMENT DETECTOR



AI-based

Big data: les défis

DATA RATE REDUCTION CHAIN AT HL-LHC AND ANALOGIES



TEXT SUMMARY ANALOGY

Analogy: Condensing a massive unread text into a single, highly refined summary. Raw text is processed for structure (Ch. 1), key plot points, and then a precise single-paragraph conclusion is selected.



RAW DETECTOR DATA
(THE FULL UNABRIDGED TEXT)



CONDENSED VERSION
(CLUSTER FINDING:
CHAPTER OUTLINE & KEY TERMS)



BULLET POINTS
(L1 FILTERING: ESSENTIAL
PLOT POINTS & CHARACTERS)



HIGH-LEVEL SUMMARY
(HLT SELECTION: THE
CRITICAL TAKEAWAY & INSIGHT)

VISUAL SIMPLIFICATION ANALOGY

Analogy: Condensing a high-definition detailed picture of a scene into a clean, minimalist infographic sketch. Raw visual detail is processed to identify key shapes, objects, and relationships, and then a precise simplified icon-based illustration is selected.

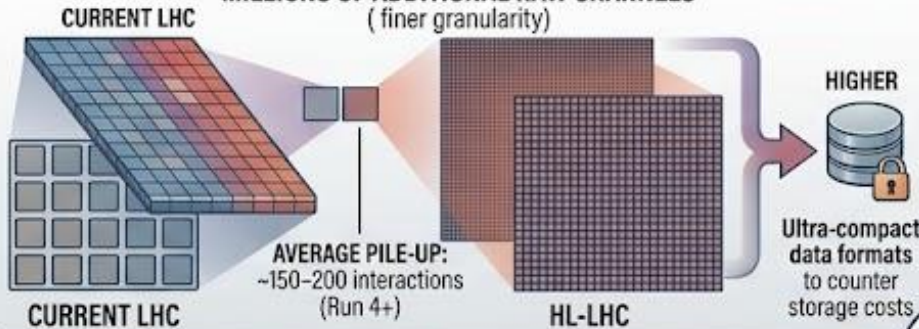


Défis pour l'informatique

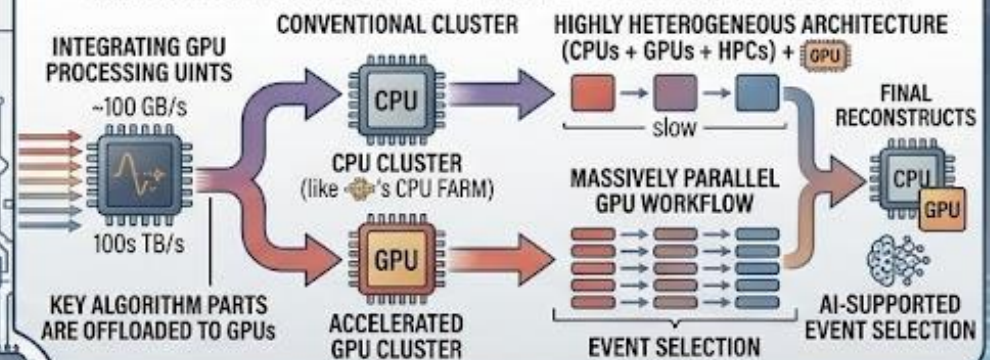
COMPUTING CHALLENGES FOR THE HIGH-LUMINOSITY LHC (HL-LHC)

DETECTOR: HIGHER CHANNEL DENSITY

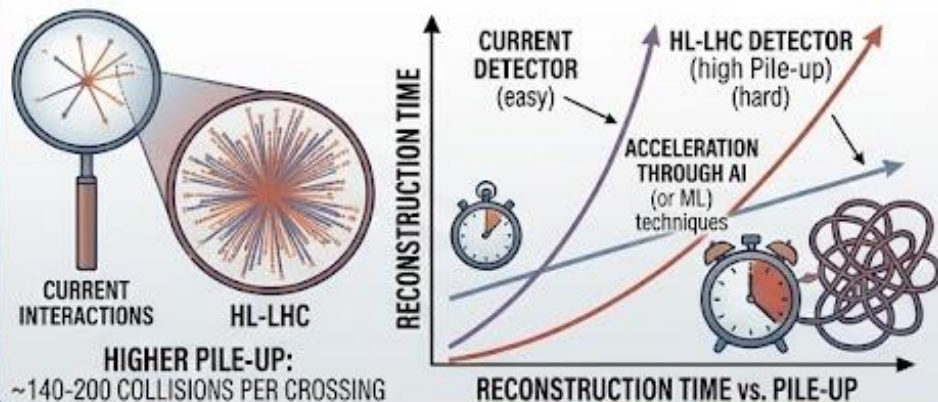
MILLIONS OF ADDITIONAL RAW CHANNELS
(finer granularity)



