

Remplacement du trajectographe de CMS pour le HL-LHC

1. Contexte
2. Électronique frontale: le concentrateur de données
3. Construction et intégration des bouchons

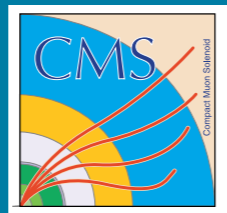
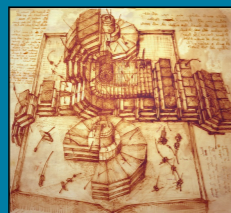
IP2i
LES 2 INFINIS
LYON



20

20

Conseil Scientifique IP2i
Nicolas Chanon, Sébastien Viret



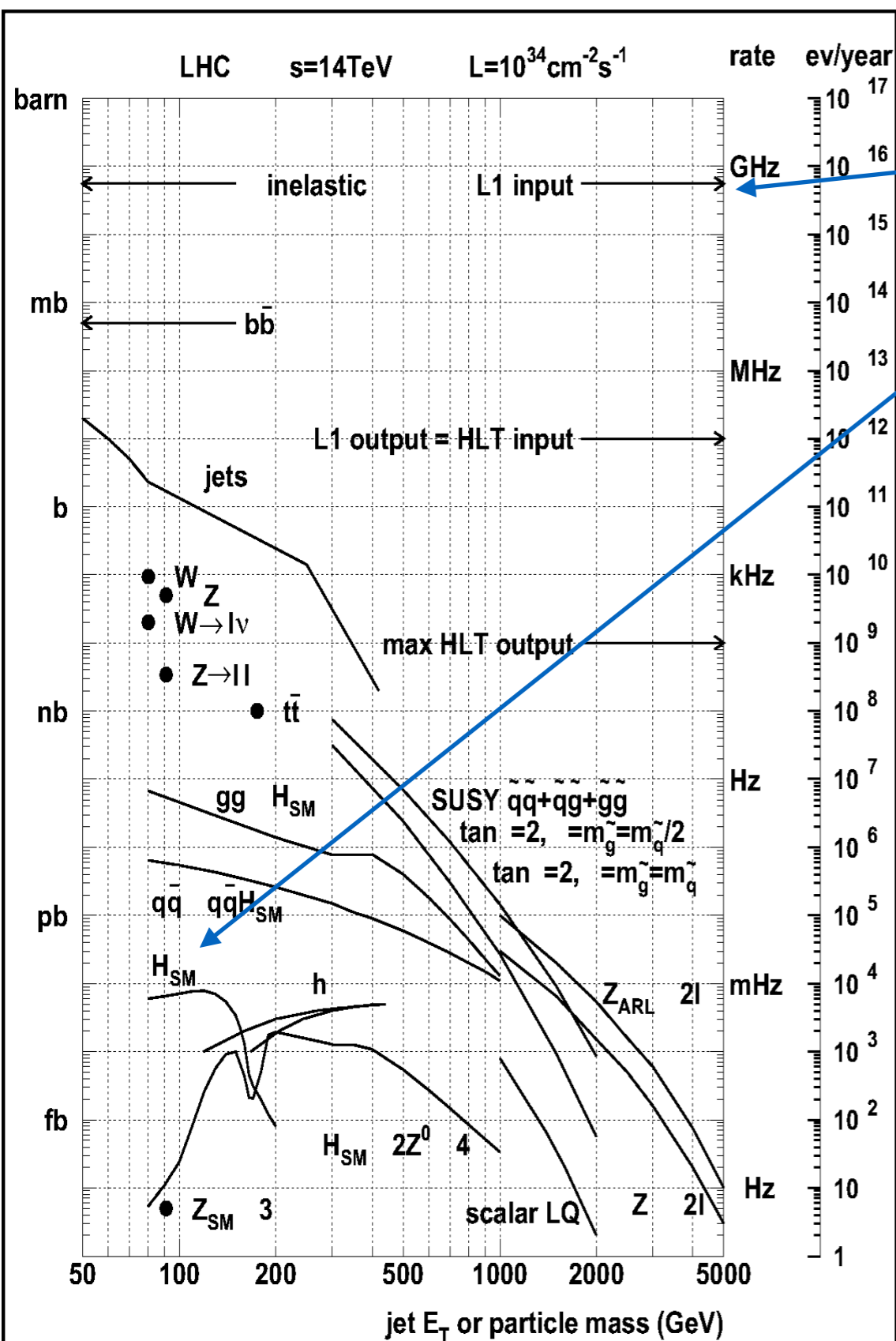
Contexte



20

20

Pourquoi améliorer CMS et le LHC ?



Fréquence de croisement de faisceau : 40 MHz

Taux de production du boson de Higgs: 1 mHz

Motivation de physique pour l'amélioration :

- Recherche de nouvelle physique au-delà du SM
- Mesures de précision du SM
- *Voir talk S. Gascon*

Motivation technique :

- Vieillissement du détecteur, amélioration

LHC : augmenter le taux de collisions produites (luminosité)

CMS : améliorer la sélection des événements (en ligne et hors ligne)

Améliorations du LHC

Nombre d'événements attendus pour un processus (e.g. Higgs)

$$N = L \cdot \sigma$$

Luminosité intégrée

Section efficace: augmente avec l'énergie dans la collision

Luminosité instantanée ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

$$L = \int \mathcal{L} dt$$

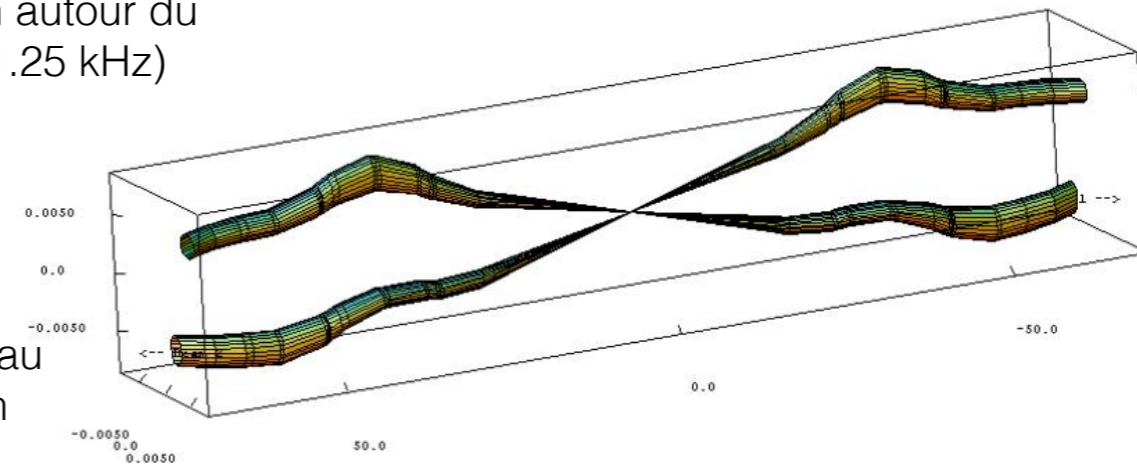
$$\mathcal{L} = \frac{n_b N^2 f}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*}$$

Nombre de paquets circulant dans le LHC

Nombre de protons par paquet

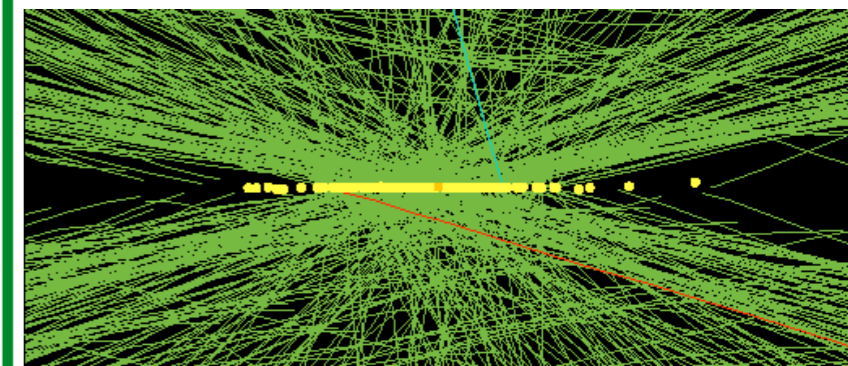
Fréquence de révolution autour du LHC (11.25 kHz)

Taille du faisceau au point de collision



Caractéristiques du LHC Haute Luminosité :

- Energie dans le centre de masse : **14 TeV** au lieu de 13 TeV
- **Augmentation luminosité instantanée** (x5-7.5)
- Augmentation luminosité **intégrée** (total 3000-4000 fb^{-1})
- **Collisions additionnelles** par croisement de faisceau : de **140** (nominal) à **200**. C'était ~38 en fin de Run 2.

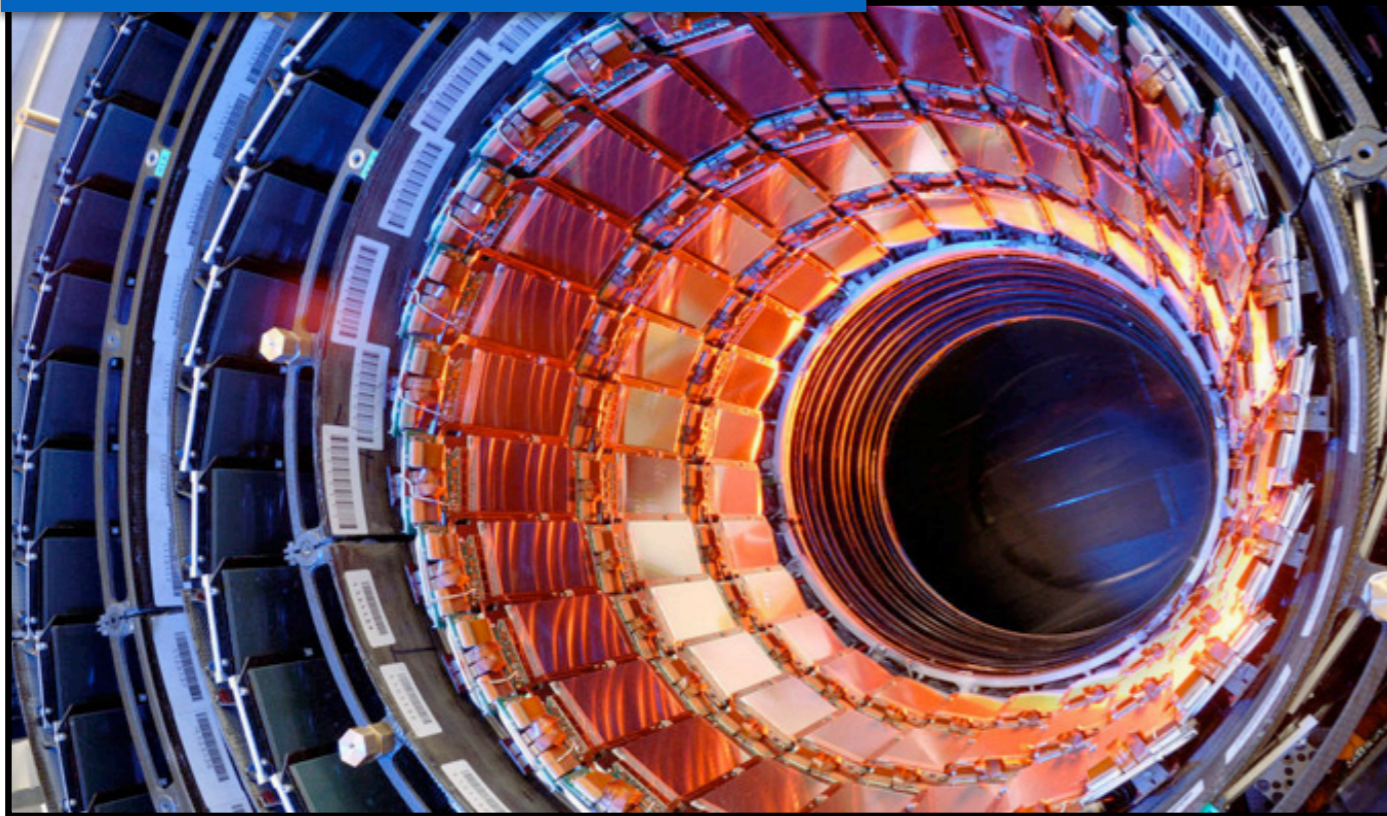


Événement avec 70 collisions additionnelles

→ **Amélioration du détecteur CMS nécessaire**

Comment optimiser le futur trajectographe de CMS ?

Trajectographe actuel de CMS



→ Au HL-LHC, il faudra faire aussi bien qu'au LHC dans un environnement beaucoup plus exigeant.

→ Le **futur trajectographe** devra faire face à des événements beaucoup plus complexes, et être **intégré au premier niveau du système de déclenchement de CMS (hardware, niveau 1)**.

