



Calorimètre Haute Granularité pour CMS (projet HGCal)

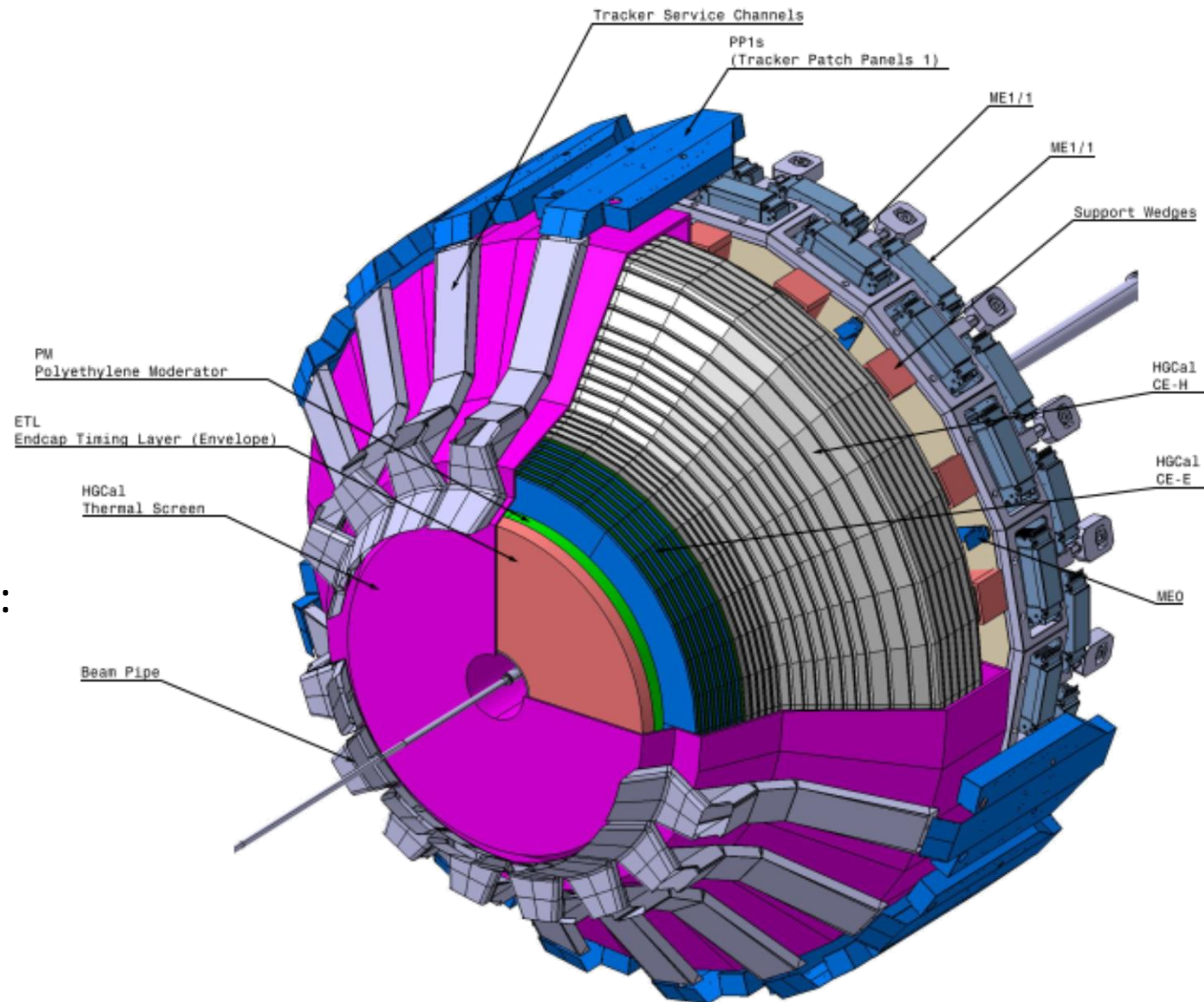
Journées Techniques Détecteurs IN2P3

31 Mai 2021

PIERRE-EMILE Thomas

Sommaire

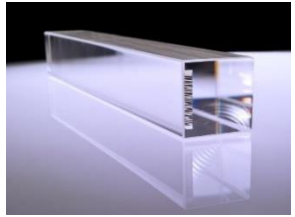
- Contexte et historique
- La mécanique dans HGCal :
 - Le calorimètre Hadronique : CE-H
 - Le calorimètre Electromagnétique : CE-E
 - Gestion du refroidissement
 - L'intégration et le câblage de l'électronique
 - Les outillages
- Les implications et réalisations du LLR



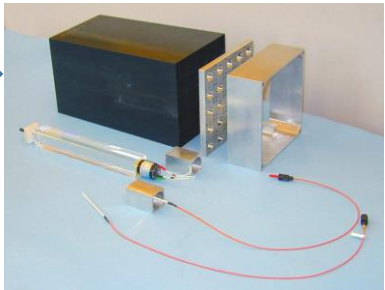
*Vue iso du détecteur HGCal
Une animation des principes d'assemblage
mécanique du détecteur est accessible [ici](#)*

Contexte et historique

Le projet HGCal

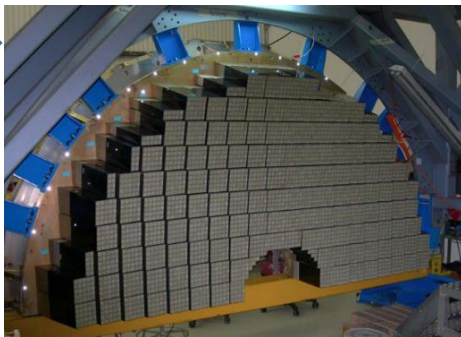


Vue d'un cristal de $PbWO_4$

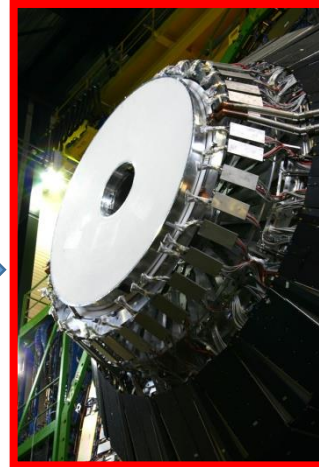
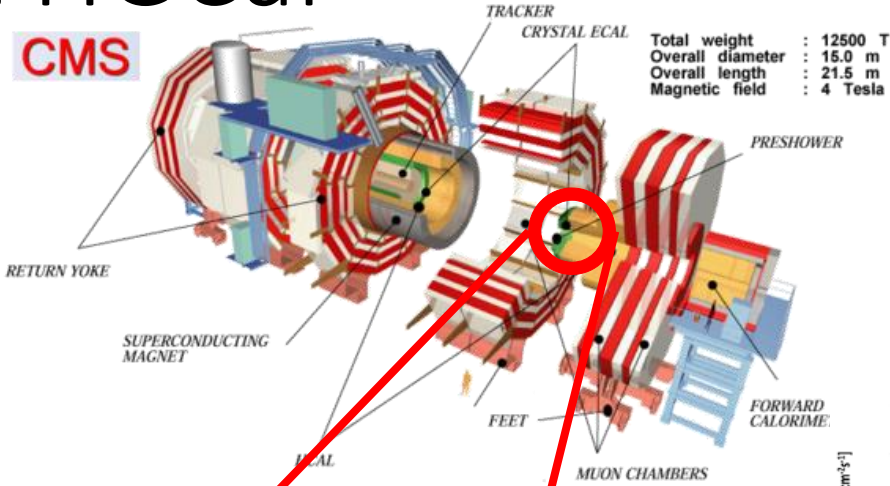