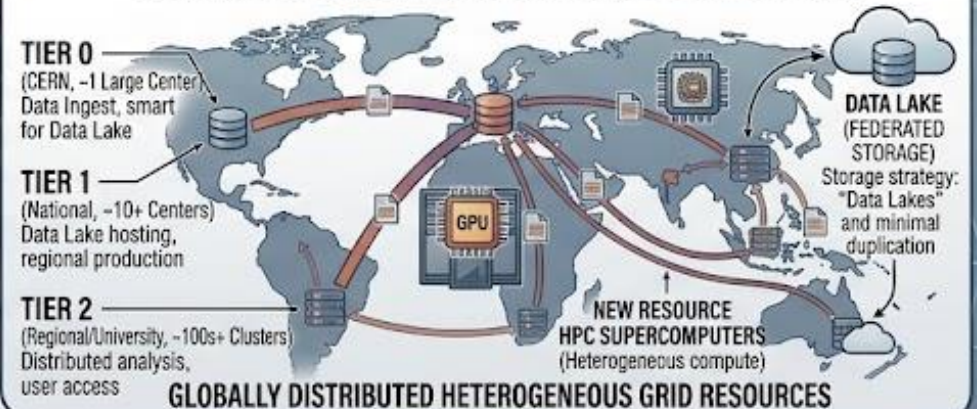
RECONSTRUCTION: GPU ACCELERATION INCLUSION



ALGORITHMS: PILE-UP SCALING CHALLENGE

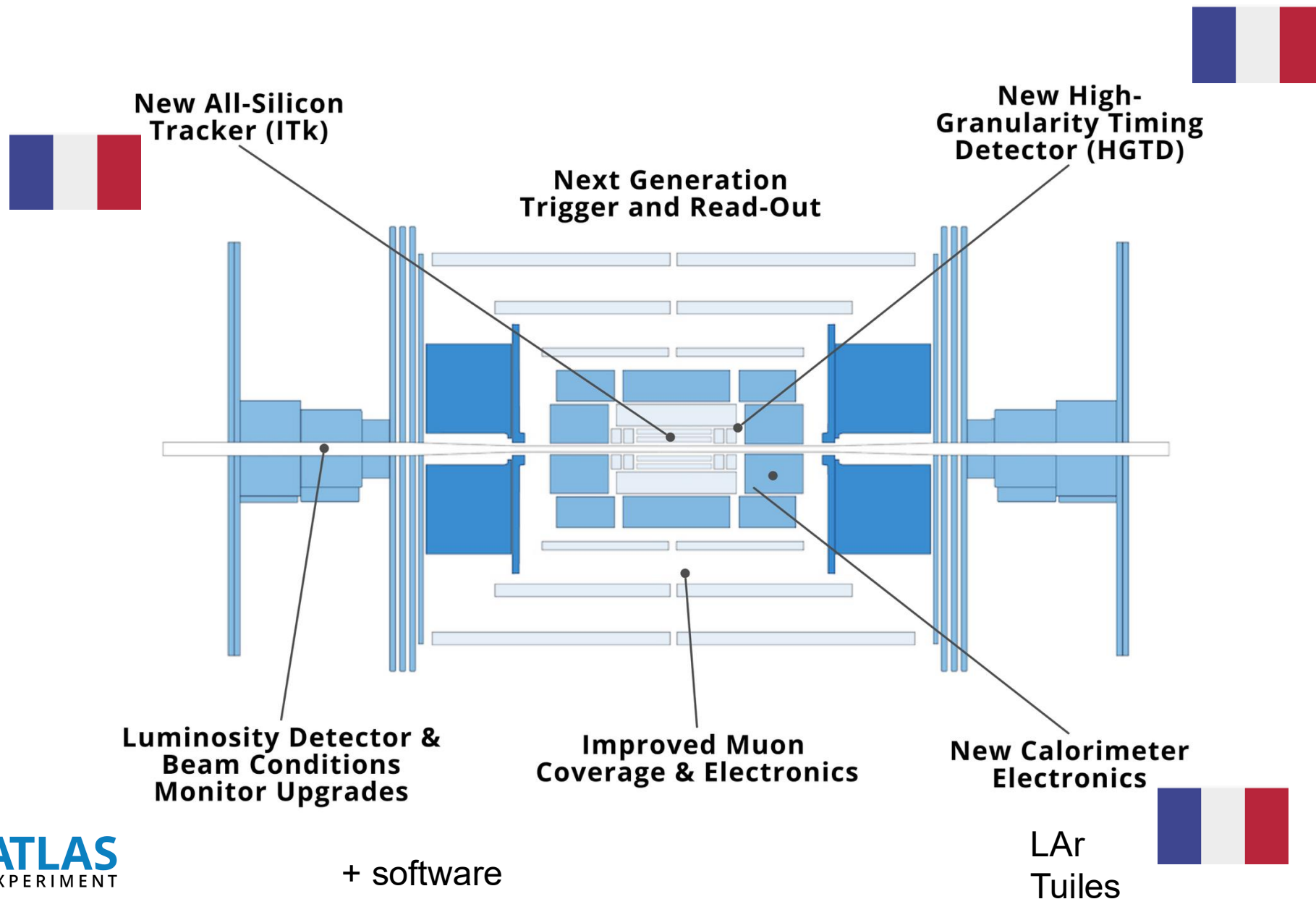


DISTRIBUTION: THE HL-LHC GRID STRUCTURE

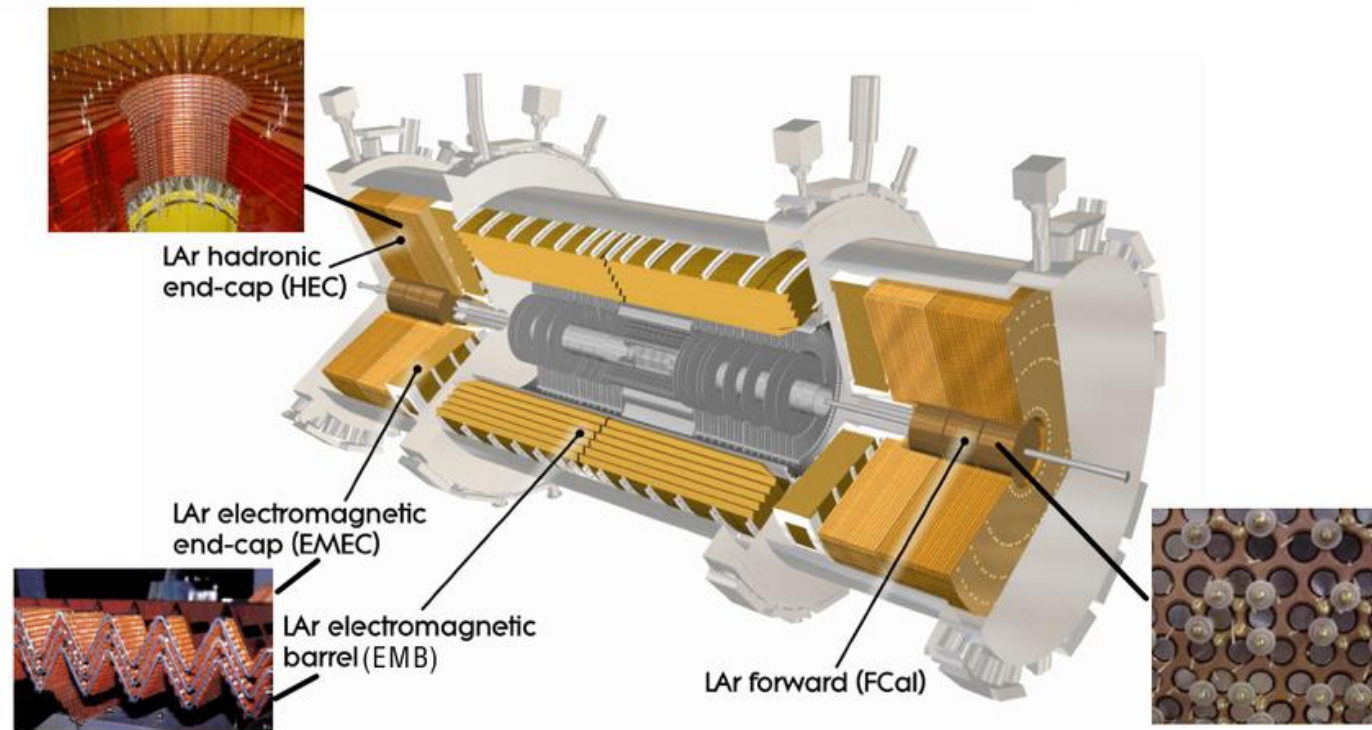


AI-based

ATLAS 2.0



Calorimètre à argon liquide

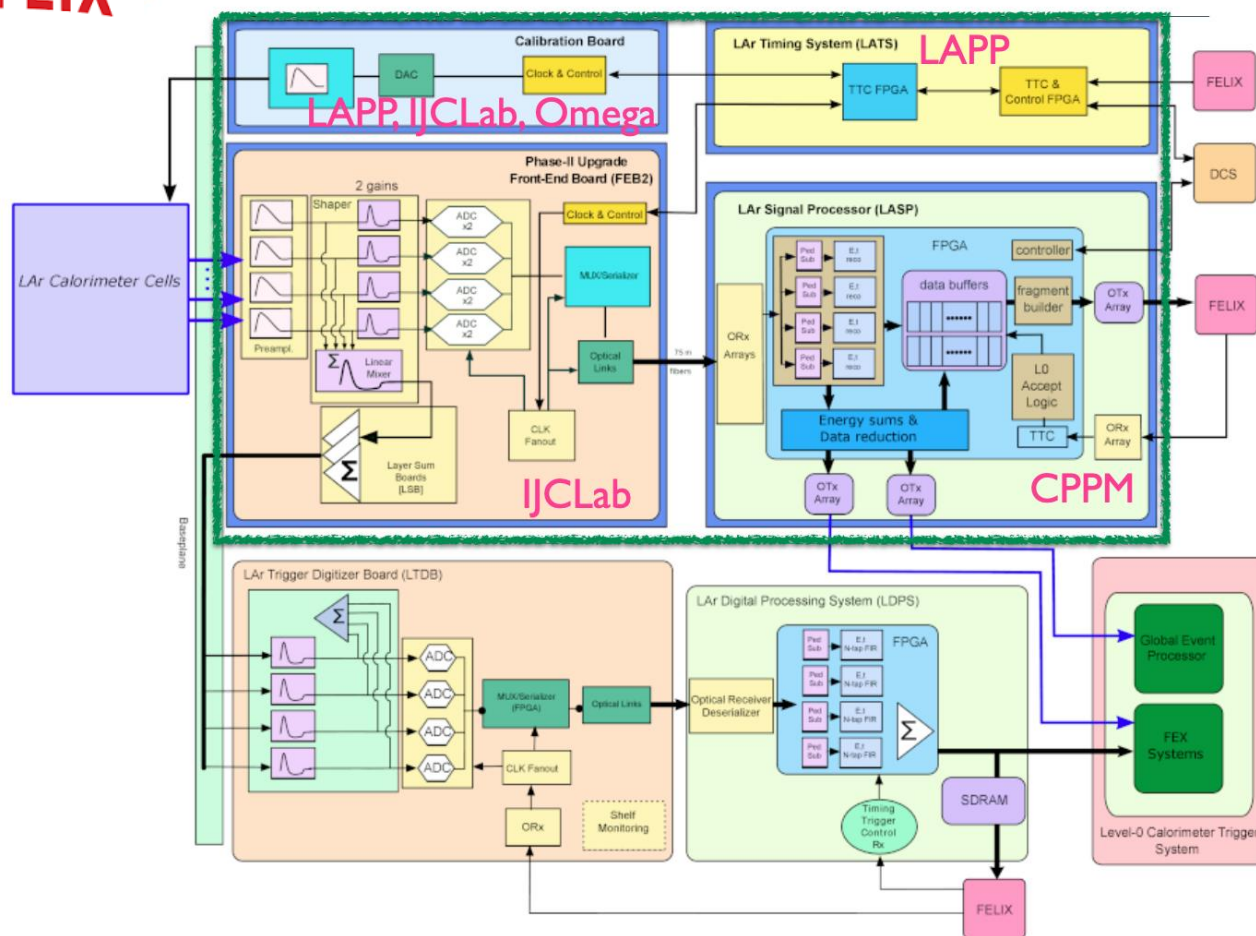


- ✓ Rôle majeur de la France dans l'actuel calorimeter
- ✓ Toute l'électronique doit-être remplacée pour HL-LHC
- ✓ Implication majeure de l'IN2P3