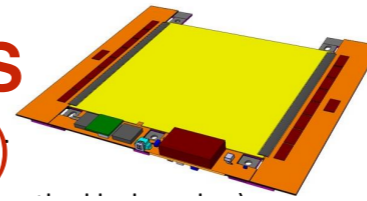
→ **Pour améliorer un trajectographe il faut:**

- Le rendre plus **transparent** : diminuer la quantité de matière
- Augmenter la **granularité** (occupation des canaux $< 1\%$ malgré l'empilement)
- Etendre la **couverture** du détecteur: détecteur pixels à $|\eta| < 4$ (aujourd'hui 2.5)
- **Extraire à 40MHz** les informations nécessaires au **déclenchement de niveau 1**
- **Reconstruire** les données en **5 μ s**

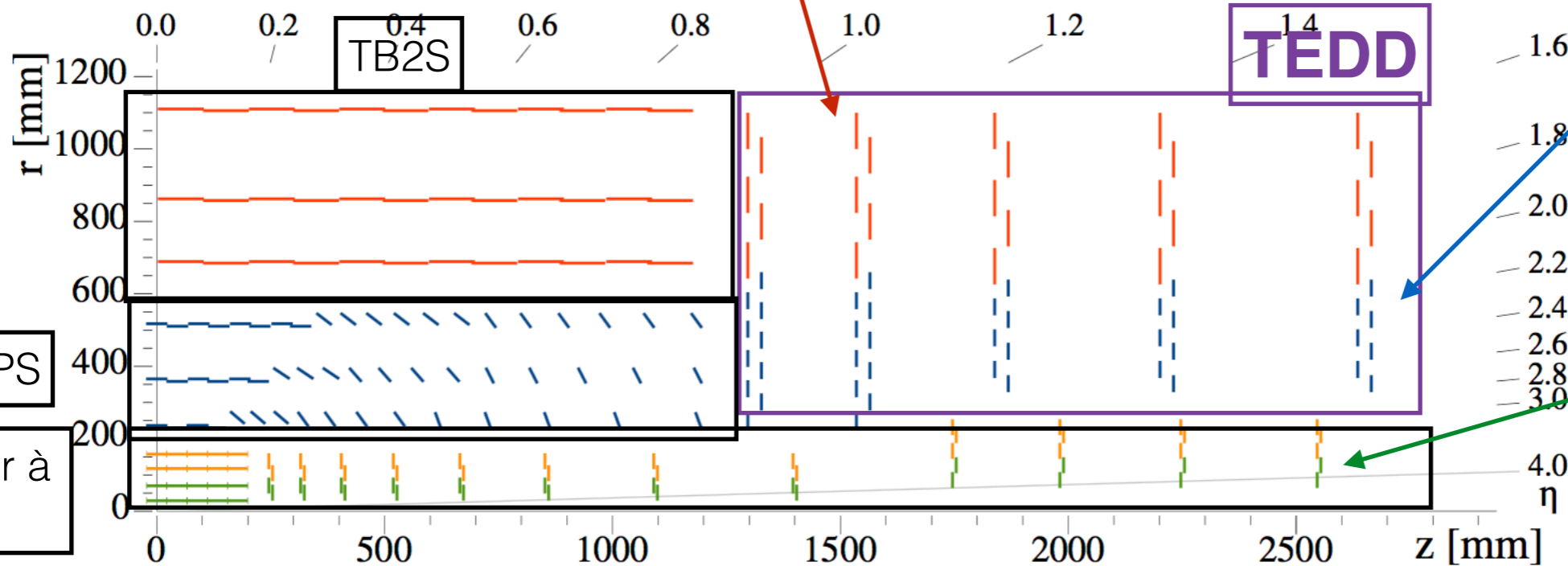
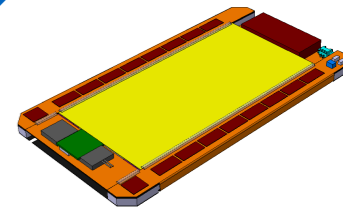
Cahier des charges du futur trajectographe

Futur trajectographe

Modules de détection **2S**
(2 couches de pistes Si)



Modules de détection **PS** (pixel-pistes)

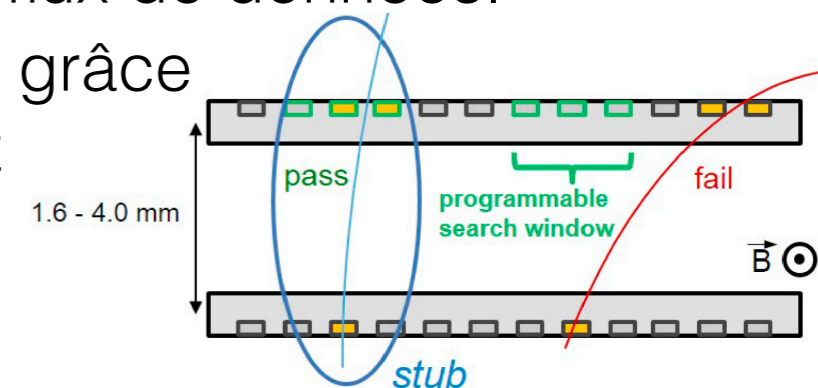


Modules pixels

Phase 2 (2027) : remplacement complet du trajectographe

- Structures mécaniques **limitant la quantité de matière traversée**
- **Nouveaux modules** : capteurs Si et électronique frontale **résistant aux radiations**
- **Électronique frontale** : opérations complexes sur un grand flux de données.
- Information “**stub**” envoyée au **déclenchement de niveau 1** grâce aux **pT-modules**: réduit la quantité d’info à extraire à 40MHz

A l’IP2I : Responsabilités du **concentrateur** de données (électronique frontale) et sur la **mécanique et intégration du TEDD** (bouchons)



Principe des nouveaux pT-modules à deux couches

Électronique frontale : le concentrateur de données (*CIC = concentrator integrated circuit*)

iP2i
LES 2 INFINIS
LYON

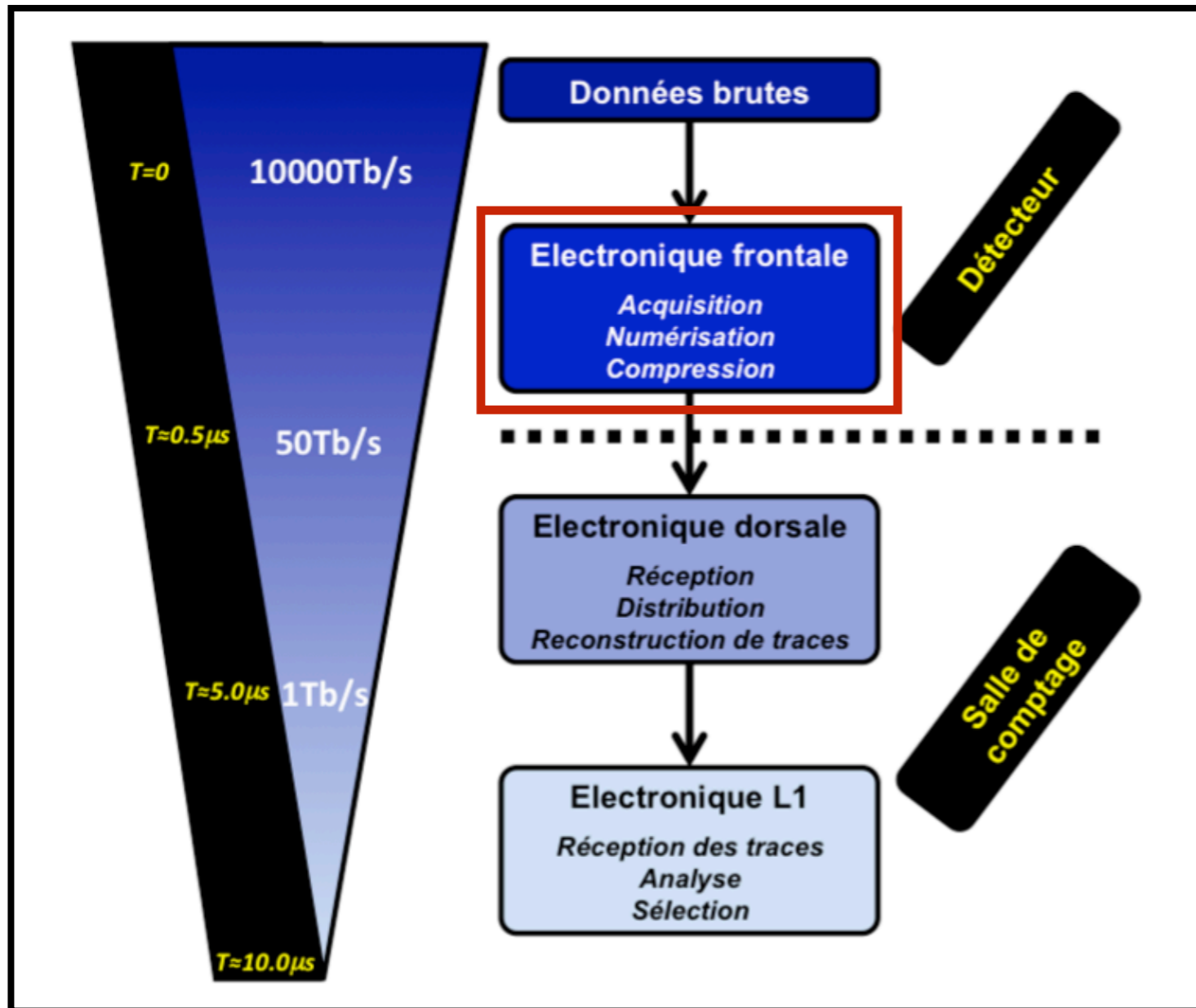


20

20

Reconstruction des traces au déclenchement hardware (niveau 1)

Obligatoire pour conserver des seuils suffisamment bas avec un empilement moyen de 200. Projet majeur de l'upgrade de CMS.

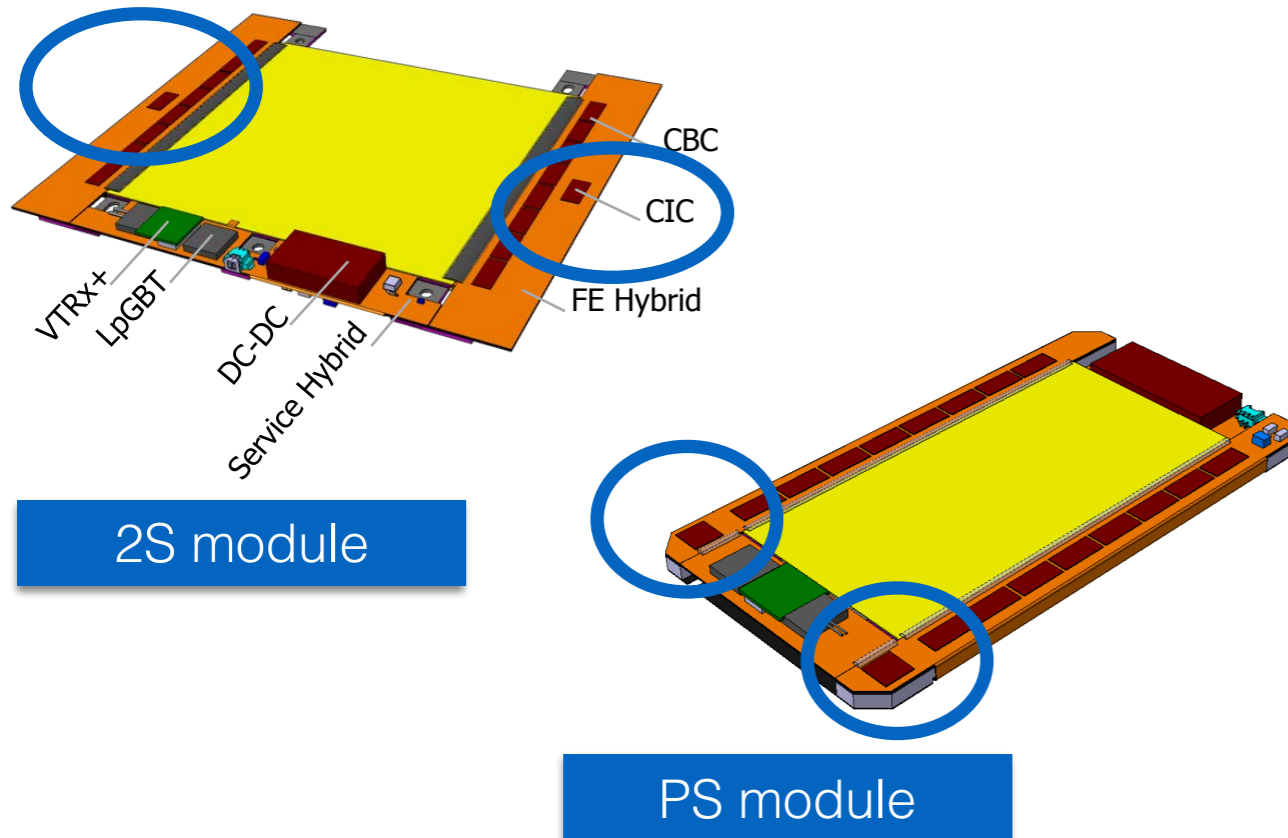


Cahier des charges: collecter et distribuer les données sélectionnées à 40 MHz et fournir les traces au système global en moins de $5 \mu\text{s}$.