Vue d'une structure alvéolaire supportant les cristaux

Deux vidéos d'intégration au CERN en 2007 et 2008 accessibles ici :
 - [Vidéo 1](#)
 - [Vidéo 2](#)



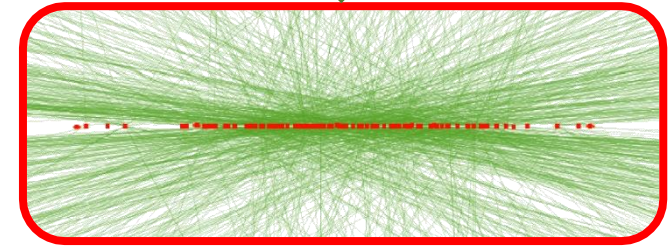
Vue d'un demi Ecal en cours de montage



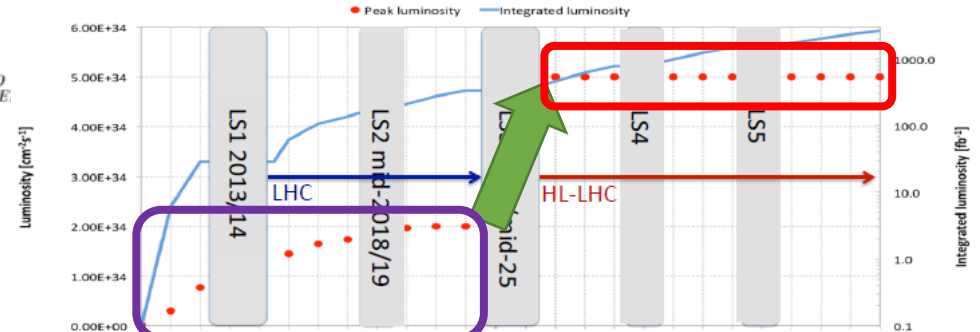
Vue du Ecal actuel des bouchons de CMS (Compact Muon Solenoid)



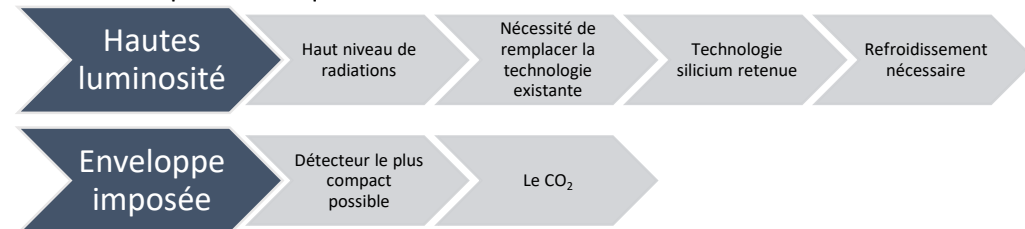
État actuel



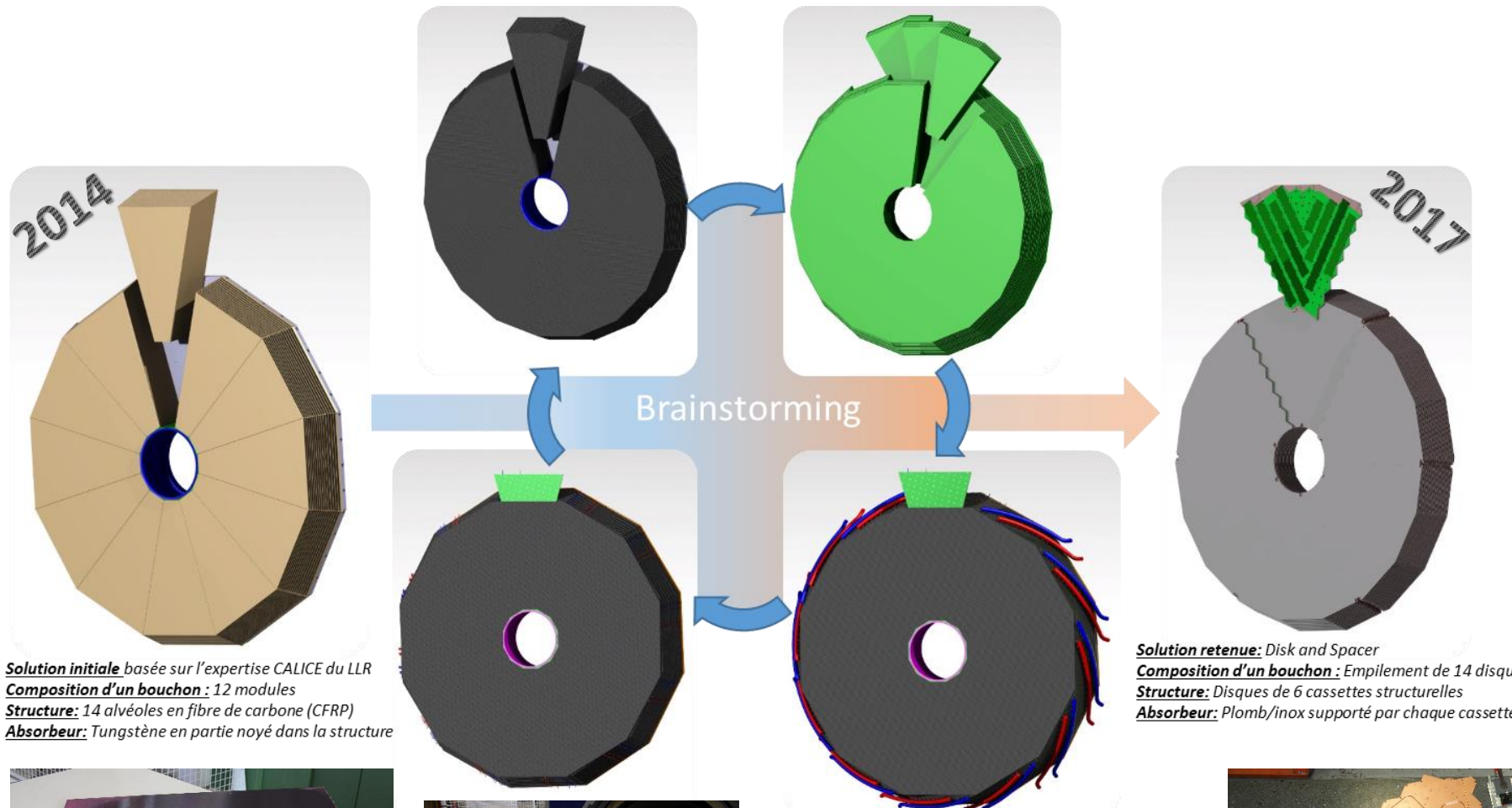
HGCal



- Début du projet : 2014 inspiré de la R&D CALICE au LLR (cf. backup)
- Objectif : Remplacer les bouchons actuels du détecteur CMS
- Quand : Durant le Long Shutdown 3 (entre 2025 et mi 2027) dans la période Haute Luminosité du LHC (HL-LHC)
- Plusieurs problématiques :