Calorimètre à argon liquide

- 200 000 cellules
- Flux de données: 340 Tb/s

NETFLIX

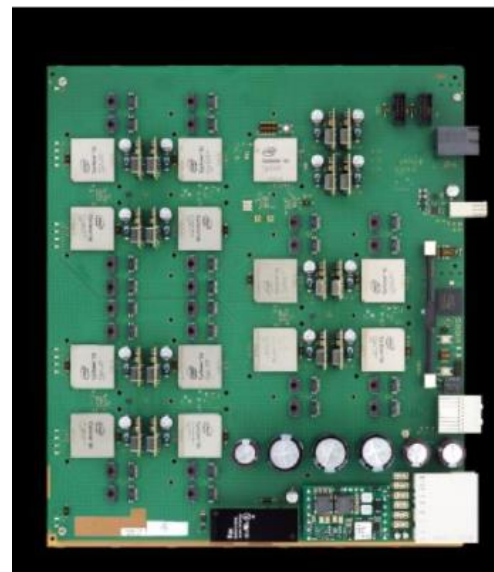
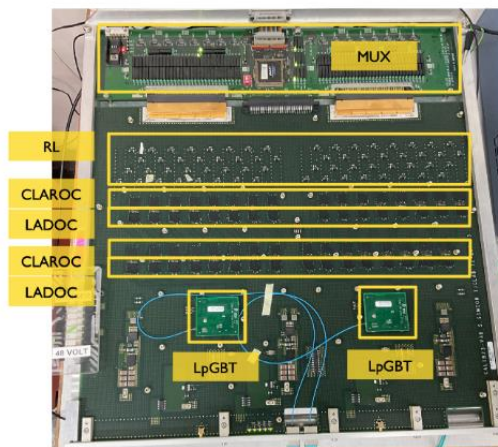


Slide from O. Arnaez

Calorimètre à argon liquide

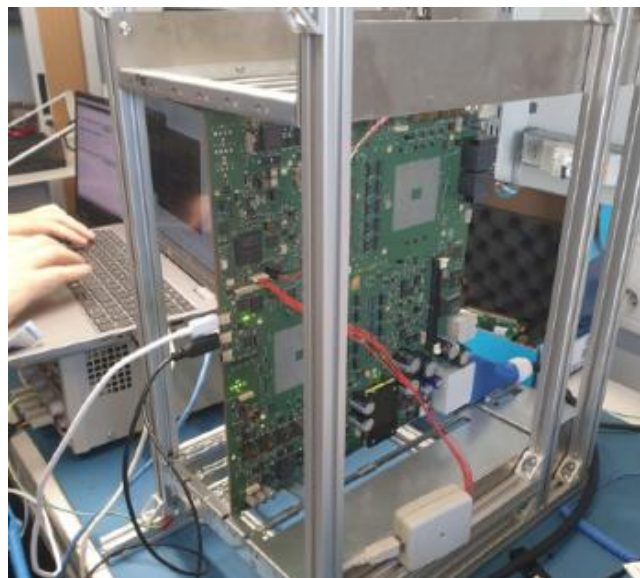
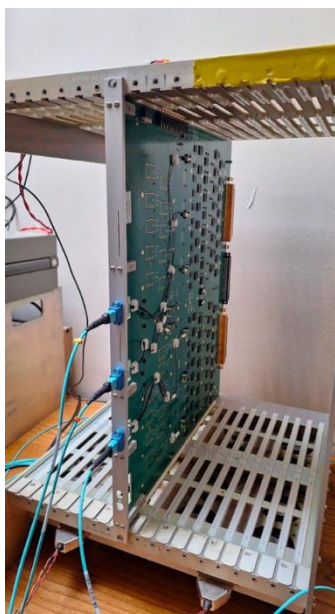
- ✓ ASICS
- ✓ 4 cartes

Calibrer la mesure d'énergie à avec une haute précision



Gestion du temps

- Horloge
- déclenchement



Processing du signal

- Mesure de l'énergie
- Mesure du temps

Gestion des données du détecteurs

HGTD: détecteur temporel

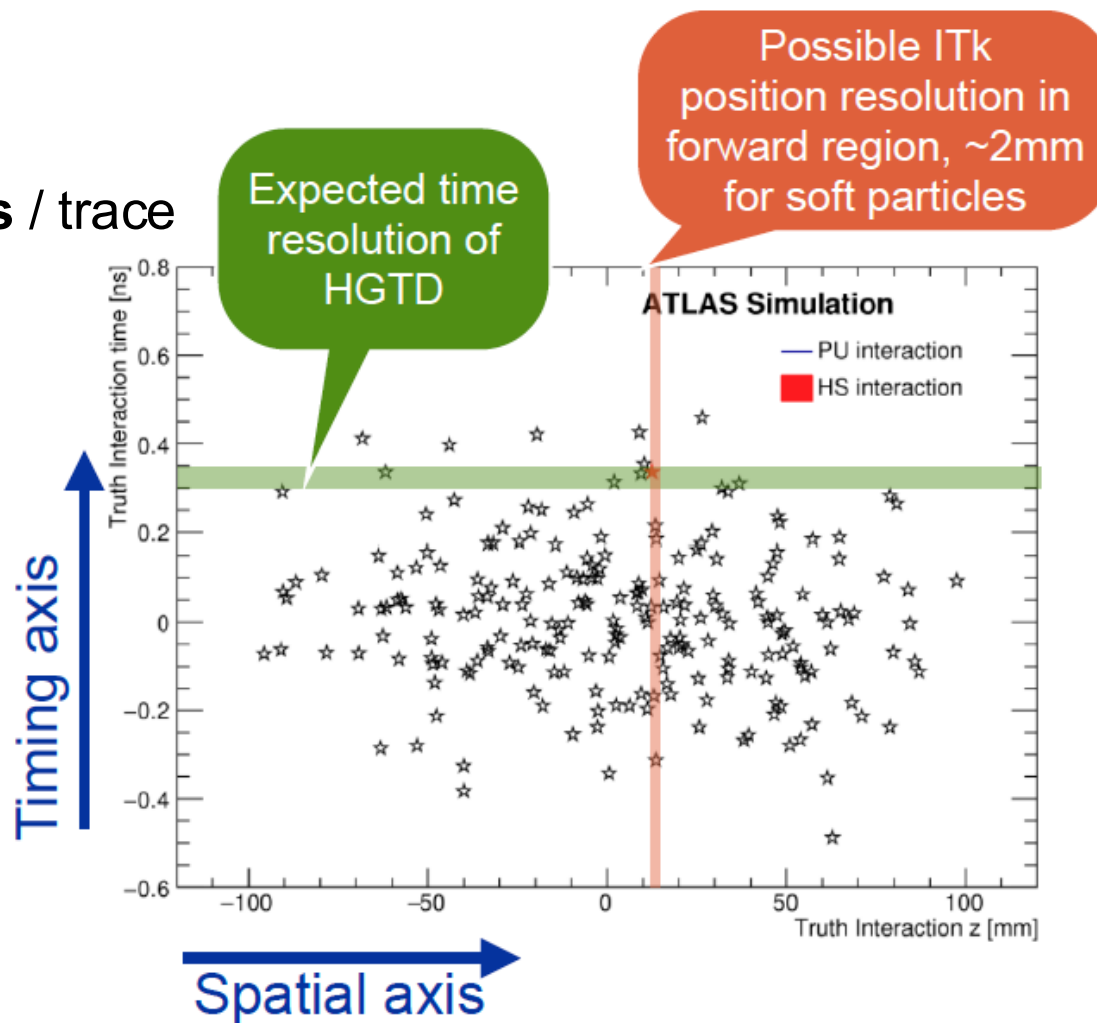
Objectif: réduire l'empilement temporel

→ Idée [novatrice](#)