→ Refonte totale de la chaîne d'acquisition, et le développement d'un système de reconstruction purement électronique

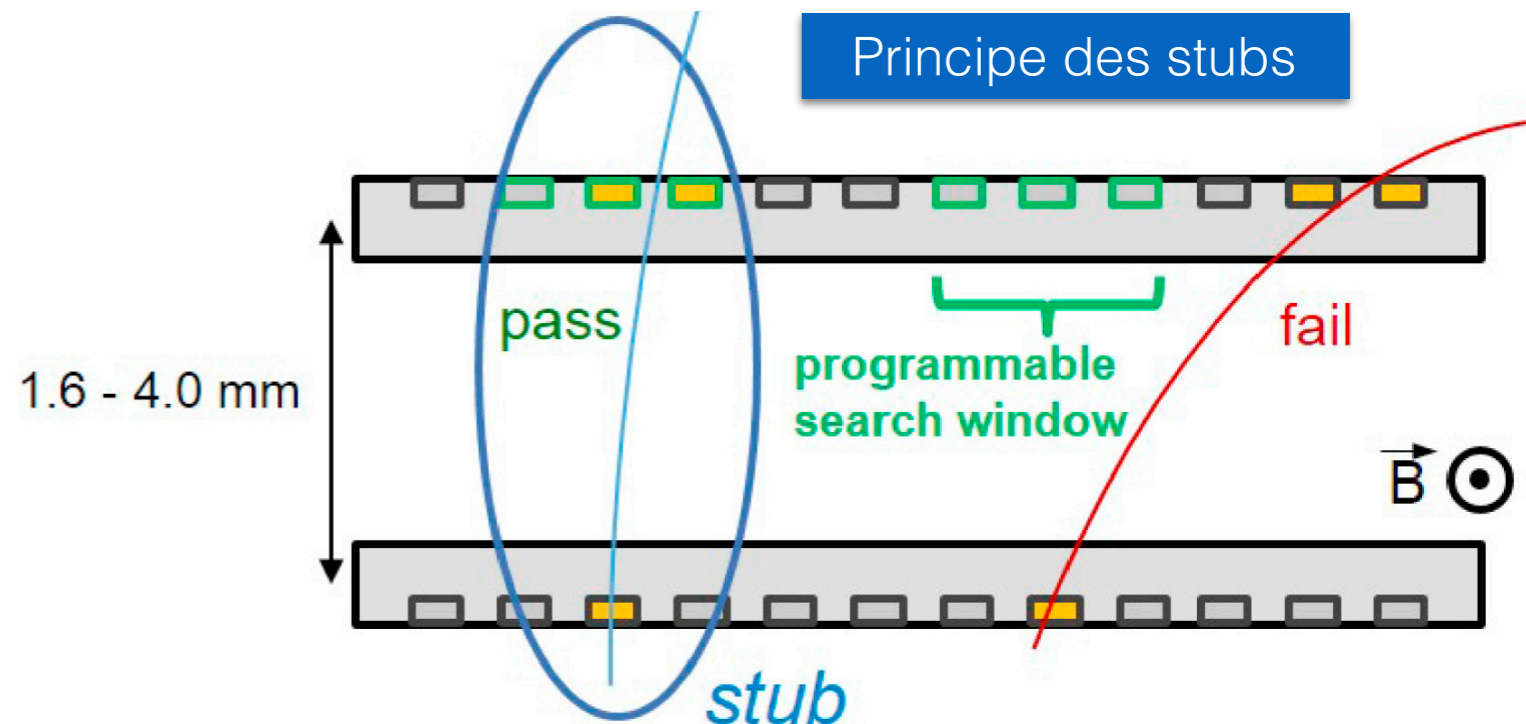
Extraction des données (1/4) : une architecture dédiée

→ Les modules de détection sont constitués de **2 couches de silicium** séparées de quelques mm.

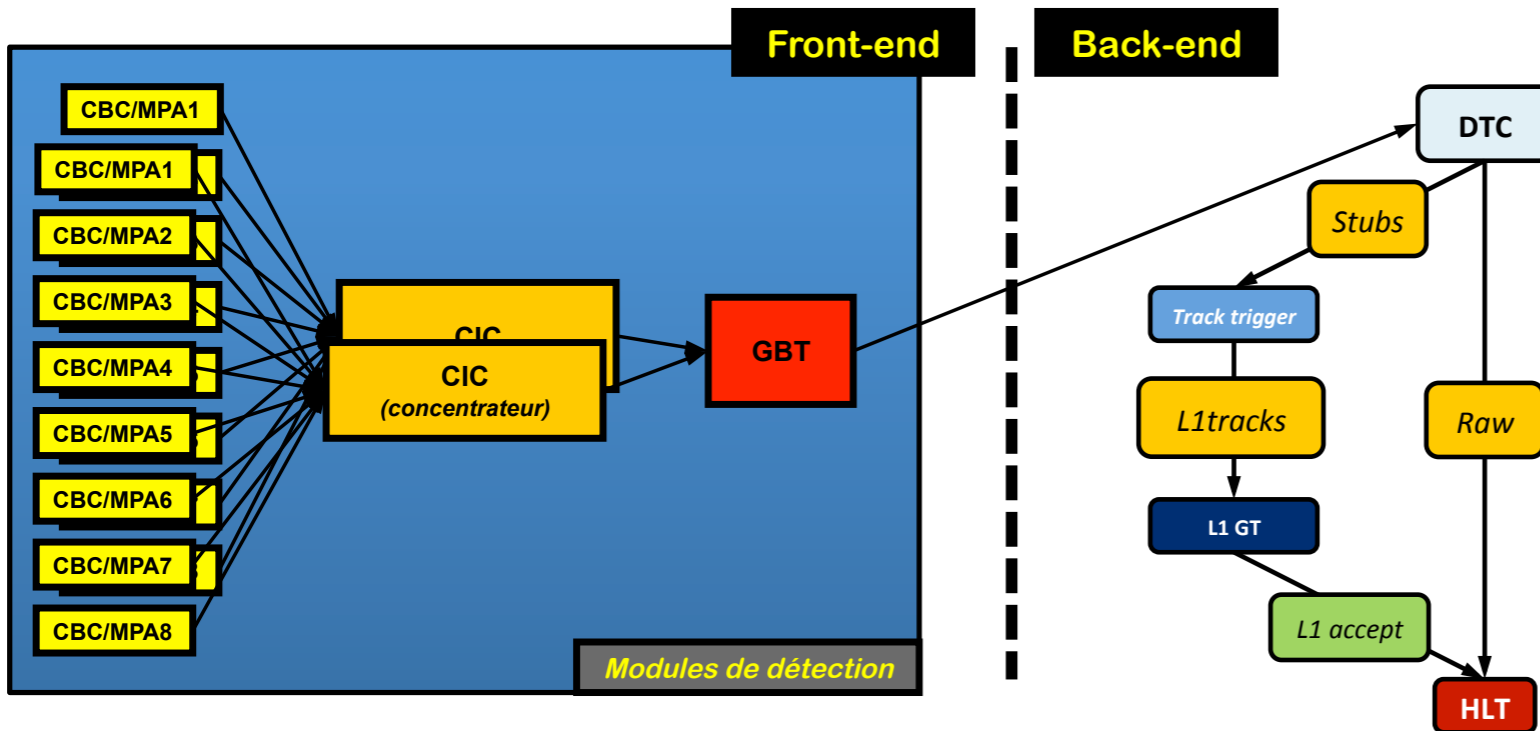


Pour réduire la quantité de signal à extraire au déclenchement de niveau 1:
→ on reconstruit seulement les **coïncidences entre clusters** correspondant à une **trace de p_T élevé (stub)**.

→ Pour un p_T minimal de $2\text{GeV}/c$, le **taux de réduction** est au minimum **d'un ordre de grandeur**. Suffisant pour sortir les infos pour le déclenchement.



Extraction des données (2/4) : une électronique frontale complexe



- Chaque module de détection contient entre **19 et 35 ASICs** de traitement des données:
- 16 CBC/MPA/SSA (*Imperial College/CERN*)
 - 2 CIC (*IP2I/CERN*)
 - 1 Ip-GBT (*CERN*)

Electronique frontale d'un pT-module

- Le **CIC** est sous la **responsabilité de l'IP2I**
- Le CIC assure la compression et la mise en forme des données produites par 8 ASICS frontaux, pour les 2 voies de lecture (stubs et données brutes).
- Aide du CERN sur la résistance aux radiations

→ **Premier ASIC complet réalisé à l'IN2P3 dans la technologie 65 nm (TSMC).**

~**30000 composants** dans le trajectographe, coût **CORE ~1 MCHF**

CIC1



Extraction des données (3/4) : concentrateur de données

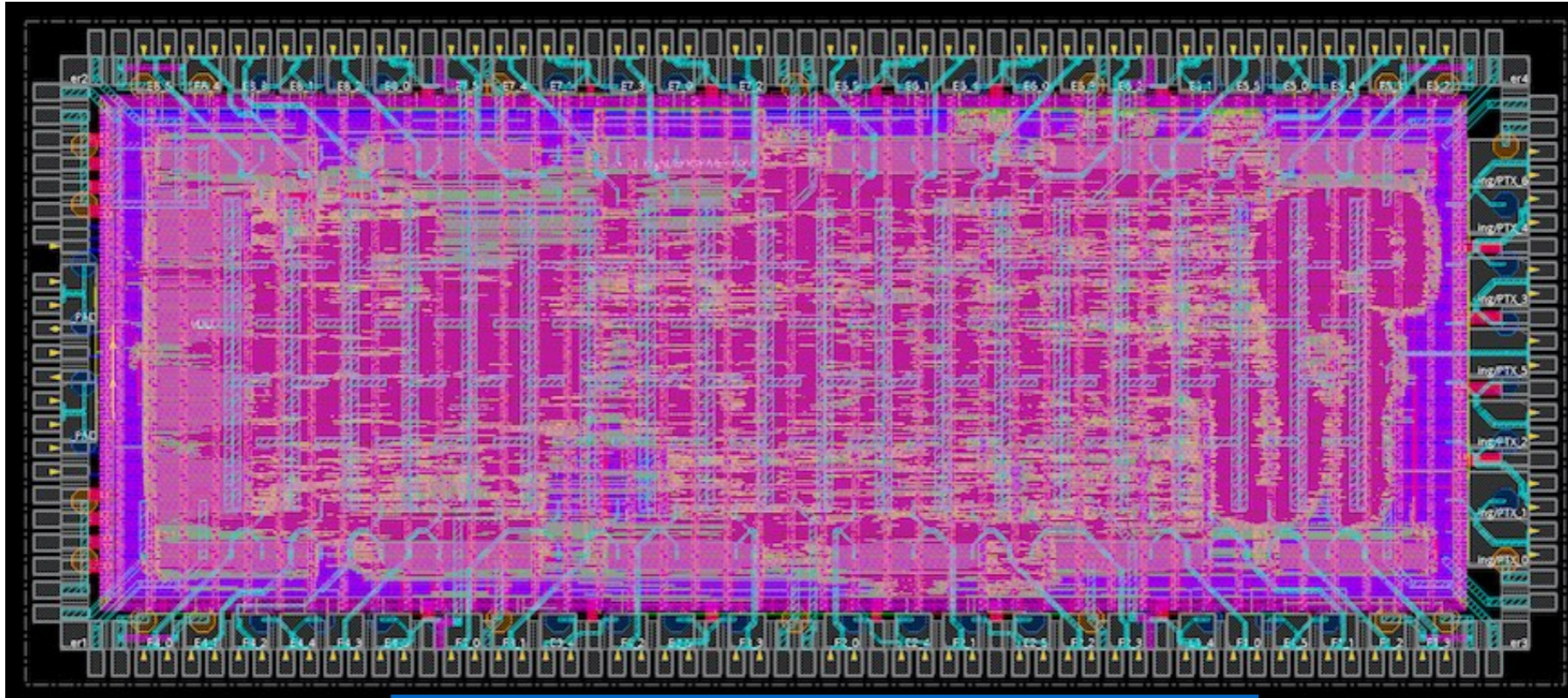
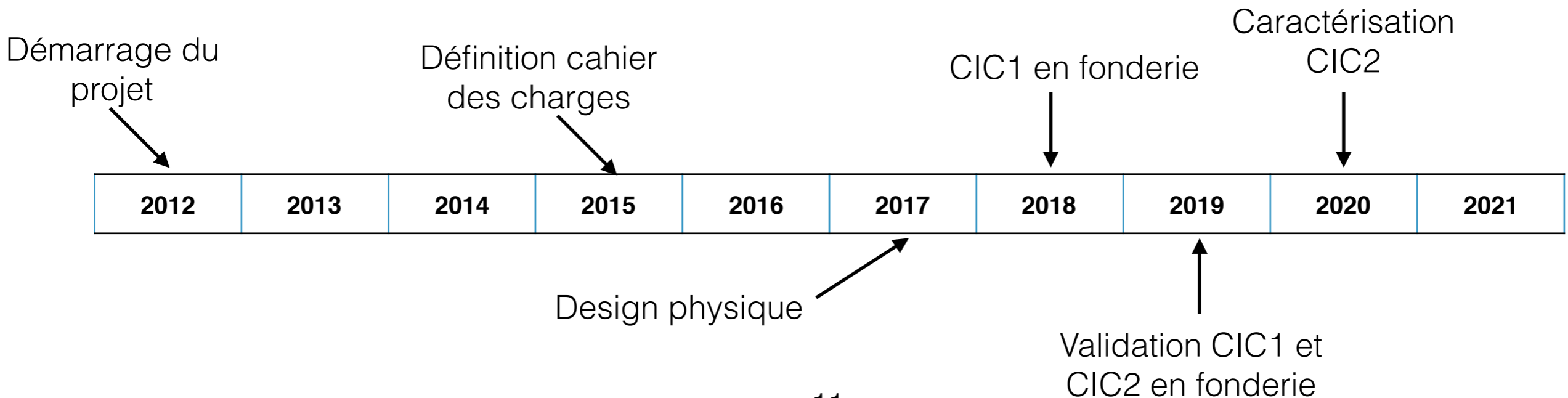
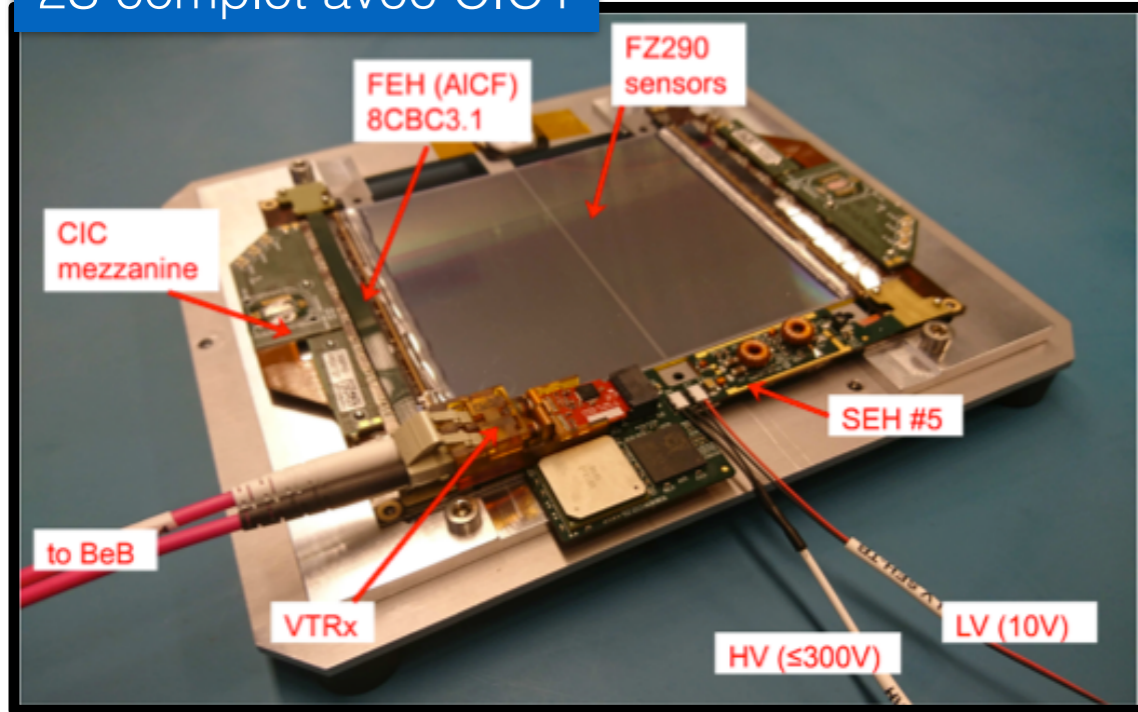