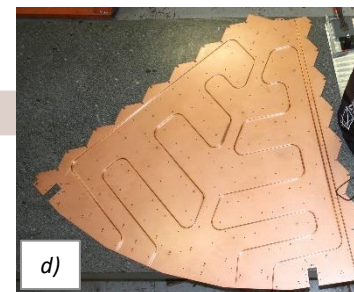
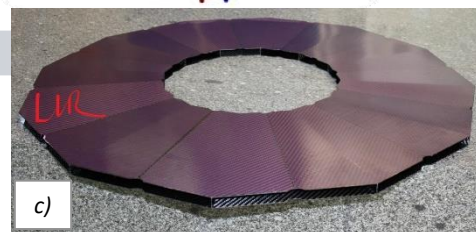
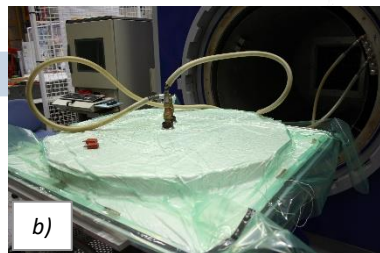
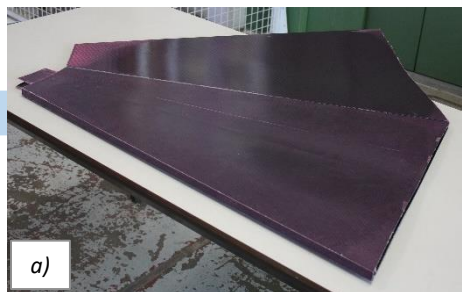
Historique de conception au LLR



Solution initiale basée sur l'expertise CALICE du LLR
Composition d'un bouchon : 12 modules
Structure : 14 alvéoles en fibre de carbone (CFRP)
Absorbeur : Tungstène en partie noyé dans la structure

Solution retenue: Disk and Spacer
Composition d'un bouchon : Empilement de 14 disques
Structure : Disques de 6 cassettes structurales
Absorbeur : Plomb/inox supporté par chaque cassette

- Processus itératif
- Plusieurs prototypes ont été produits essentiellement pour:
 - Démontrer la faisabilité des concepts
 - Evaluer les coûts
- Au terme de ce processus et des échanges avec le CERN, la solution tungstène et fibre de carbone a été mise de côté jugée trop onéreuse et contraignante en terme de production
- On a privilégié une solution avec des cassettes structurales et du plomb



prototypage →

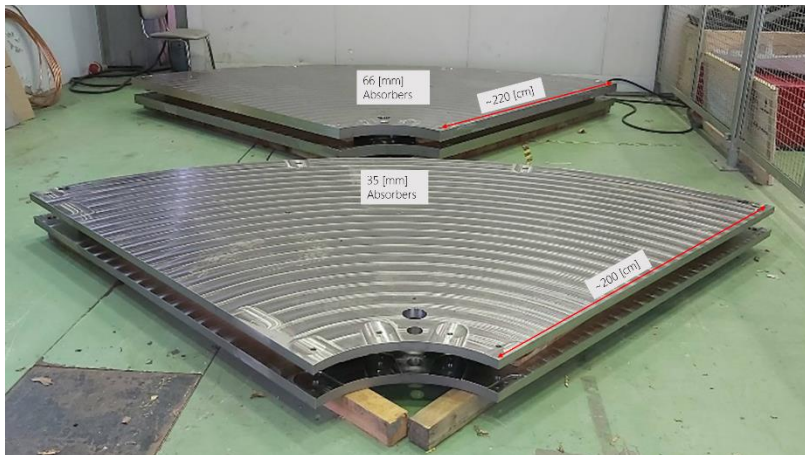
a) Une alvéole en fibre de carbone (2015)
 b) Moule sous bâche autoclave d'une roue en carbone (2016)
 c) Prototype d'une roue en carbone (2016)
 d) Prototype d'une cassette en cuivre (2019)

La mécanique dans HGCal

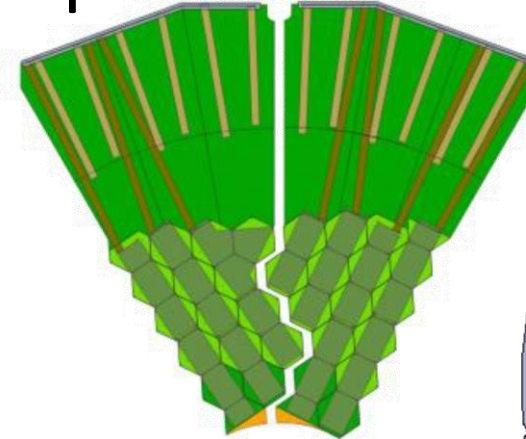
Le Calorimètre Hadronique CE-H

Quelques chiffres clés

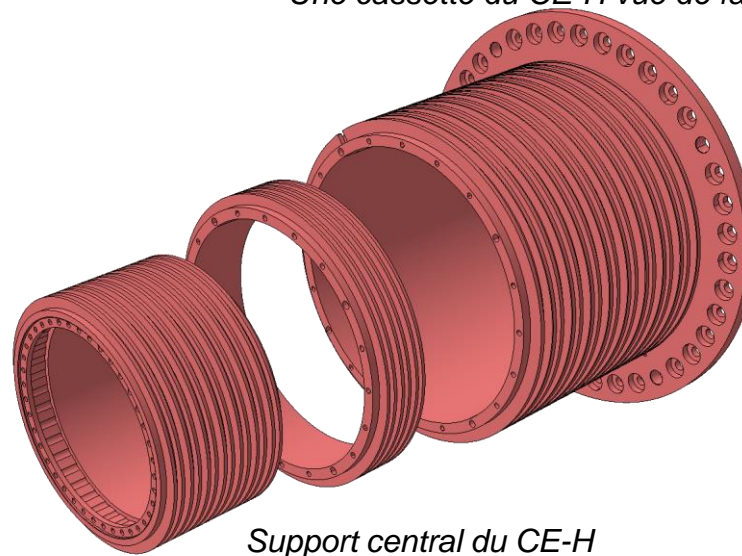
- 22 couches de cassettes équipées sur une face
 - 8 couches 100% Silicium
 - 14 couches hybrides (Silicium + Scintillateurs)
- 23 couches d'absorbeur en acier inox
- Rayon extérieur $\approx 2\,500\text{mm}$
- Epaisseur $\approx 1609\text{mm}$
- Poids $\approx 230\text{t}$