→ R&D initiée en 2016

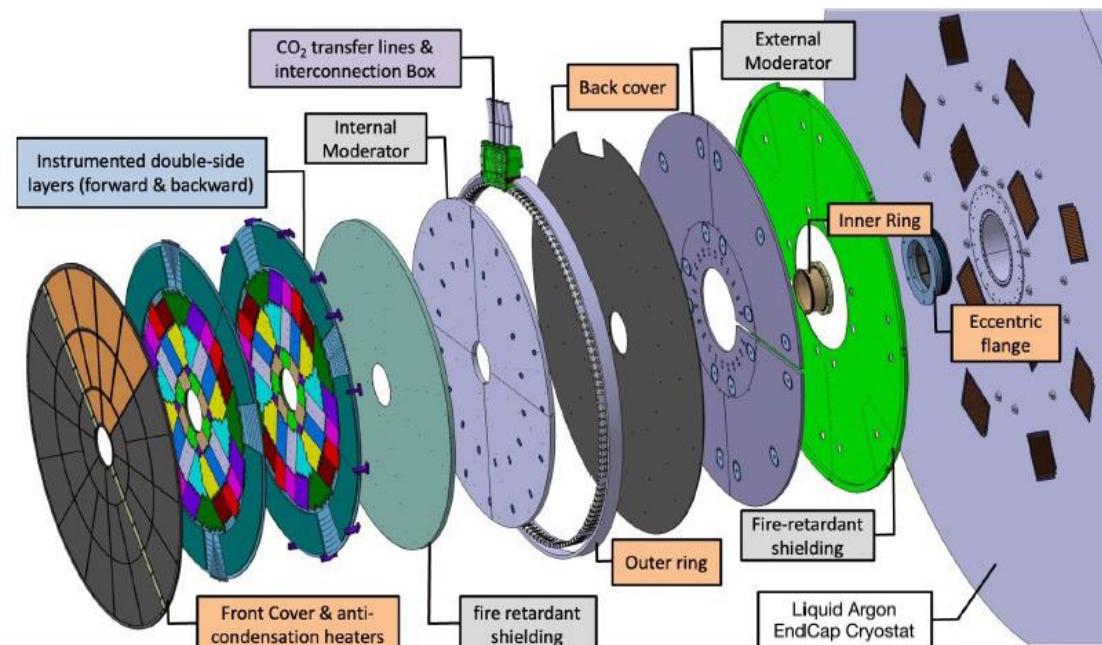
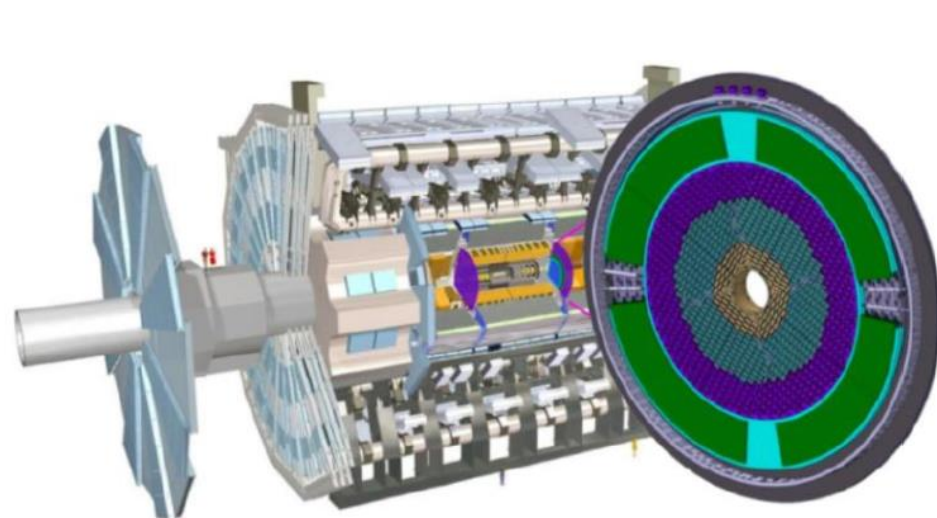
Résolution temporelle d'environ **30-50 ps** / trace

Taille d'un pixels: 1.3x1.3 mm



Slide from L. Corpe

HGTD: détecteur temporel



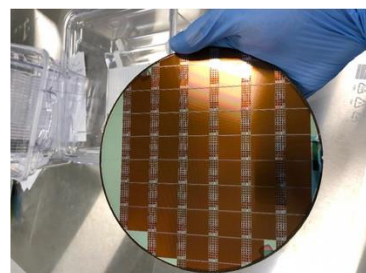
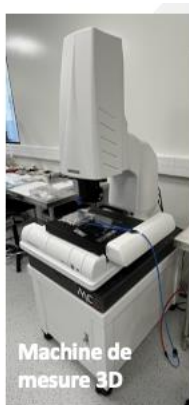
Détecteurs

- ✓ Assemblage
- ✓ Supports mécaniques
- ✓ Montage

Grandes structures mécaniques:

- ✓ Enceintes hermétiques
- ✓ Disque de refroidissement
- ✓ Blindage

HGTD: détecteur temporel



2016
Altiroc0
2 x 2 mm²
2 x 2 pixels
PA + discr

2017
Altiroc1
7 x 7 mm²
5x5 pixels
PA+ discr +
TDC + SRAM

MEGA
Microelectronics

Engineering run 2019

ALTIROC2 = 2 x 2.1 cm²
15 x 15 pixels of (1.3mm)²
PA+ discr + TDC + SRAM
+ all digital blocks

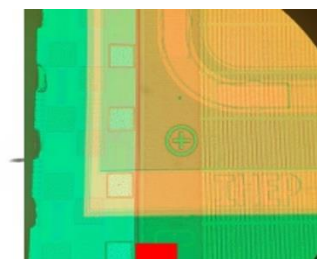
Eng run June 2022

ALTIROC3 = 2 x 2.2 cm²
15 x 15 pixels of (1.3mm)²
PA+ discr + TDC + SRAM
+ all digital blocks triplicated

Eng run March 2024

ALTIROCA = 2 x 2.2 cm²
15 x 15 pixels of (1.3mm)²
Pre-prod ASIC
Same as Altiroc3 with
minor modifications

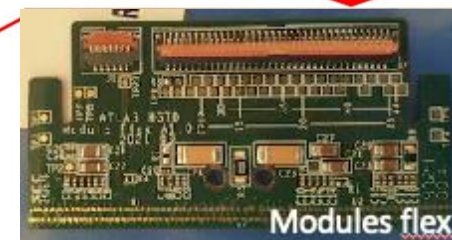
LGAD +
ALTIROC



Hybrids



Modules



Modules flex
Support
Unit

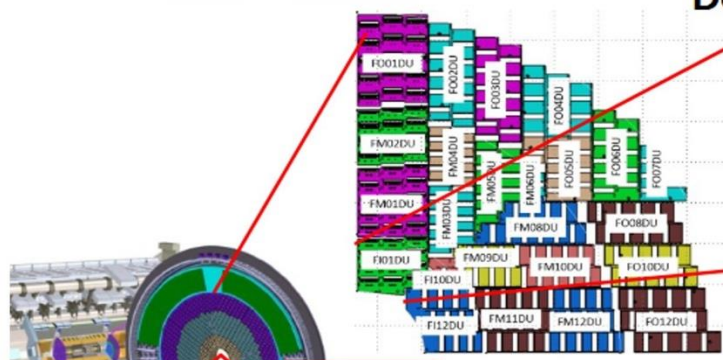
UC Lab
Irène Joliot-Curie
Laboratoire de Physique
des 2 Infinis