Schéma de câblage du CIC



Extraction des données (4/4) : résultats et statut

Prototype de module
2S complet avec CIC1



Test ions lourds pour
le CIC2

→ **CIC1** dans modules complets testé en faisceaux en 2019 : utilisé avec succès
→ **CIC2** inclut la résistance aux radiations et une diminution de la consommation.

→ **Pas de problèmes majeurs dus aux SEE** (Single Event Effects),
→ **résistant jusqu'à des doses de 150Mrad** (*dose max pour 3000fb-1 dans le tracker: 60Mrad*)
→ Quelques problèmes non bloquants ont été identifiés et compris
→ seront corrigés dans la version **CIC2.1**.

Run final : contiendra CIC2.1 et CIC2 en solution de secours (*pas de surcoût*).

→ **Engineering run (final) fin février 2021**. Tests du CIC2.1 entre Mai et Juillet 2021. Production finale à l'automne. Contrôle de la production (*test sur wafer complet*) externalisé.

Personnel IP2I sur le projet CIC

En décembre 2020 :

Chercheurs (1.3 ETP): S.Viret (Resp. scientifique, CR 0.8), S.Jain (CDD post-doc 0.5)

ITA (2.2 ETP): L.Caponetto (Resp. technique, IR 1.0), G. Galbit (IR 0.2), B.Nodari (IR 1.0)

Pas de besoins supplémentaires envisagés.

Construction et intégration des bouchons

iP
LES 2 INFINIS
LYON

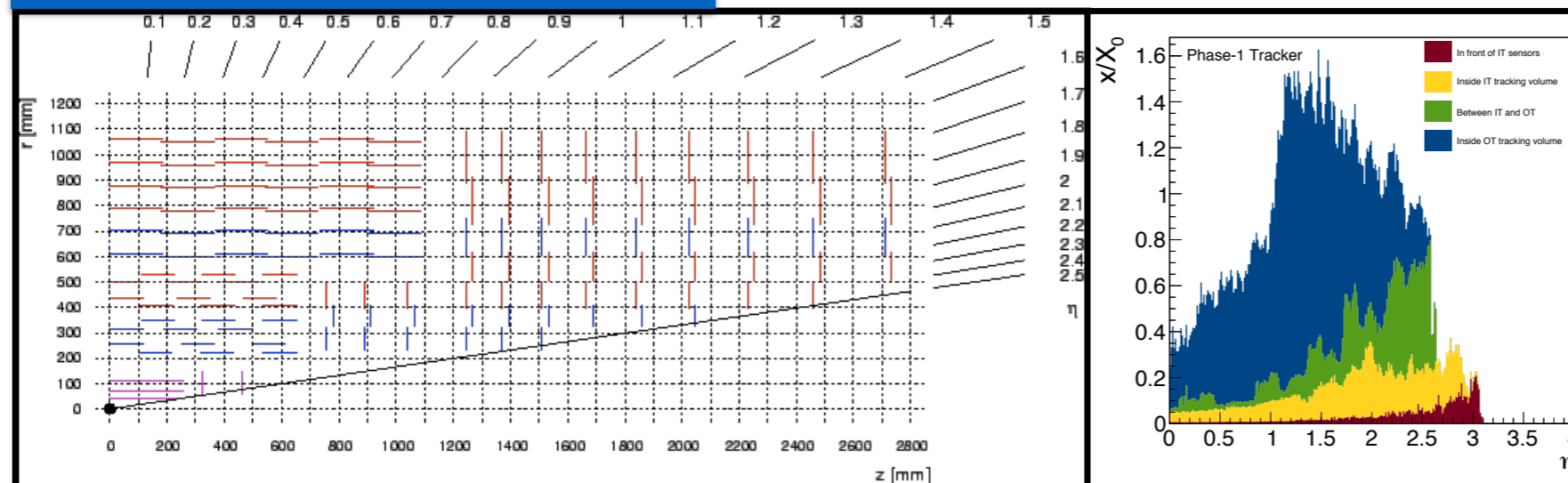
2i

20

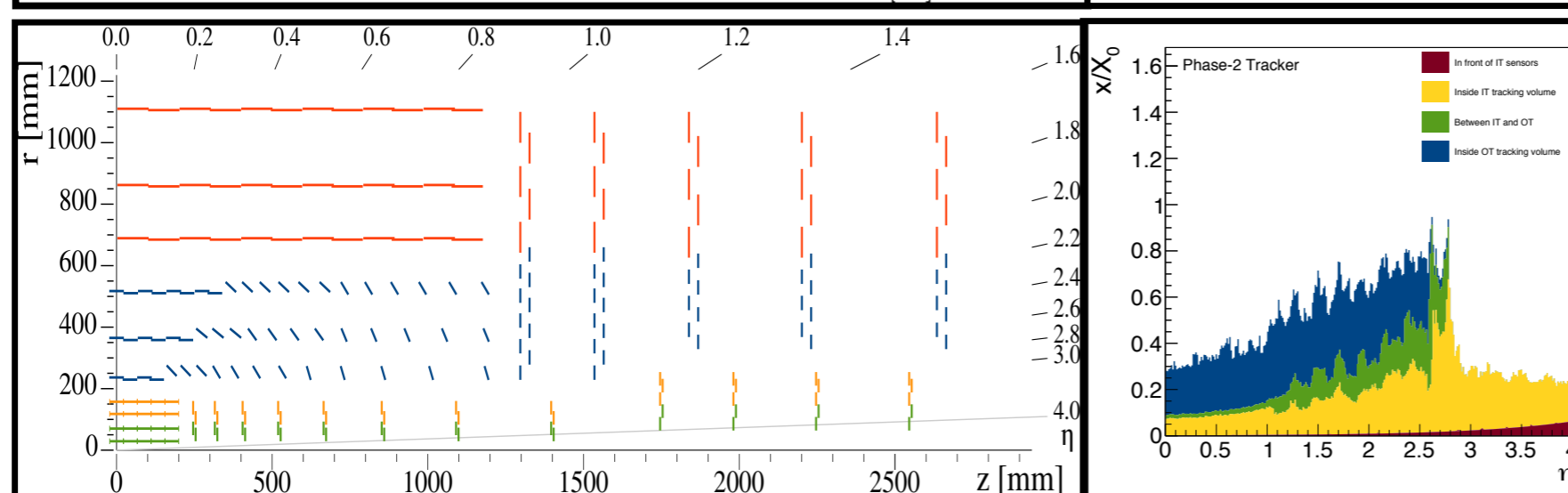
20

Un détecteur plus transparent

Trajectographe actuel



Trajectographe phase 2



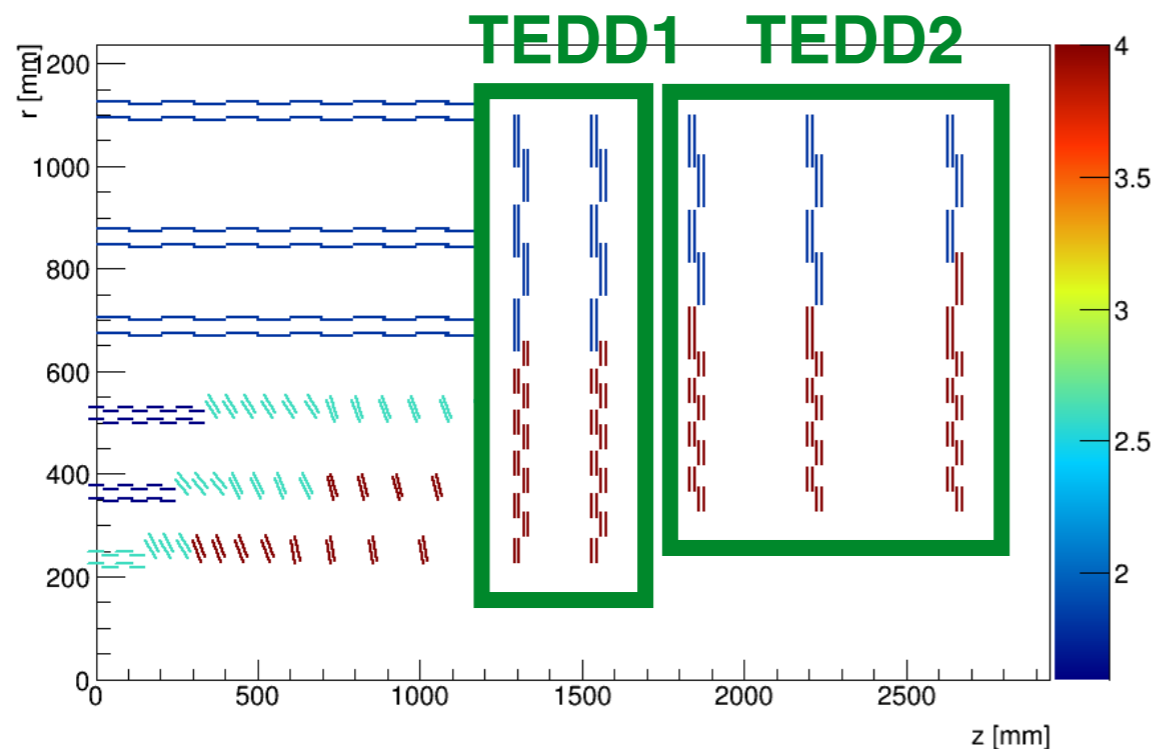
<https://cds.cern.ch/record/2272264>

- Réduction du nombre de couches traversées
- Modification des structures de support
- Lecture/contrôle des modules par fibres optiques bidirectionnelles à très haut débit
- Modification du système de refroidissement (CO₂ biphasé)
- Electronique de lecture basse puissance

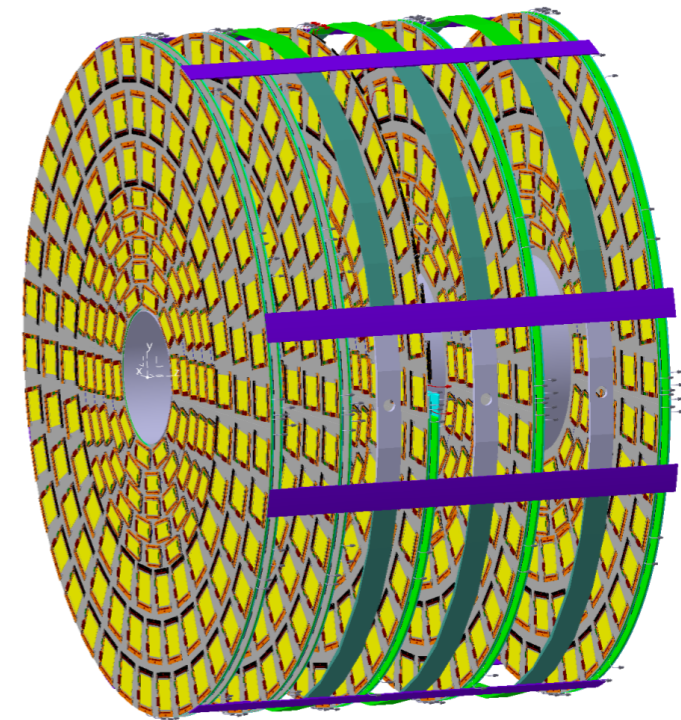
→ Réduction jusqu'à un facteur 2 de la quantité de matière traversée

Le projet TEDD

Tracker Endcap Double Discs



Geometrie du trajectographe phase 2



Superstructure TEDD

Un **TEDD** est fait de 5 double-disques. Chaque disque est fait de 2 **Dees**.