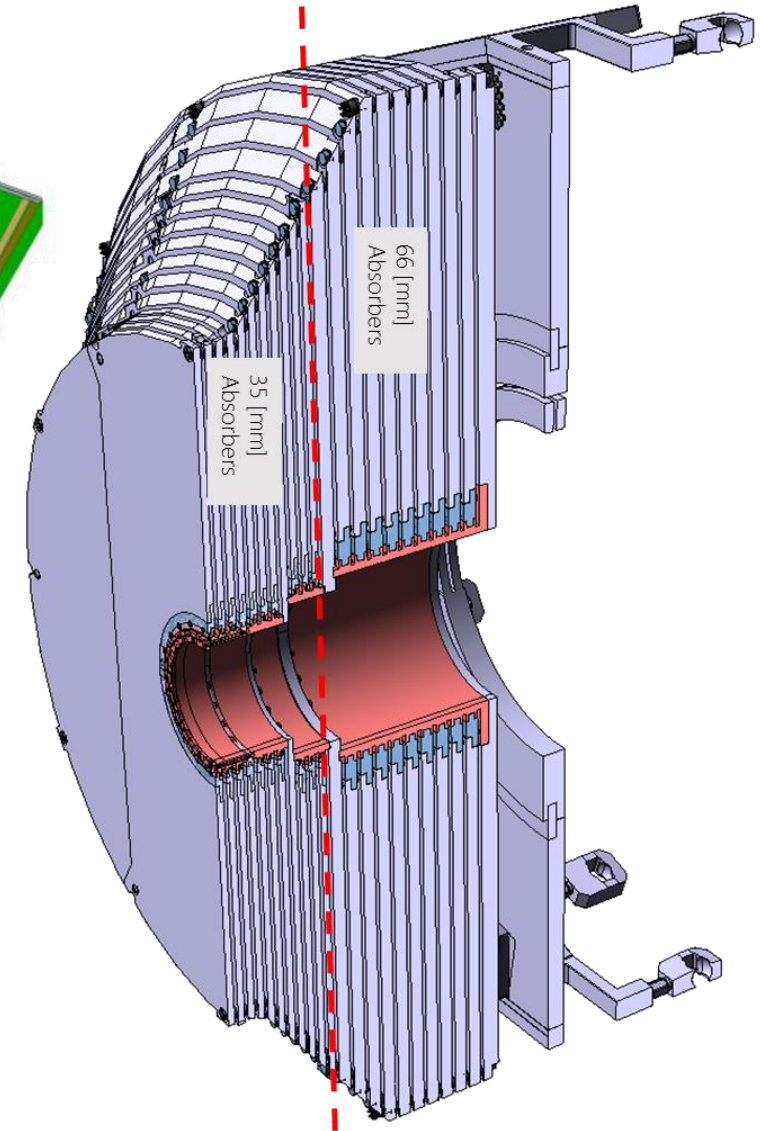
Premier prototype d'absorbeur pour le CE-H



Une cassette du CE-H vue de face



Support central du CE-H

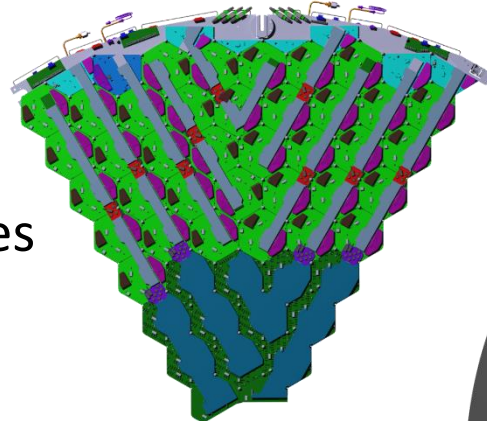


Vue en coupe du CE-H

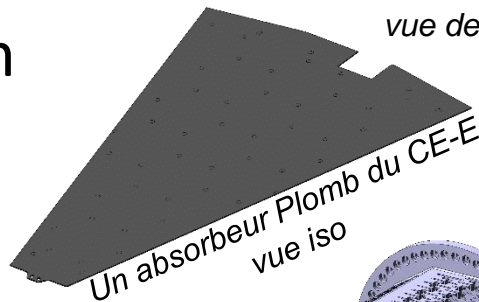
Calorimètre Electromagnétique CE-E

Quelques chiffres clés

- 14 couches de cassettes équipées sur les deux faces
 - Entièrement équipées de modules en silicium sur chaque face
- 14 couches d'absorbeur en plomb
- Rayon extérieur $\approx 1\ 650\text{mm}$
- Epaisseur $\approx 415\text{mm}$
- Poids $\approx 20\text{t}$