Support Unit + Modules:
Detector Unit



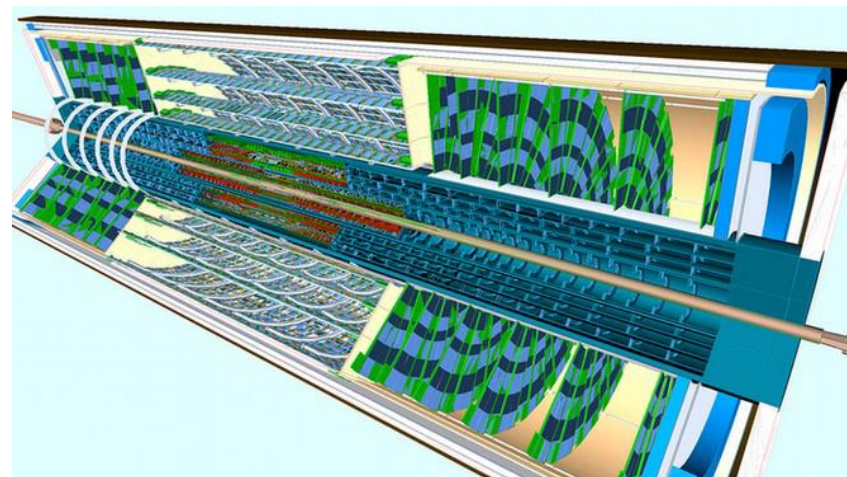
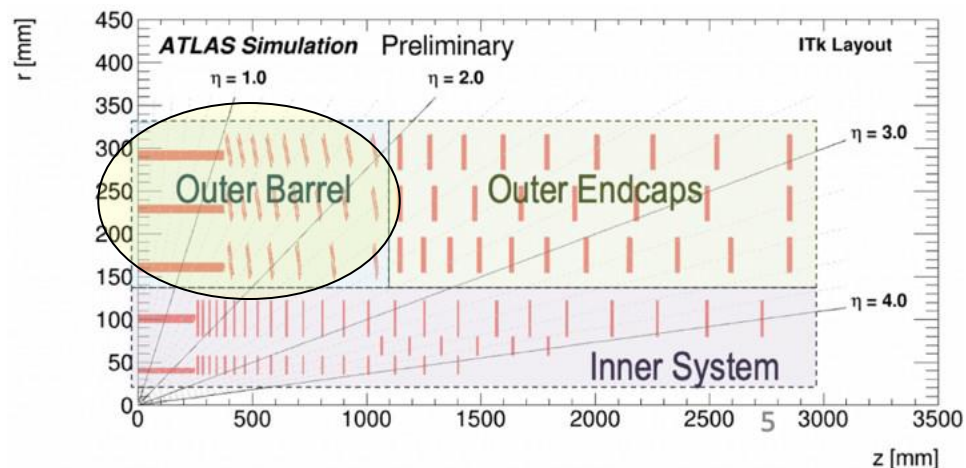
FI01DU

LPNHE
PARIS



Elements from O. Duarte

ITK: trajectographe interne



Remplacement du trajectographe Solution “tout” silicium

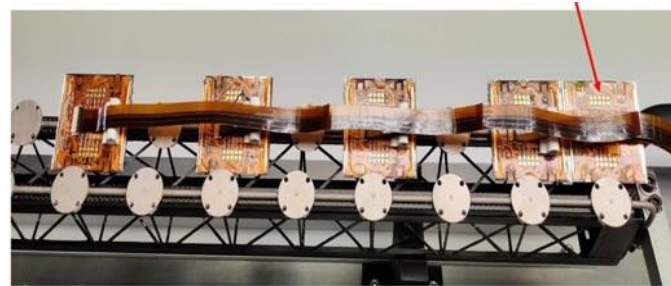
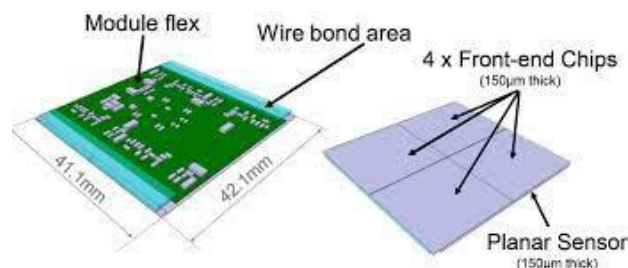
Implication française sur la partie “pixels”

- ✓ Mécanique
- ✓ Connectiques/cables
- ✓ Assemblage de détecteurs
- ✓ Montage de détecteurs

➤ 2 clusters (Paris, PACA)

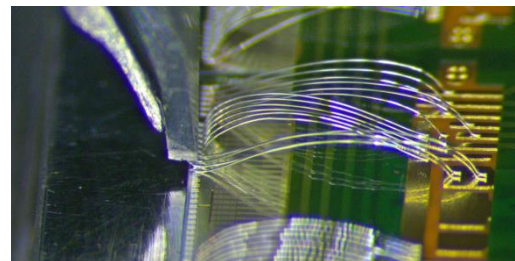
➤ 6 laboratoires

- IJCLab – LPNHE – CEA
- LAPP, LPSC, CPPM



ITK: trajectographe interne

Assemblage de détecteurs en salle blanche



Bare Module



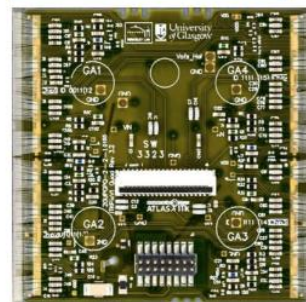
Flex



Assembly



Wire-Bond



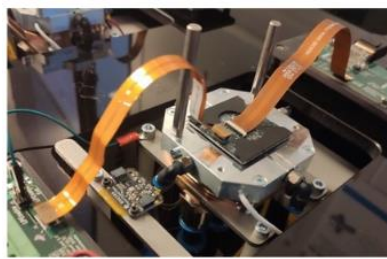
Testing



Montage de détecteurs sur des structures



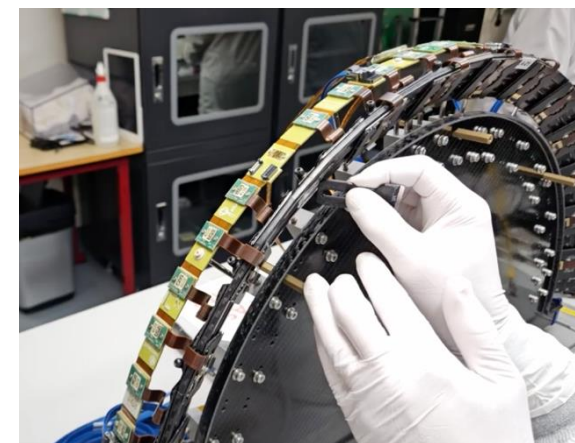
Collage sur une cellule



Pigtails électriques et tests



Intégration sur un cylindre



CMS 2.0

CMS Phase-2 upgrades

Replacements of existing system/detector
Electronics upgrade/replacement
New detector

L1-Trigger/HLT/DAQ [CMS-TDR-021 / 022]

- Tracks in L1-Trigger at 40 MHz
- PFlow-like selection 750 kHz output
- HLT output 7.5 kHz

Calorimeter Endcap [CMS-TDR-019]

- 3D showers imaging for pattern recognition
- Precision timing for PU mitigation
- Si, Scint+SiPM in Pb/W-SS

Tracker [CMS-TD-014]

- P_T module design for tracking in L1-Trigger
- Extended coverage to $\eta \approx 3.8$
- Much reduced material budget
- Si-Strip and Pixels increased granularity

Barrel Calorimeters [CMS-TDR-015]