A l'IP2I :

CORE:
1.2MCHF →

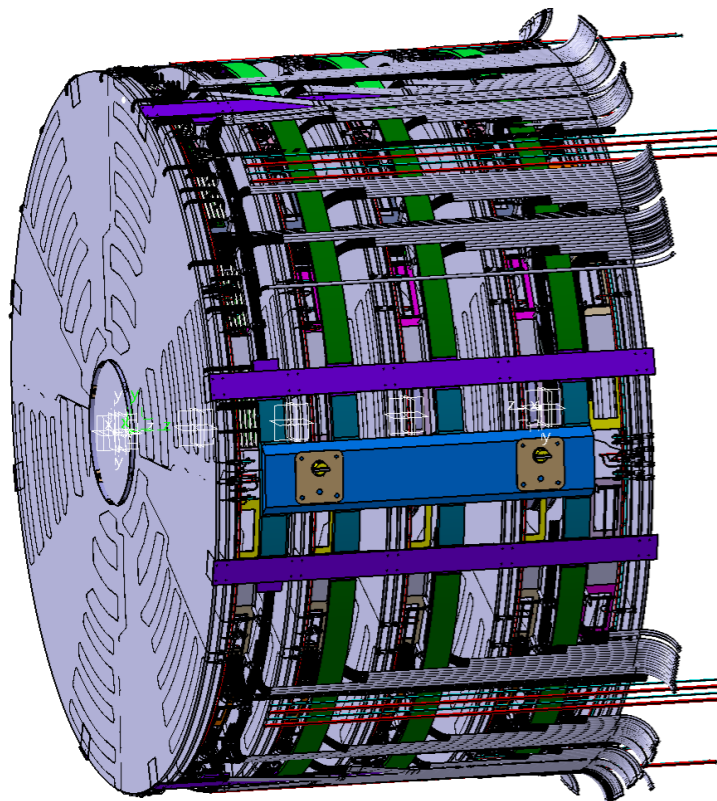
- 1) **Conception** de tous les types de **Dees**
- 2) **Construction** et **qualification** de tous les **Dees** du **TEDD2** (24)
- 3) **Montage et tests des modules** sur 12 de ces Dees
- 4) **Conception de la superstructure mécanique du TEDD**

L'expertise de l'IP2I dans ce domaine est reconnue (réalisation d'un des bouchons du trajectographe actuel).

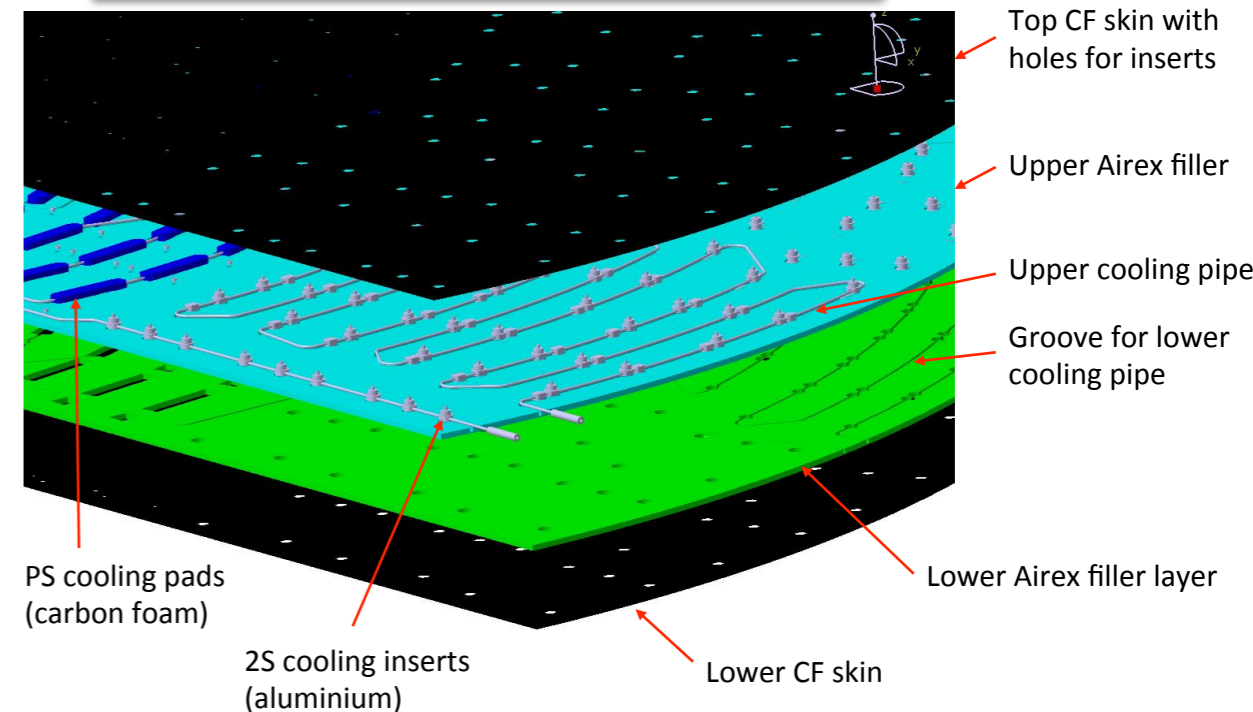
Conception des structures mécaniques

Le concept du Dee :

- **Tuyaux de refroidissement au CO₂ biphasé (-35°C)** pris dans une **structure composite**
- Nécessaire pour évacuer la puissance dissipée par les pT-modules: ΔT entre CO₂ et modules doit être $< 10^\circ\text{C}$
- **IP2I inventeur du concept des Dees**
- Premier design complet (2017), mise à jour en cours pour la préproduction



Structure en sandwich d'un Dee

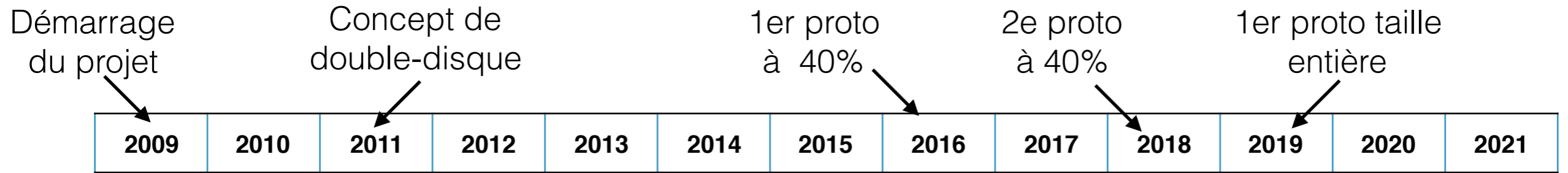


Superstructure du TEDD :

- **Concept de double-disque**: complètement nouveau, proposé par l'IP2I
- En **fibre de carbone** : léger et rigide
- Doit tenir dans l'enveloppe géométrique attribuée au TEDD (déformation maximale $< 1\text{mm}$)
- **Raffinement de la superstructure en cours**, inclusion des services (conçus par Louvain)
- Prototypes à construire et finalisation du modèle en 2021

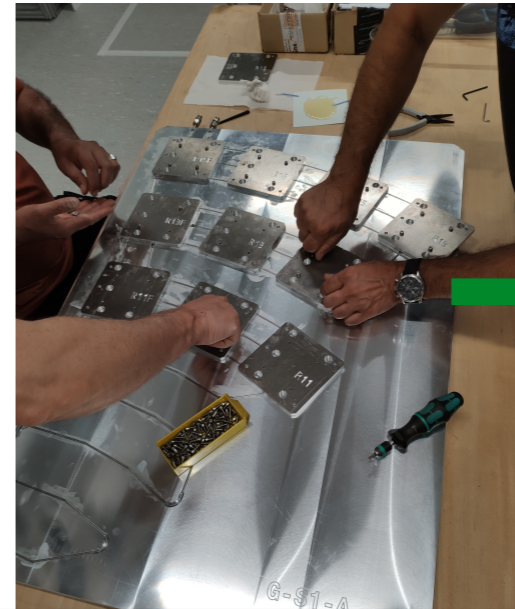
Superstructure TEDD avec tubes de refroidissement et câbles électriques

Prototype de Dee de taille entière

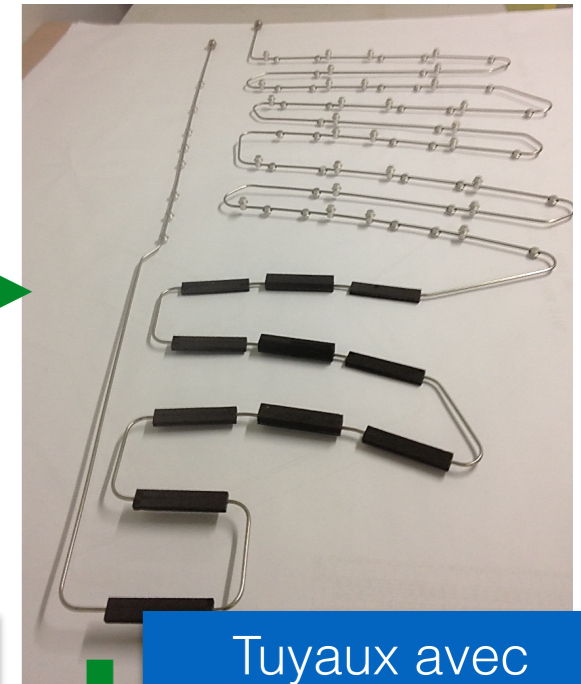


Les prototypes :

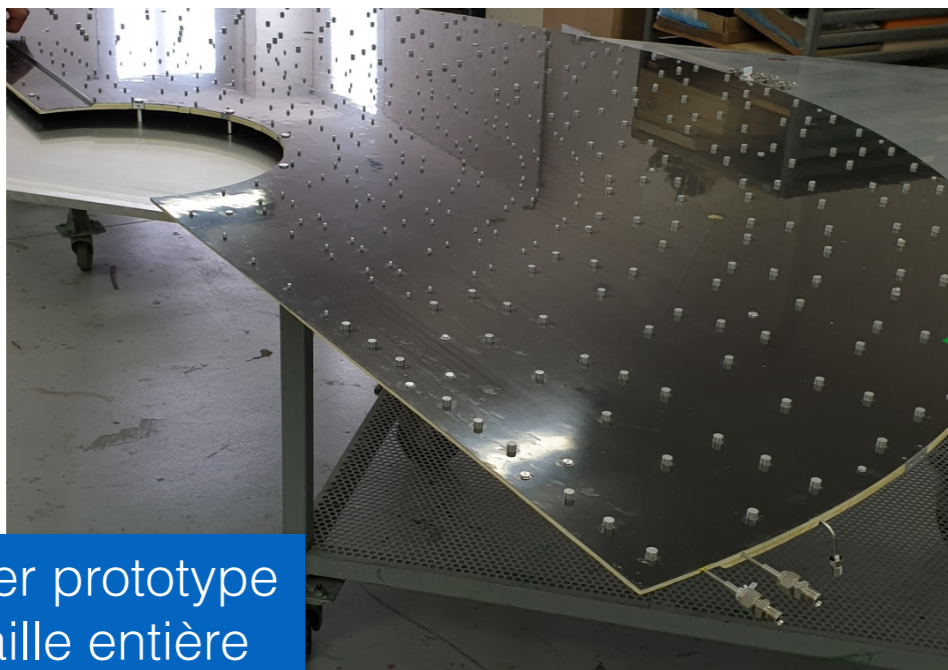
- L'IP2I a été le **premier de la collaboration TEDD à construire un proto entier (2019)**.
- Très utile pour définir les protocoles de construction et procédures de qualification
- Construction en collaboration avec Minitube (Grenoble) et Workshape (Valence)
- Même procédure prévue pour la production



Collage inserts et mousses de carbones (IP2I)



Tuyaux avec inserts et mousses



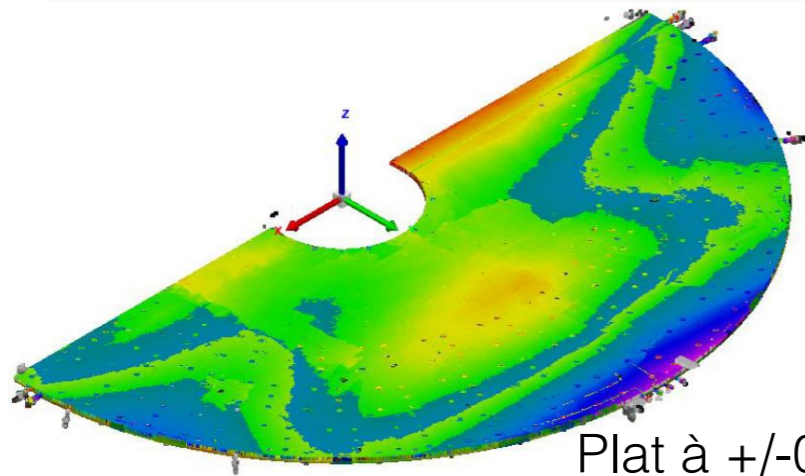
Premier prototype de taille entière



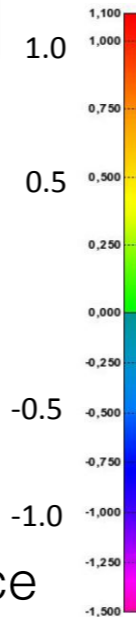
Collage des peaux en fibre de carbone à **Workshape**

Tests thermiques et mécaniques des Dees

1) Mesures mécaniques (IP2I)



Plat à +/-0.5mm sur presque toute la surface



Salle propre LIO au bât. Vander Graaf (IP2I)



2) Dee équipé de faux modules et de sondes de température (IP2I)



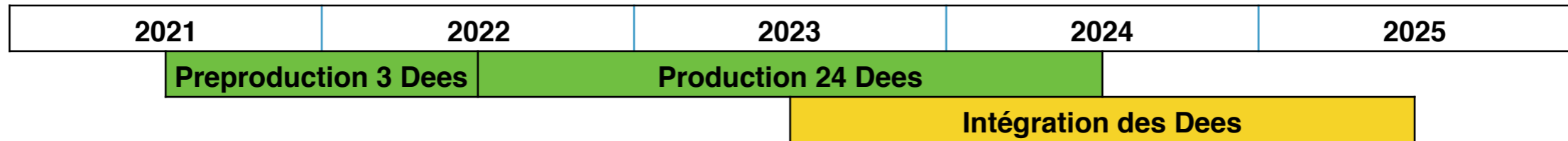
Résultats des mesures mécaniques :