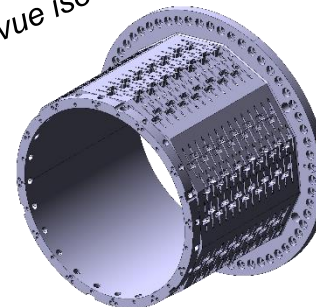
Une cassette du CE-E
vue de face



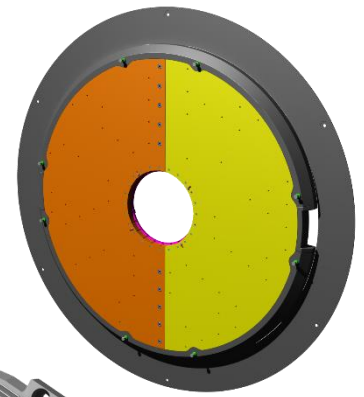
Un absorbeur Plomb du CE-E
vue iso



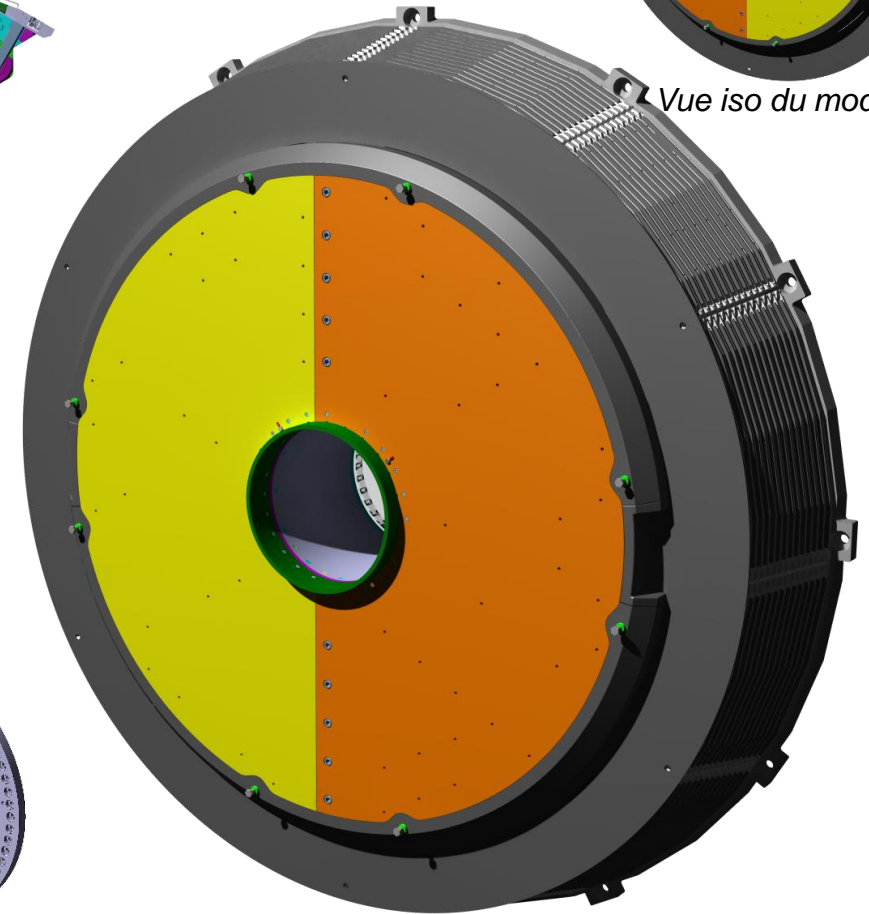
Premiers prototypes de
cassettes de CE-E



Support central du CE-E en
vue iso



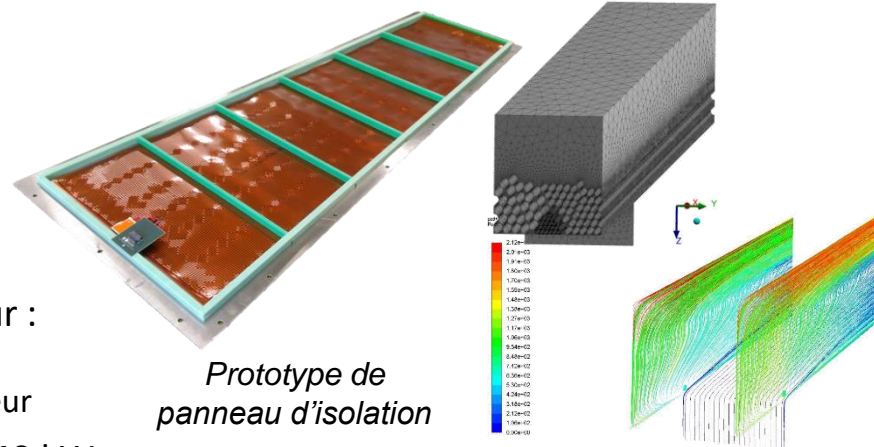
Vue iso du modérateur



Vue iso du CE-E

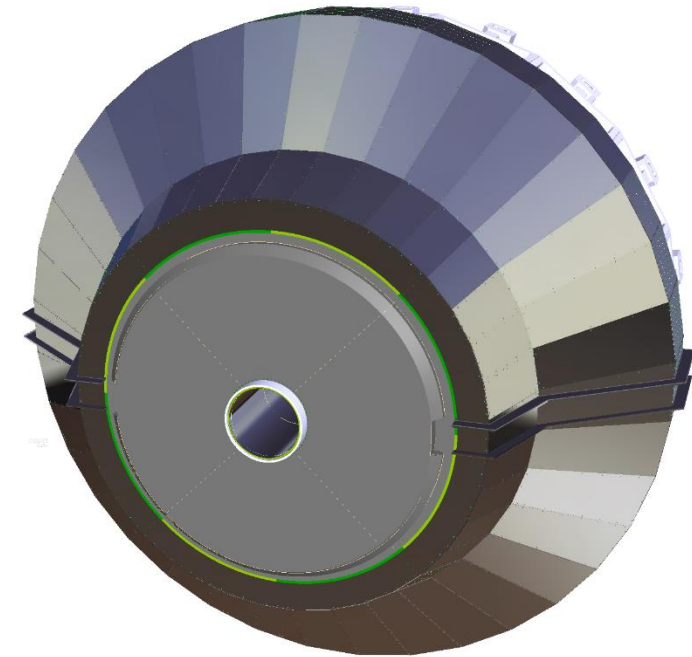
Gestion du refroidissement

- Température de service : -35°C
- Refroidissement par CO_2 diphasique
- Réutilisation des lignes existantes
- Un bouclier thermique est nécessaire pour :
 - Isoler chaque bouchon de l'extérieur
 - Garantir un environnement sec à l'intérieur
- Puissance frigorifique de l'installation ≈ 140 kW