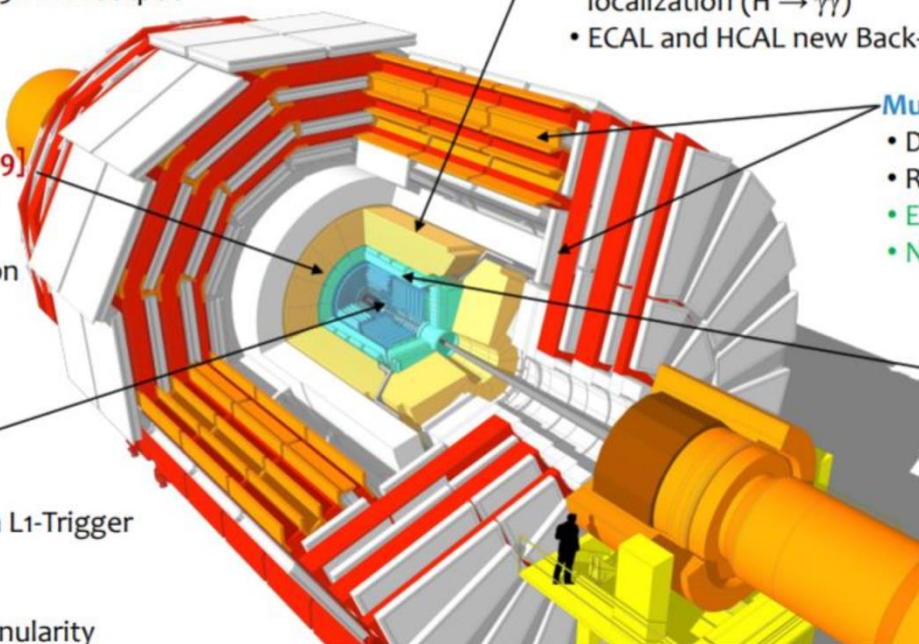
- ECAL crystal granularity readout at 40 MHz
- Precision timing for e/γ at 30 GeV, for vertex localization ($H \rightarrow \gamma\gamma$)
- ECAL and HCAL new Back-End boards

Muon systems [CMS-TDR-016]

- DT & CSC new FE/BE readout
- RPC back-end electronics
- Extended GEM coverage to $\eta \approx 3$
- New GEM/RPC $1.6 < \eta < 2.4$

MIP Timing Detector [CMS-TDR-020]

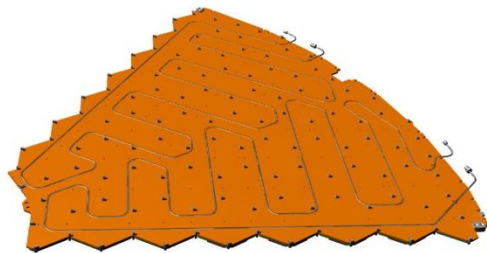
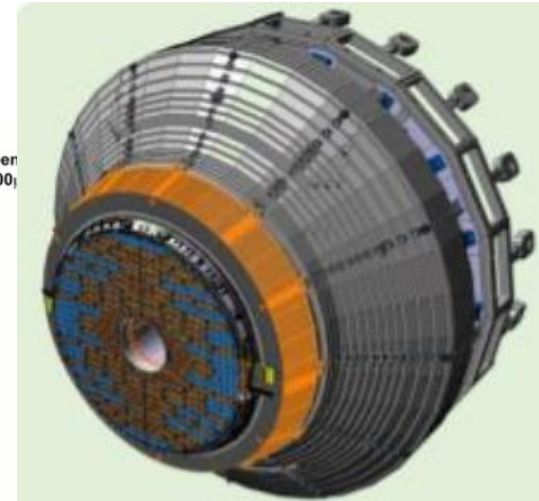
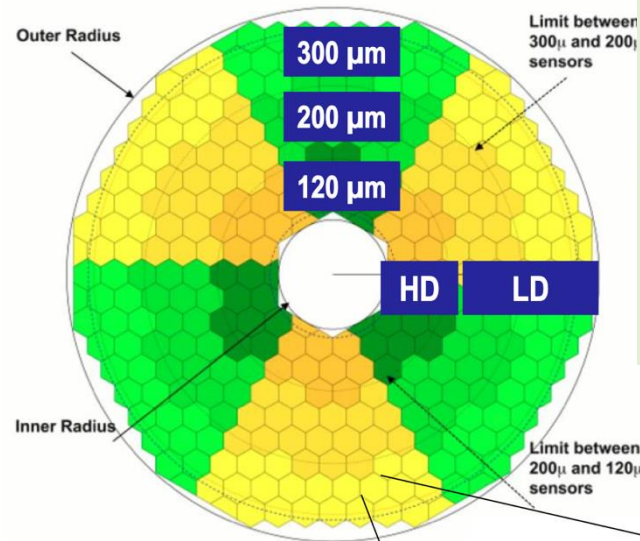
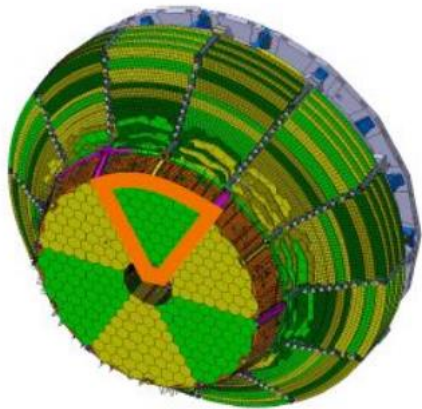
- Precision timing for PU mitigation
- Barrel layer: Crystals + SiPMs
- Endcap layer: Low Gain Avalanche Diodes



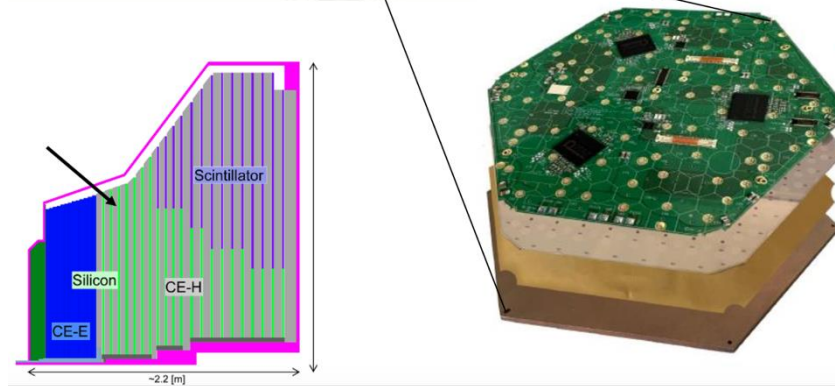
HGCAL: calo à haute granularité

Nouvelle generation permettant de mesurer les “gerbes”

- ✓ Détecteur 5D: énergie, impulsion (3), temps
- ✓ Utilise 600 m² de silicium
- ✓ Poids: 2 x 230 T
- ✓ Température: -30 C



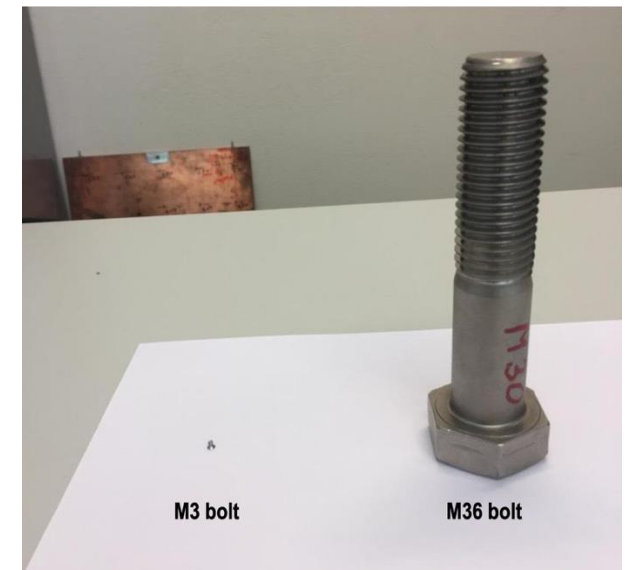
Plaques de cuivre
→ Refroidissement
→ Absorption