- Planéité : respecte les spécifications
- Précision sur la position des inserts satisfaisante

Résultats des mesures thermiques :

- Modules 2S: $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ OK
- Modules PS: $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ pour une face, l'autre 2°C plus haut
- Nouveau prototype en construction avec un procédé amélioré (début 2021)

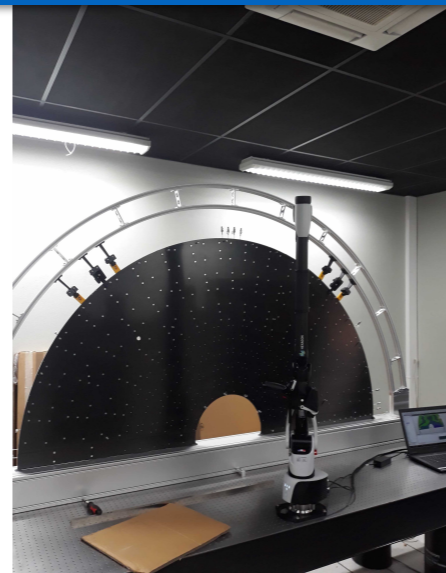
Perspectives : la phase de construction



Construction des Dee (IP2I et collage final à Workshape)



Qualification mécanique (IP2I)

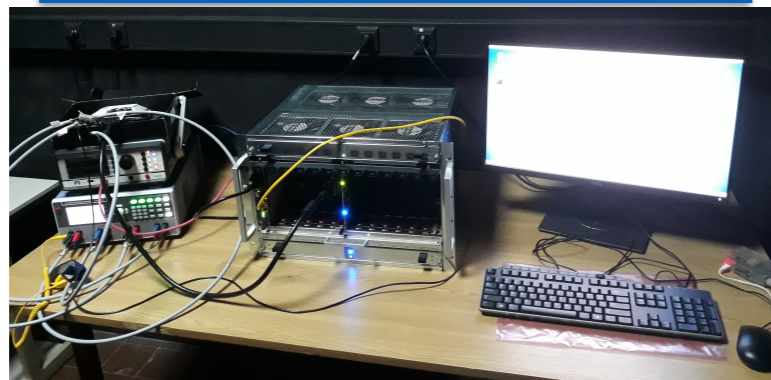


Qualification thermique (IP2I)

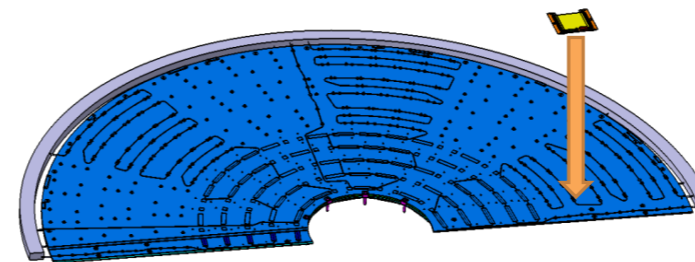


Production, qualification

Tests à réception des modules (IP2I)



Montage des modules + tests (IP2I)



Tests à froid des Dees après montage (IP2I)



Intégration des Dees

Note: Construction/qualification des Dees du TEDD1: DESY.
Montage et tests des modules sur les Dees: IP2I, DESY et UCLouvain

Personnel IP2I sur le projet TEDD

En décembre 2020 :

Chercheurs (1.3 ETP): N.Chanon (Resp. scientifique, CR 0.5), M. Vander Donckt (MCF 0.2), C. Bernet (CR 0.2), P. Depasse (PU 0.1), S.Jain (CDD post-doc 0.2)

ITA (5.3 ETP): N. Lumb (Resp. technique, IR 0.7), T. Dupasquier (IE 0.9), E.Schibler (IE 0.5), F.Schirra (IE 0.9), A.Eynard (AI 0.4), L. Germani (T 0.4), M.Bouhelal (T 0.4), M.Marchisone (IR 0.5), P.Calabria (IE 0.2), F.Charlieux (IE 0.1) + aides ponctuelles

Evolution dans les prochaines années :

- Sept. 2021: **Doctorant LIO à 50%** sur le TEDD (et 50% analyse de physique)
- **Personnel à identifier : IR expertise DAQ** pour l'Intégration
- On s'attend à un renfort des physiciens pour l'Intégration (en discussion).
- Nous avons le support du labo pour la phase de construction avec une augmentation prévue du volume ETP pour les ITA.

Conclusions

Concentrateur de données :

- Composant crucial de l'électronique frontale du futur trajectographe
- **Premier ASIC complet réalisé à l'IN2P3 dans la technologie 65 nm**
- Engineering run (final) fin février 2021.
- Tests du CIC2.1 entre mai et juillet 2021.
- Production finale à l'automne 2021.

Construction et intégration des bouchons :

- IP2I inventeur du concept des Dees et des double-disques
- **Premier prototype de Dee de taille entière** construit et testé, un nouveau sera construit début 2021
- Début de la pré-production prévu pour mi-2021, production pour mi-2022
- Les préparations en vue de l'intégration sont en cours

**Merci pour
votre attention**

iP2i
LES 2 INFINIS
LYON

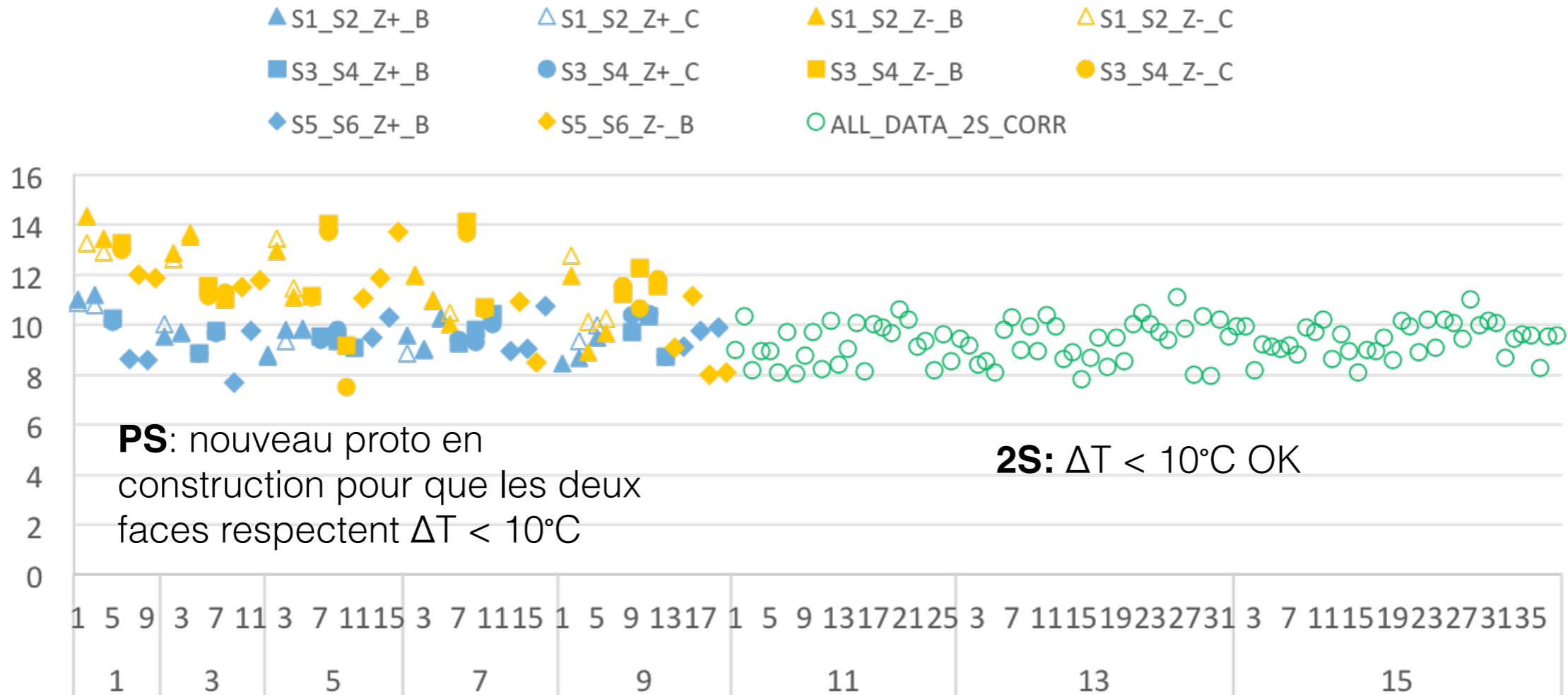


20

20

Resultats des mesures thermiques des Dees

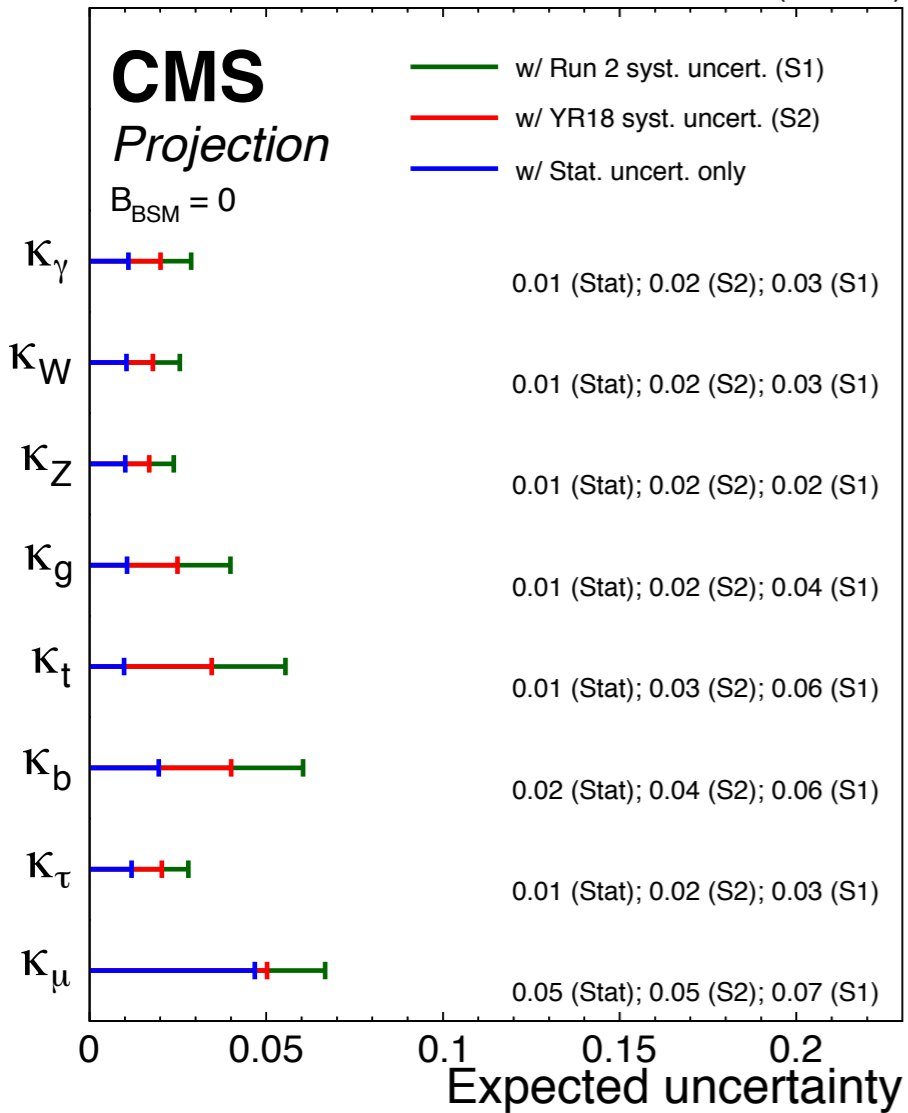
DeltaT vs module no.