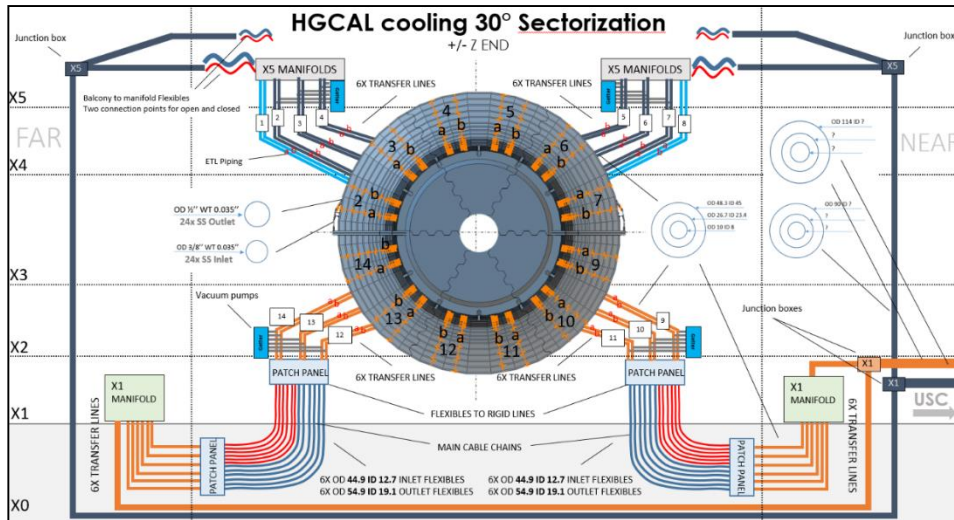


Prototype de panneau d'isolation

Simulation de la circulation d'air

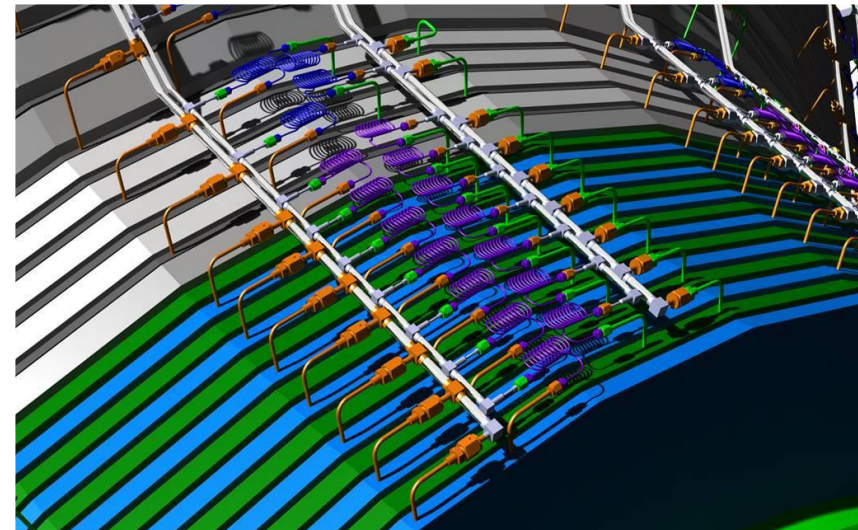


Vue iso du bouclier thermique

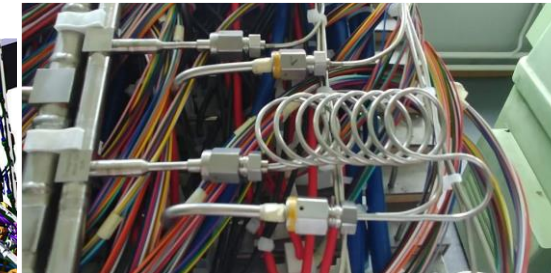


31 Mai 2021

Schéma du système de refroidissement



Modélisation 3D du réseau de refroidissement



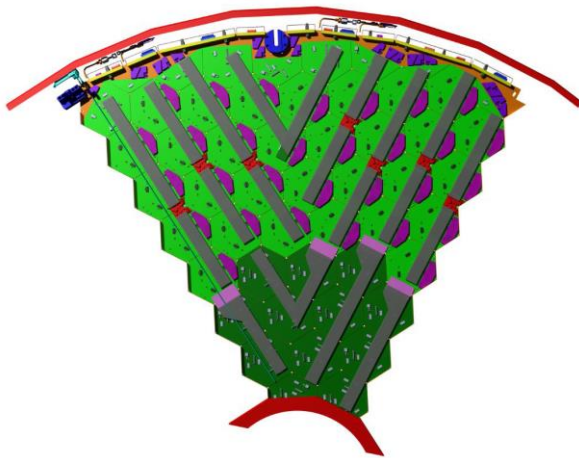
Prototype de capillaire

L'intégration et le câblage de l'électronique

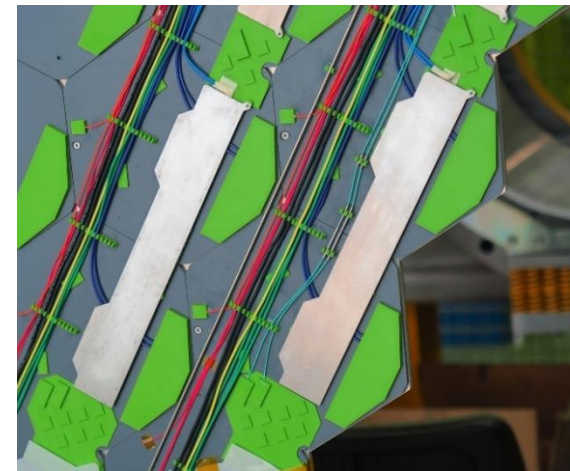
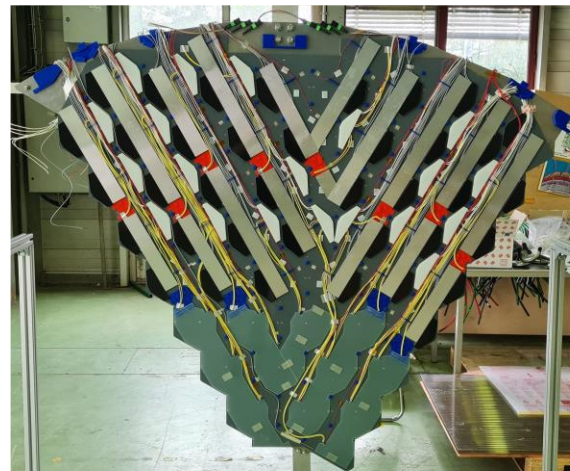
- La haute granularité de ce détecteur engendre une grande densité de câbles et d'électronique.
 - On compte:
 - $\approx 30\,000$ modules en Silicium (620m^2)
 - $\approx 4\,000$ Scintillateurs plastiques (370m^2)
 - $\approx 6\,000\,000$ de voies pour le silicium
 - $\approx 240\,000$ voies pour les Scintillateurs plastiques
- ➔ Modélisation très difficile voire impossible



Prototype de disposition du câblage en périphérie extérieure



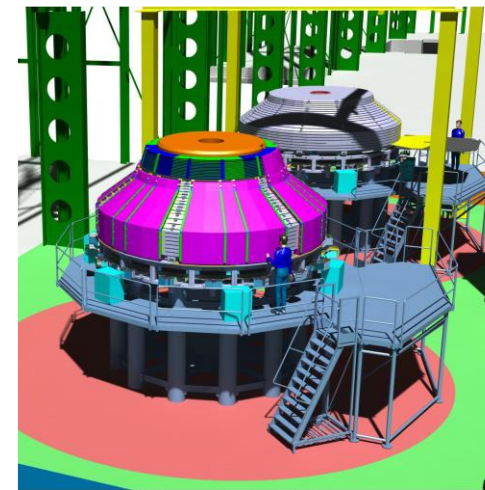
Une cassette du CE-E vue de face



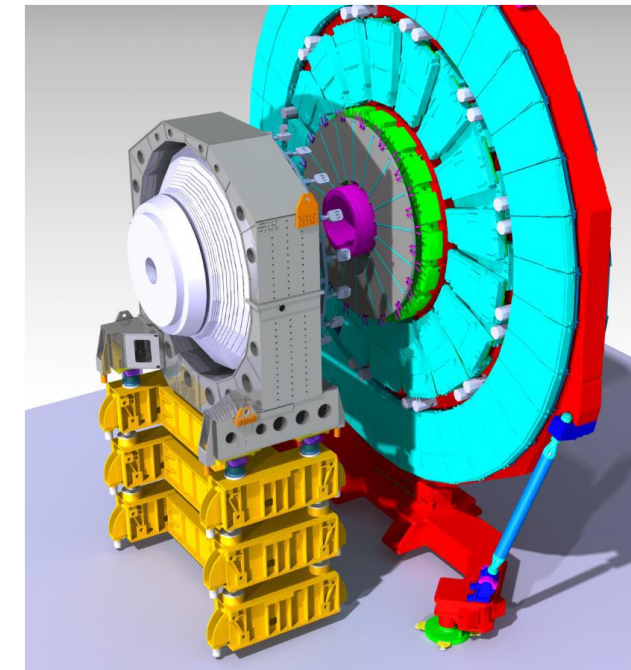
Prototype de câblage au sein même d'une cassette du CE-E