ASIC HGCROC

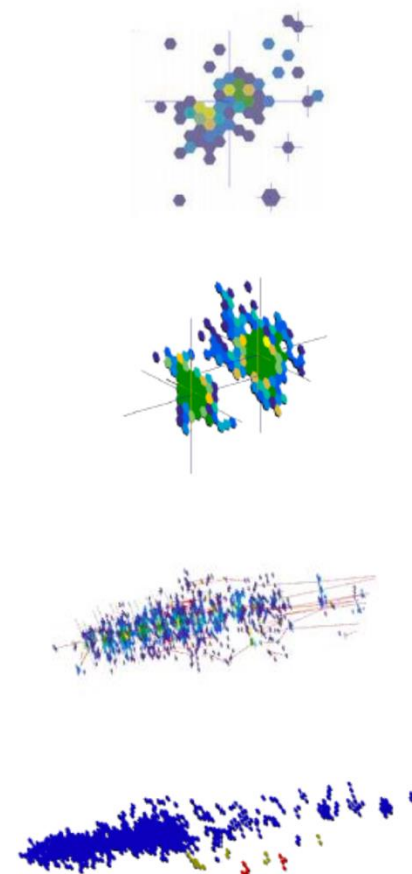
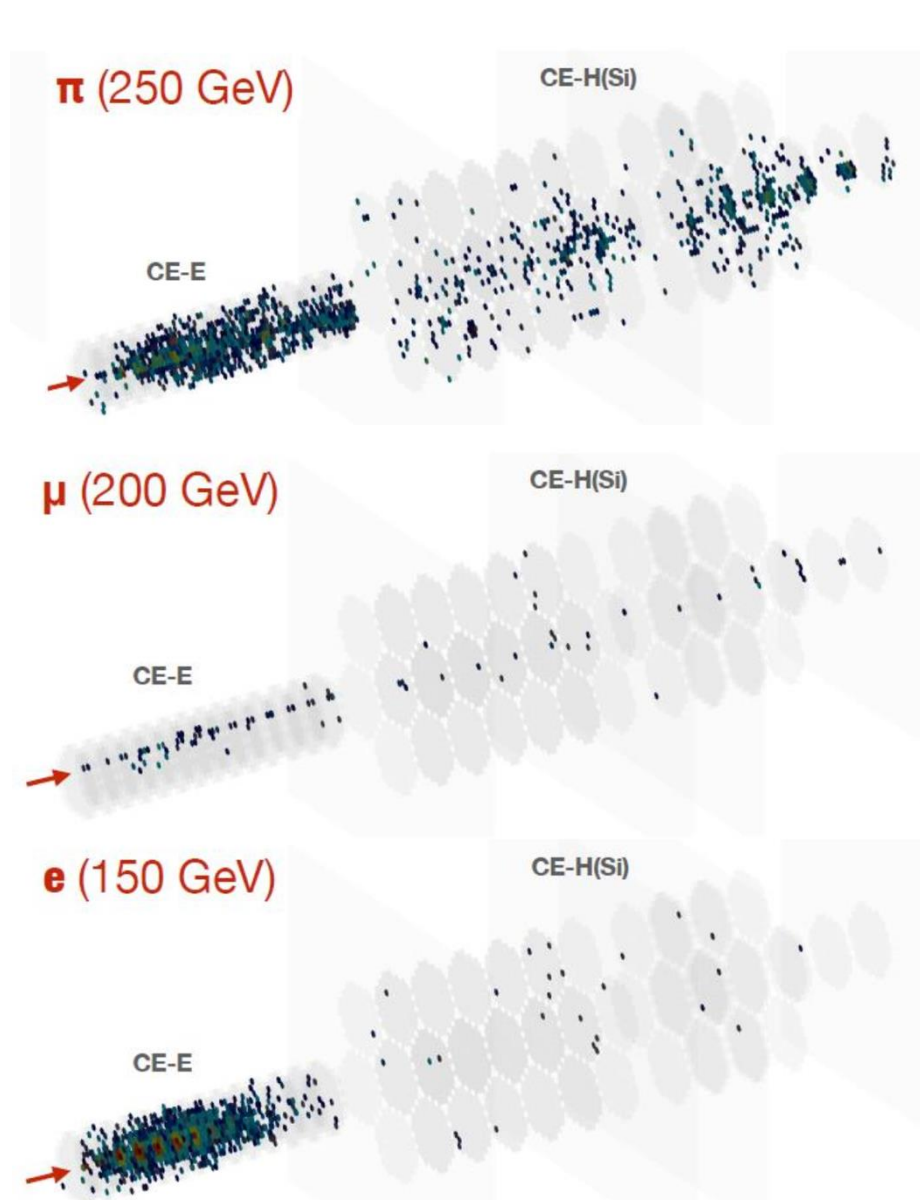


HGCAL: calo à haute granularité



Elements from C. Ochando

Reconstruction



Reconstructed hits

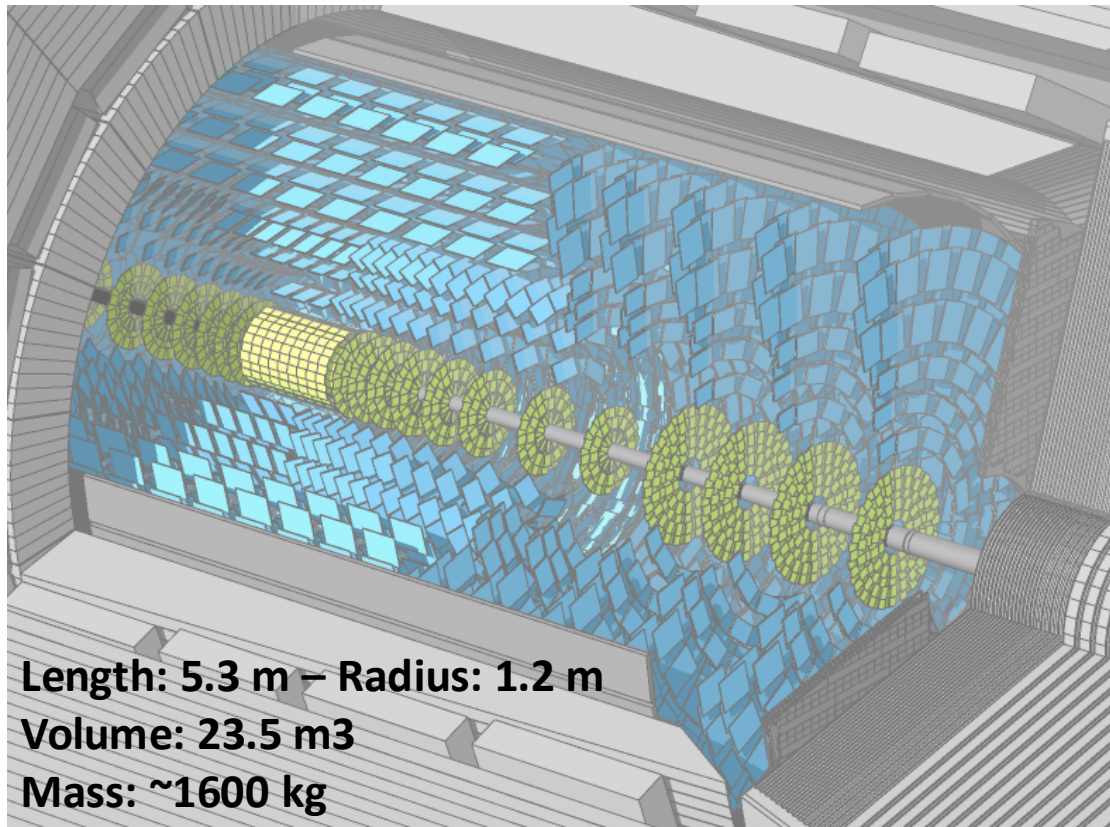
Layer-clusters (2D)

Tracksters (3D)

Particles (5D)

Elements from C. Ochando

Trajectographe



Construction de structures mécaniques:

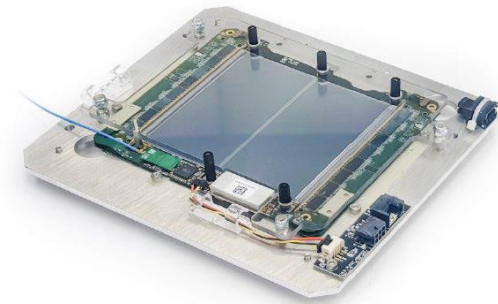
- ✓ tonneau
- ✓ bouchons



Remplacement de tout le détecteur

Idée novatrice:

envoyer des données filtrées
localement à 40 MHz (trigger)