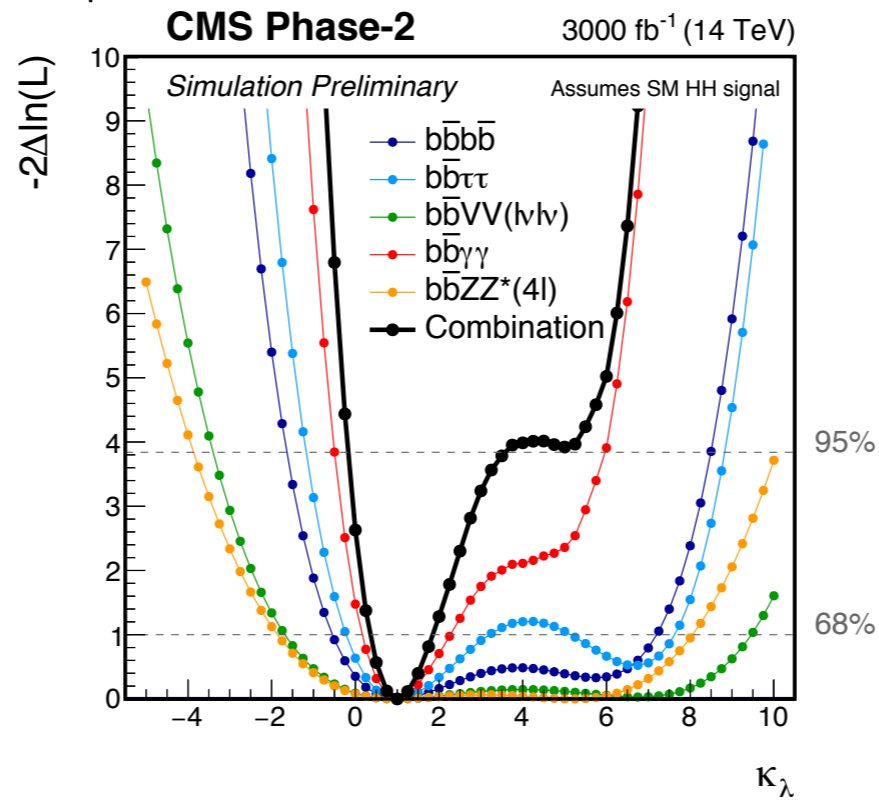
Physics prospects at the HL-LHC

Higgs couplings: 2-5% precision
<https://cds.cern.ch/record/2647699>

3000 fb⁻¹ (13 TeV)

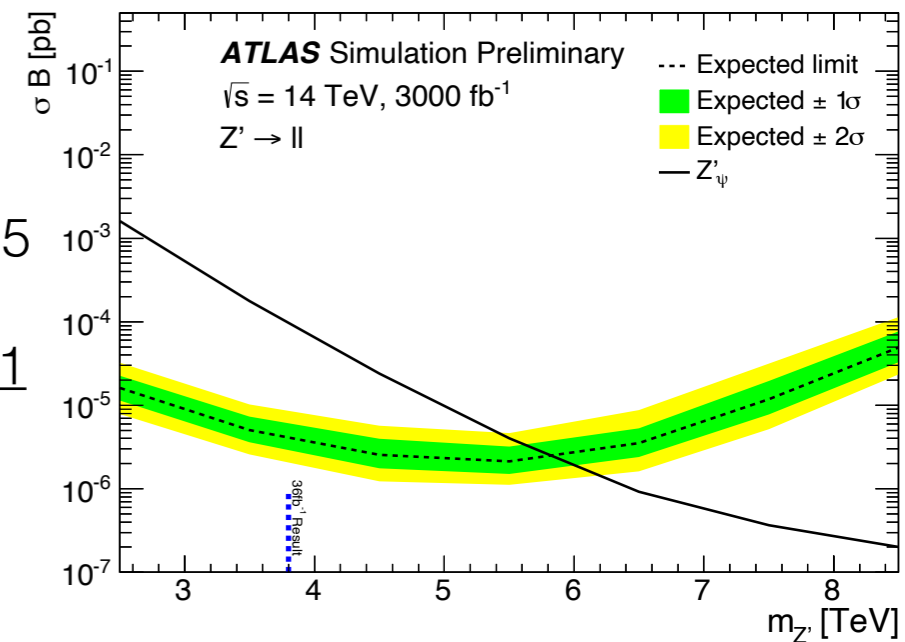
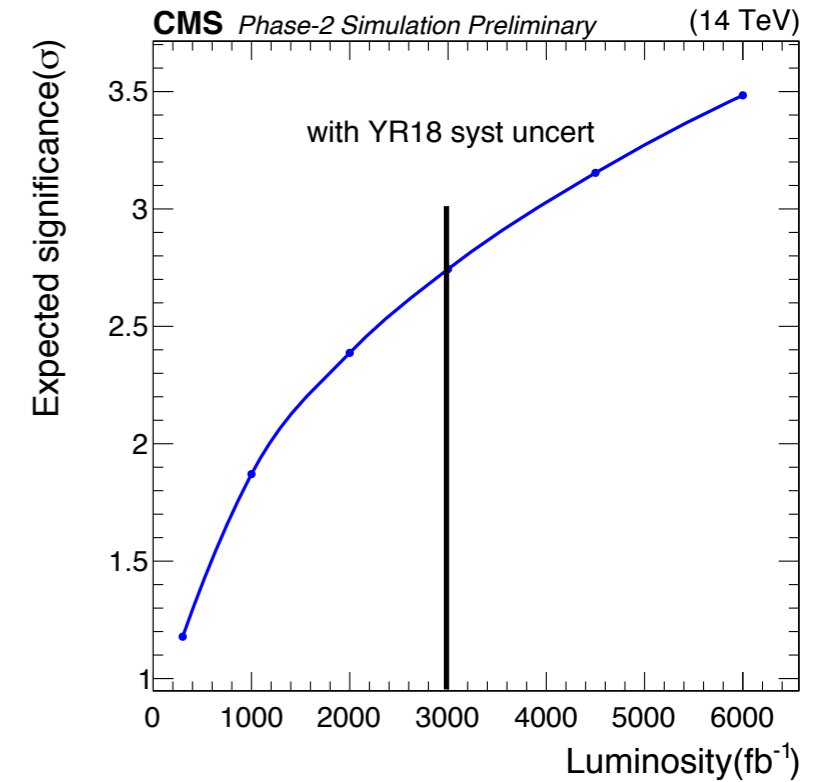


Higgs self-coupling: ~60% precision
<https://cds.cern.ch/record/2652549>

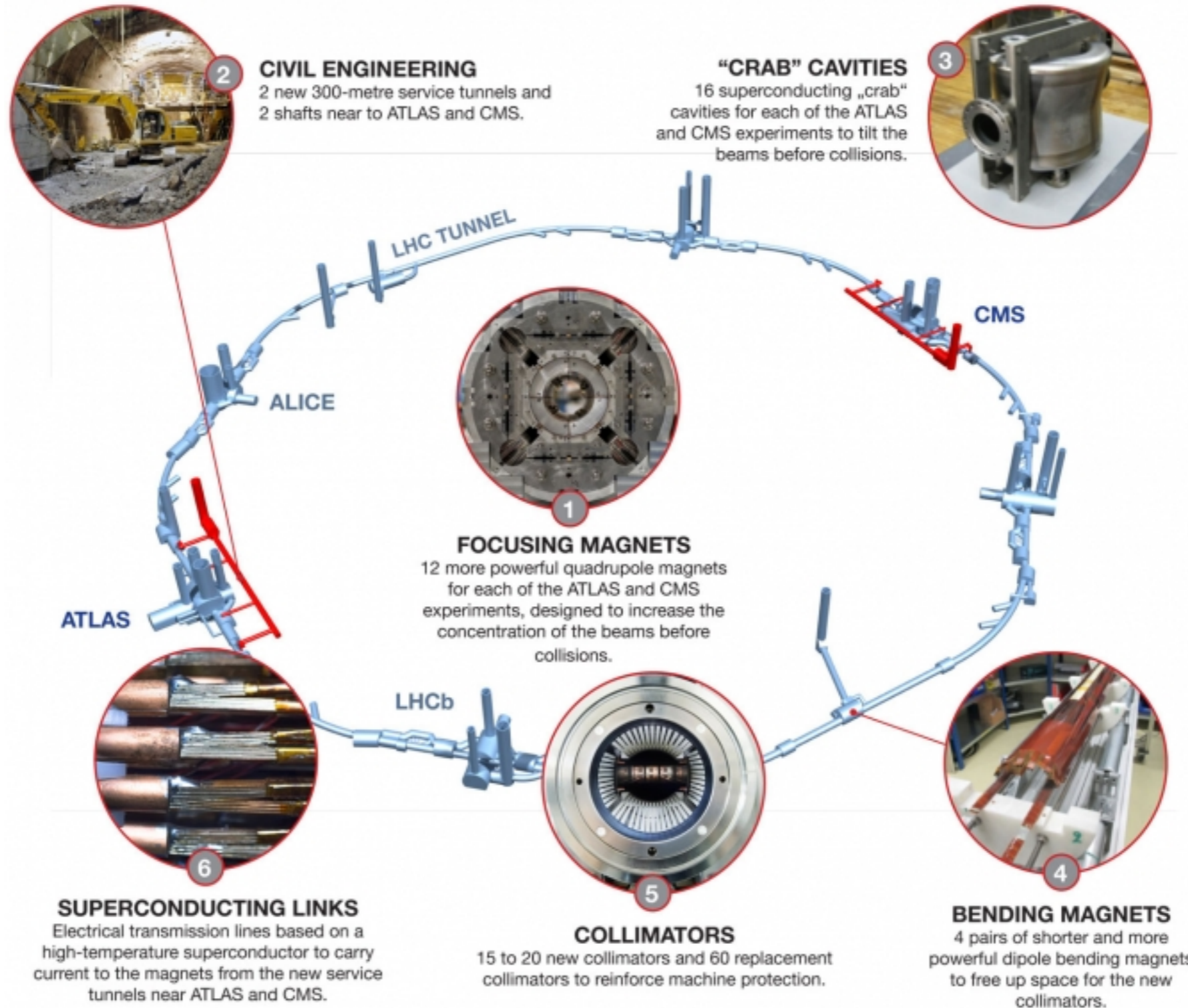


Z' boson: extend reach from 4.5 TeV (today) to 6.5 TeV
<https://arxiv.org/abs/1812.07831>

Longitudinal W-boson scattering: nearly 3σ evidence
<https://cds.cern.ch/record/2647699>



HL-LHC work



The future CMS detector at HL-LHC

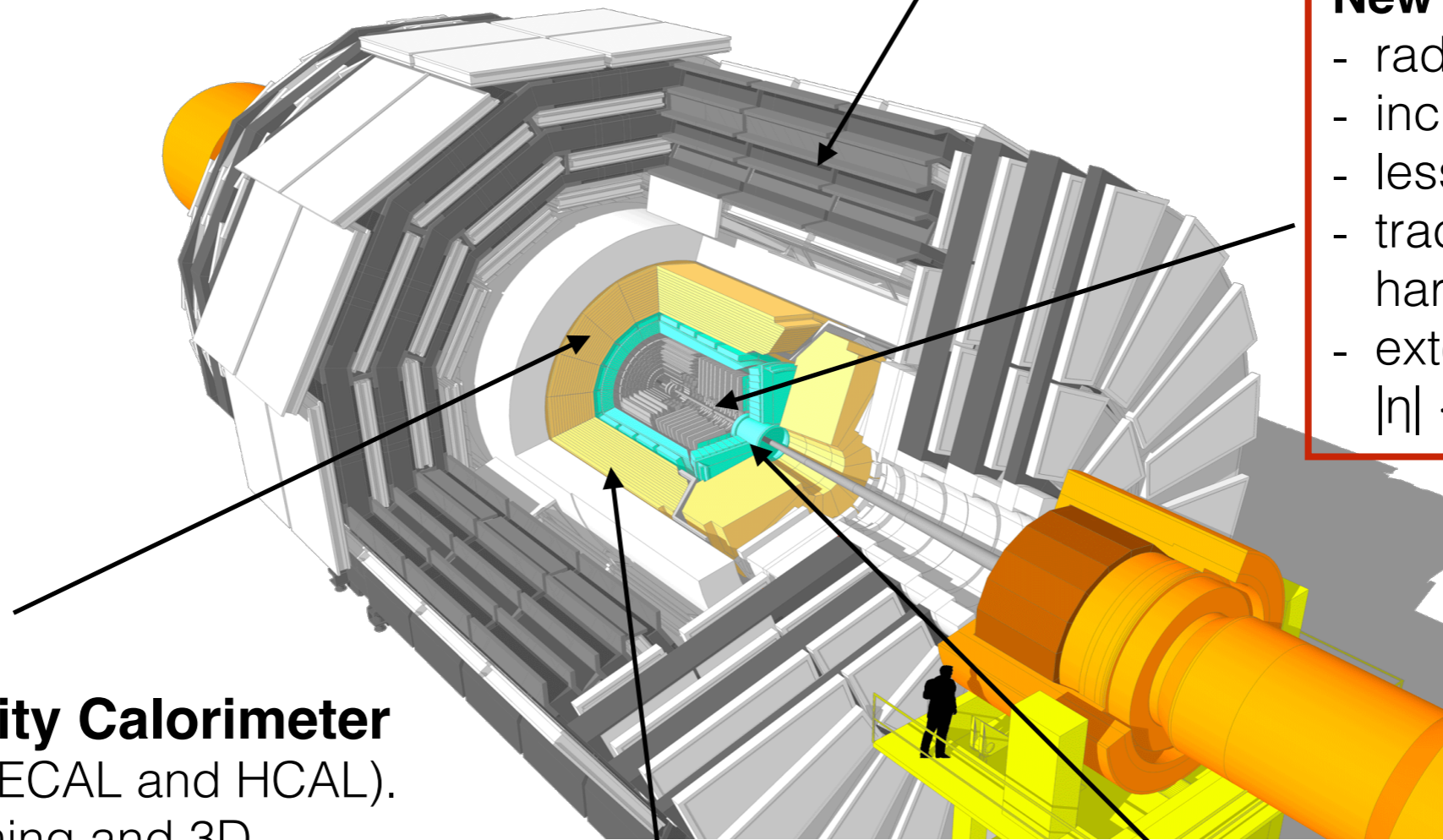
Trigger and Data acquisition

- Tracks used in hardware trigger at 750 kHz (was 100 kHz, no tracking)
- Data acquisition at 7.5 kHz (was 1 kHz)

Muon system: additional muon chambers, new electronics, extended coverage to $|\eta| < 3$

New Tracker:

- radiation tolerant,
- increased granularity,
- less material,
- tracks used in hardware trigger,
- extended coverage to $|\eta| < 4$



High Granularity Calorimeter
(replace endcap ECAL and HCAL).
Precise timing and 3D
electromagnetic/hadronic showers