Les outillages

- Chaque bouchon devra être :
 - Assemblé dans en salle blanche
 - Mise en position verticale
 - Acheminé aux puits d'accès à la caverne
 - Descendu à $\approx 100\text{m}$ sous terre
 - Mis en place à chaque extrémité de CMS

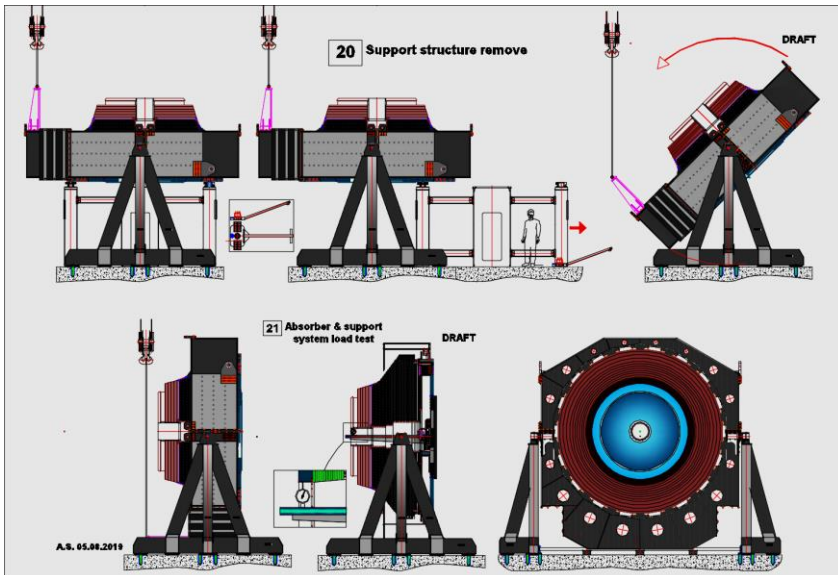


Assemblage d'un bouchon

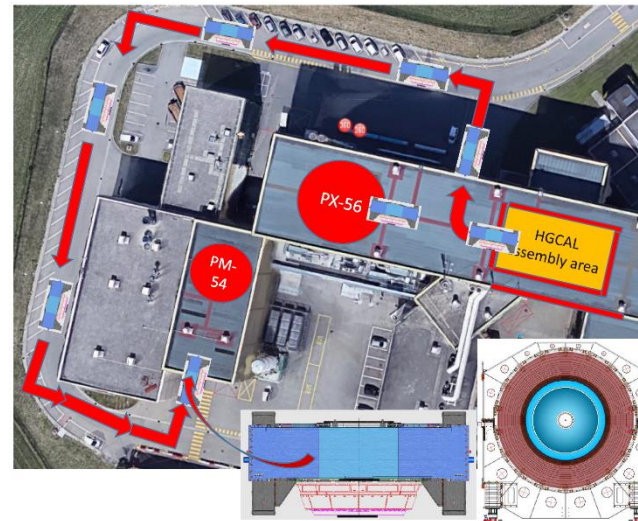


Mise en place des bouchons HGCAL sur CMS

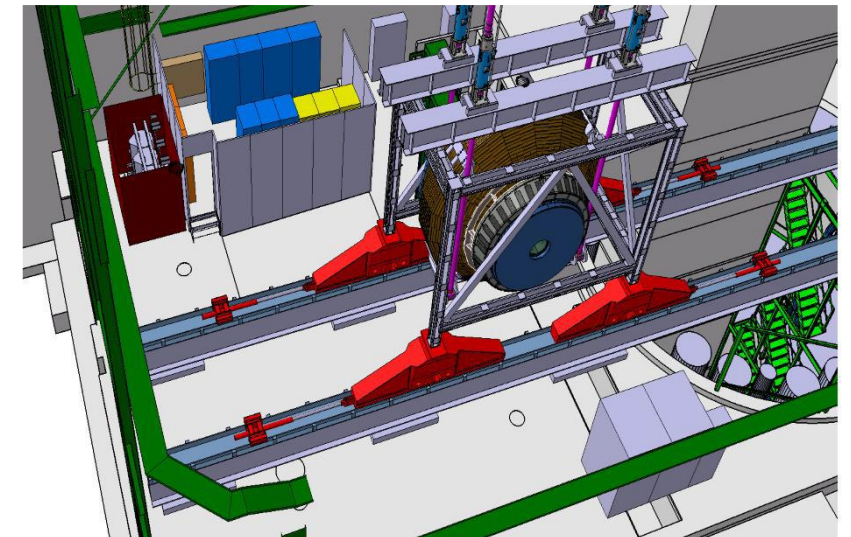
Illustration visible [ici](#)



Principe de rotation d'un bouchon



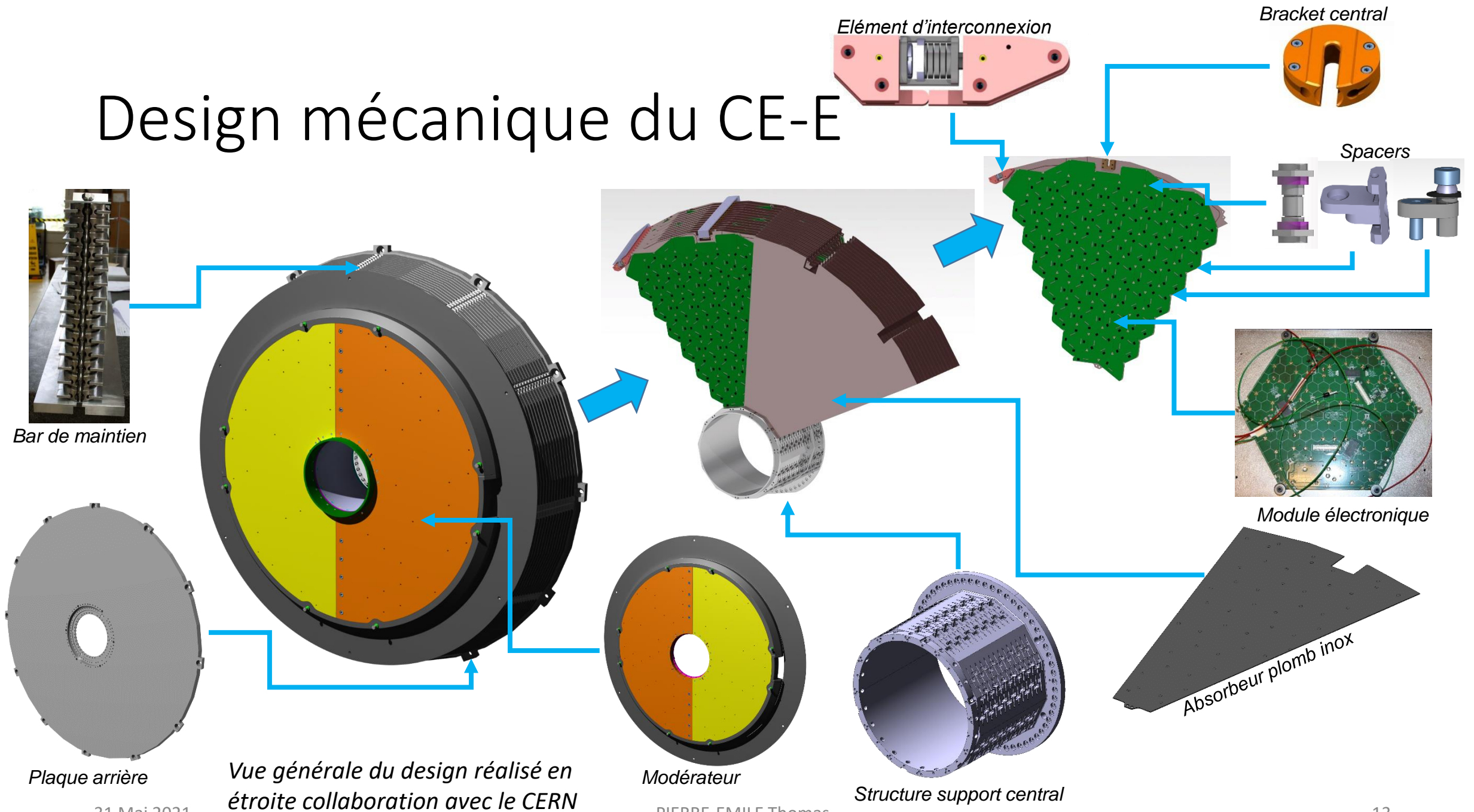
Déplacement des bouchons en surface
PIERRE-EMILE Thomas