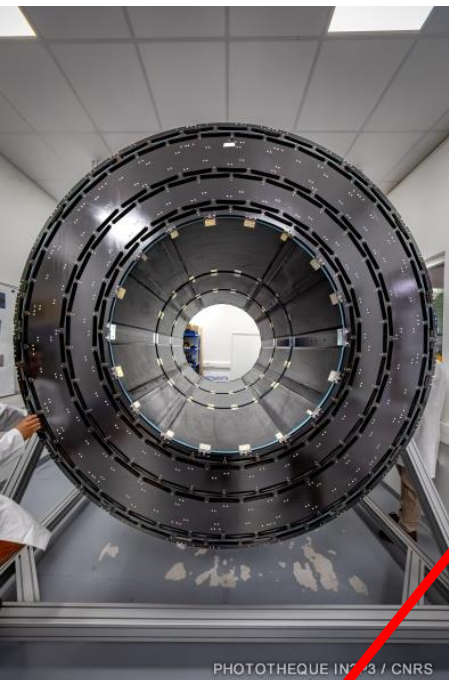
Montage de détecteurs



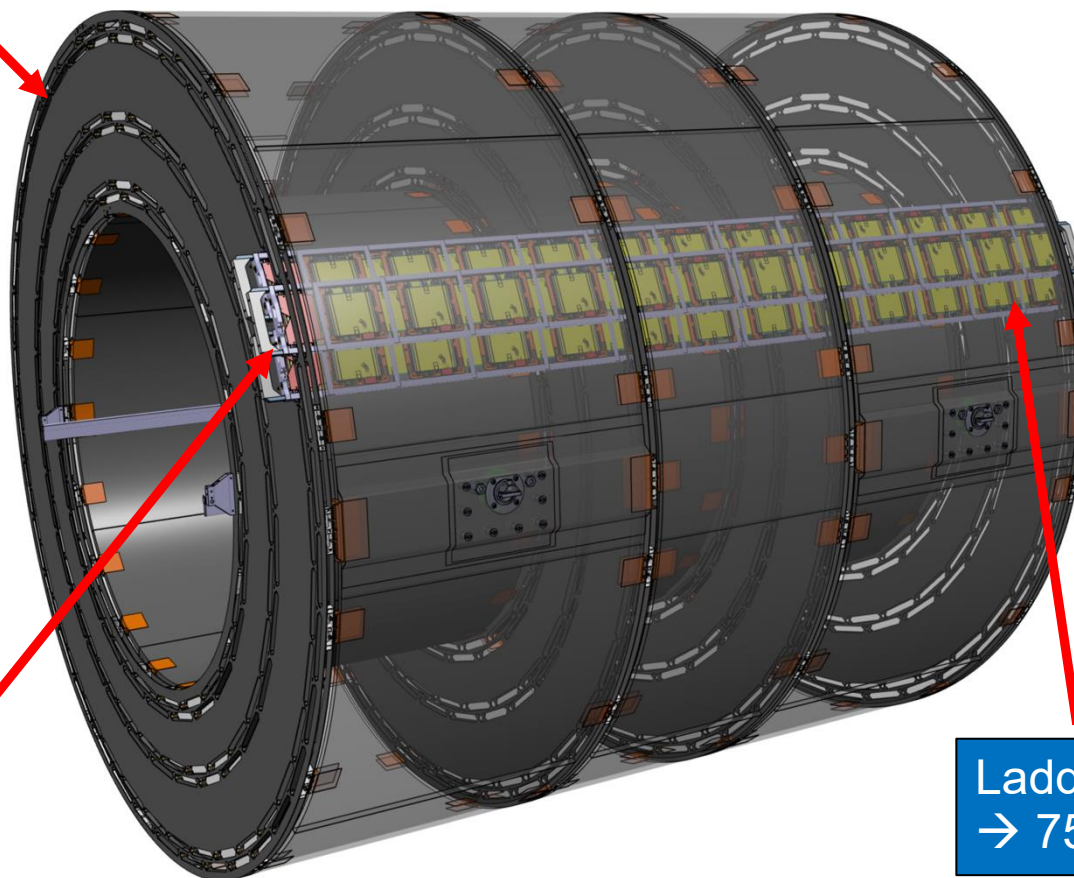
Trajectographe

Construction of the « wheel » at IPHC
→ Shipment to CERN before summer

$L = 2.4 \text{ m} - D = 2 \text{ m}$
 $M = 150 \text{ kg}$



PHOTOTHEQUE IN2P3 / CNRS

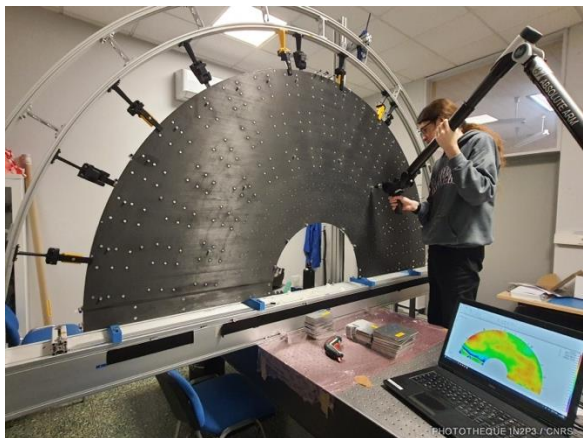


Ladder integration at IPHC
→ 75% of the 368 ladders

Integration of ladders
within the wheel at CERN

Trajectographe

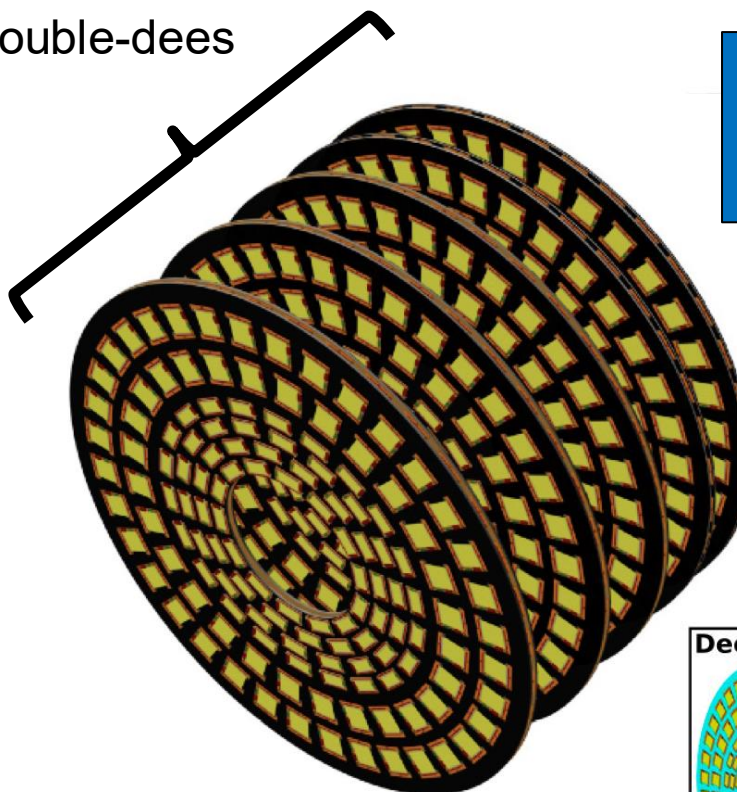
Metrology



Mechanical design

Construction & qualification of 24/40 dees (+spare)

5 double-dees



Integration of 12 dees

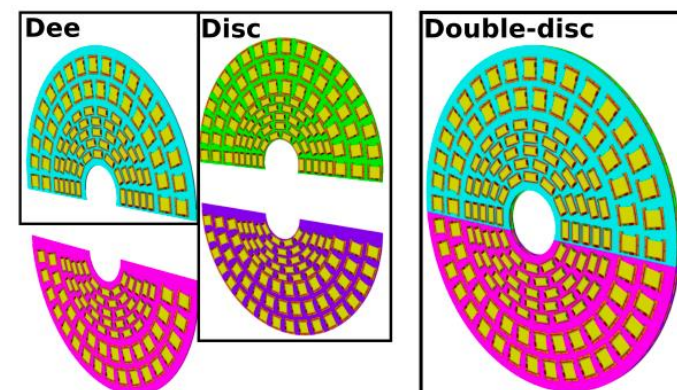
about 150 modules / dee



Seven cooling circuits per dee

- *Cooling inserts for 2S modules*
- *Carbon foam blocks for PS modules*

1 dee with few 2S and PS modules integrated



Conclusions

- **HL-LHC: Objectifs scientifiques ambitieux**
- **De nombreux défis technologiques**
 - Expertises dans nos laboratoires
 - Mécanique, électronique, détecteur, informatique, ...
- **Complexité et taille des projets**
 - Temporalité > 10 ans
 - Nombreuses interdépendances
 - Nombreux instituts partenaires
- **Engagement fort de l'institut**
- **N'hésitez pas à discuter avec les équipes de vos labos !**