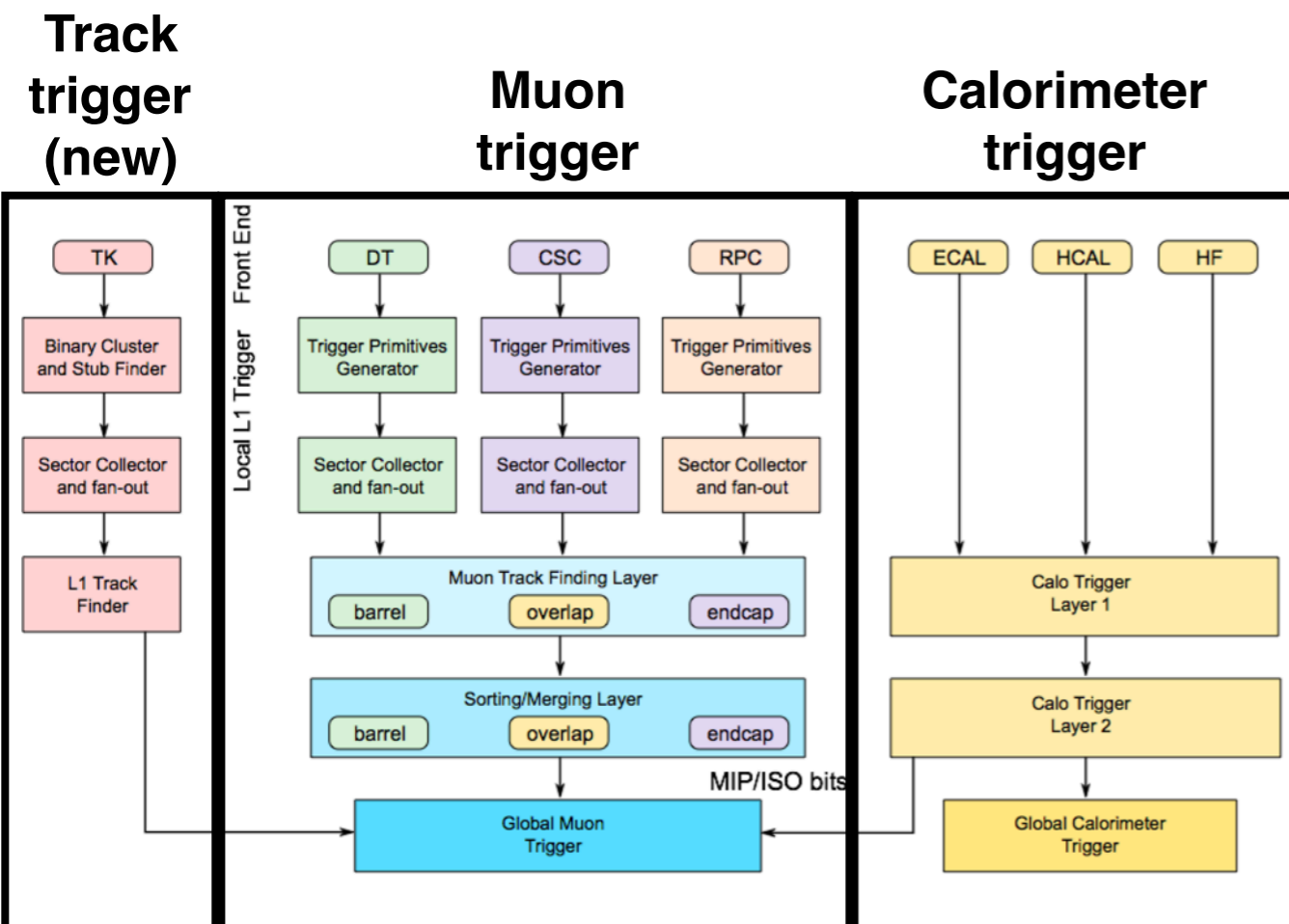
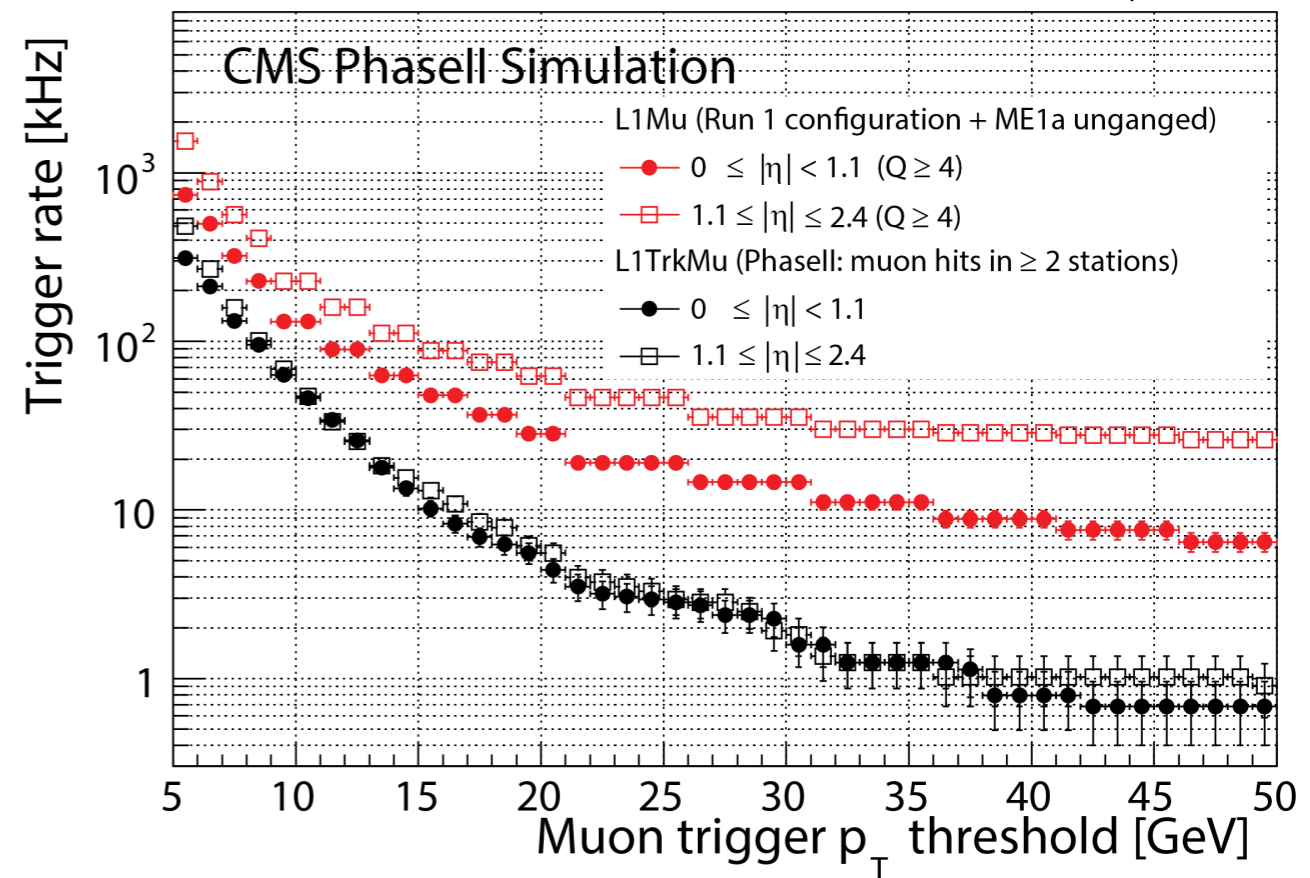
**Barrel Electromagnetic
Calorimeter**
Replace electronics

**New MIP timing
detector**
30 ps resolution

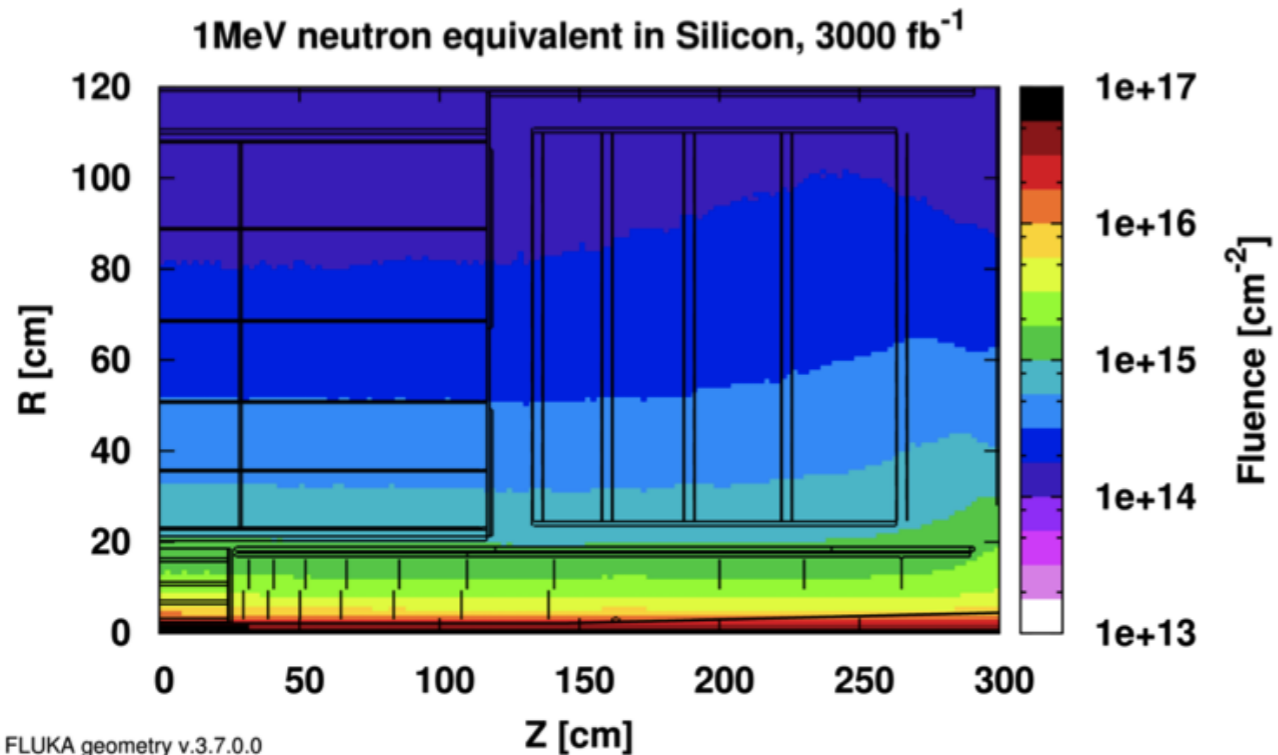
Why tracks in hardware trigger?

- **Hardware (“level 1”) trigger:** first selection of collision events for later storage, based on decision taken in the electronics of calorimeter and muon detectors
- If not using the tracker, trigger rates will increase dramatically at the HL-LHC: data will be overwhelmed with pileup collisions
- A **combination of muons and tracker** decreases trigger rate to an acceptable level

PU = 140, 14 TeV

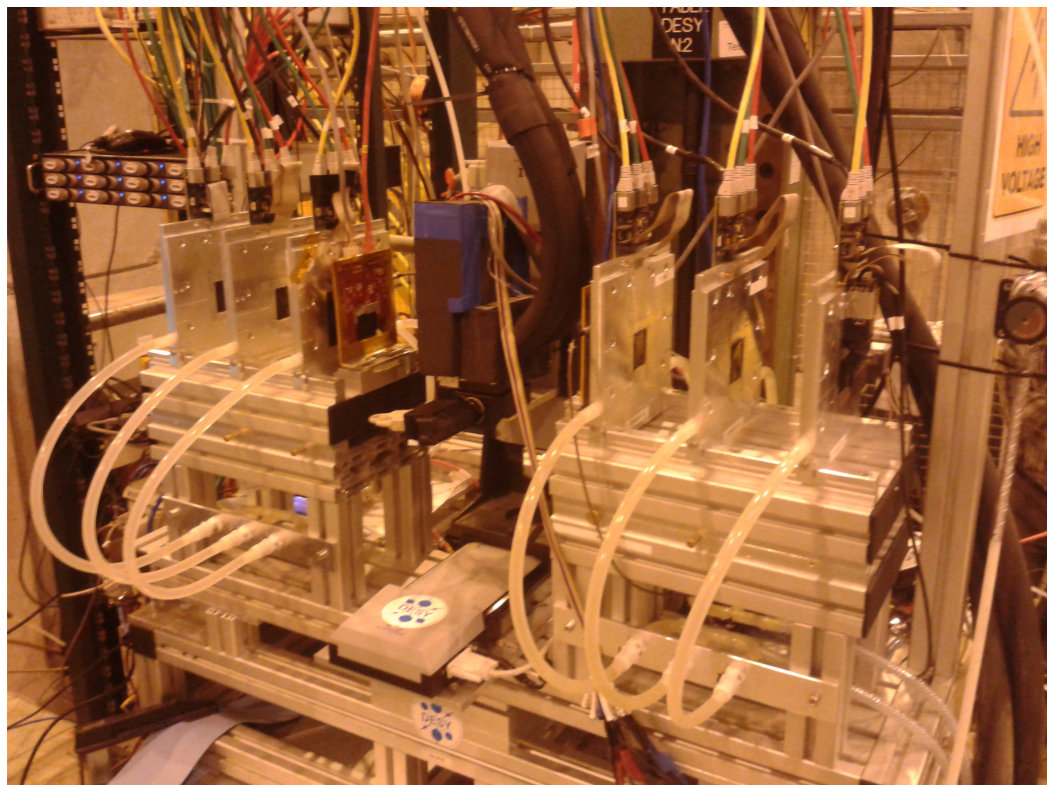


Measuring module tolerance to radiations



Beam test campaigns:

- Irradiate prototype module sensor and electronics at the expected dose of HL-LHC
- Beam-test of irradiated modules
- Loss of ~2.5% efficiency at high track momentum is acceptable
- A vast program of testing other electronics component is ongoing



Beam test at CERN SPS