Descente des bouchons

Les implications et réalisations du LLR : sur le CE-E

Design mécanique du CE-E



Design mécanique du CE-E : les plaques de cuivre

- **Fonctionnalités du composant :**

- Localiser et maintenir l'électronique de chaque coté
- Assurer la stabilité thermique du CE-E

- **Tâches réalisées :**

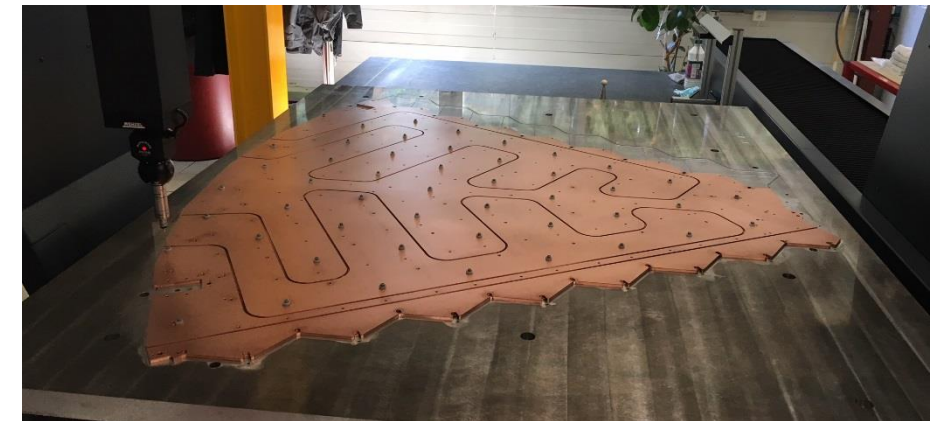
- Mise à jour et amélioration continue des maquettes
- Test de faisabilité
- Relevés métrologiques
- Tests destructifs pour alimenter les modèles éléments finis



Tests de traction sur éprouvette cuivre



Premiers prototypes de cassettes de CE-E



Métrie tridimensionnelle d'une cassette de CE-E sur MMT

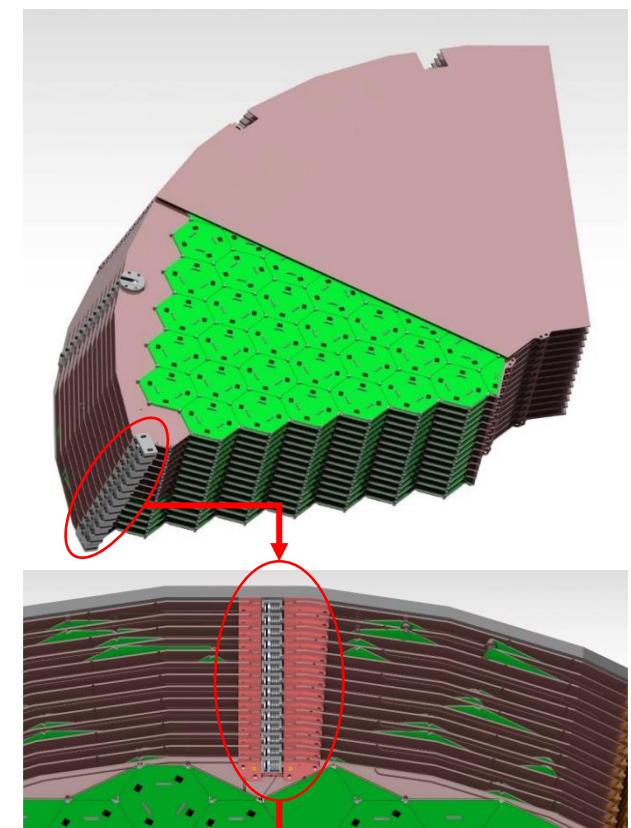
Design mécanique du CE-E : éléments d'interconnexion

• Fonctionnalités du composant :

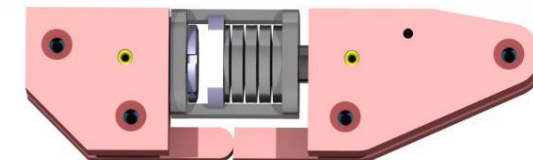
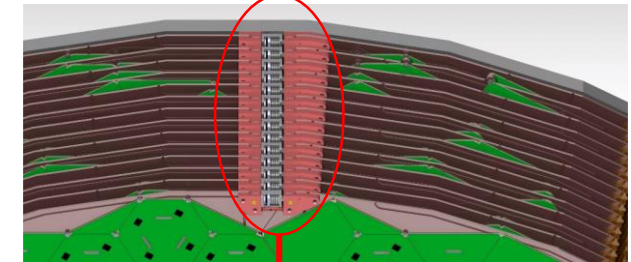
- Transférer les efforts entre les cassettes sur le même plan.
- Eviter les concentrations de contraintes dues au refroidissement du détecteur

• Tâches réalisées :

- Conception
- Sélection des matériaux
- Optimisation du design par éléments finis
- Prototypage
- Réalisation de campagne de tests pour valider les fonctionnalités



Test de traction

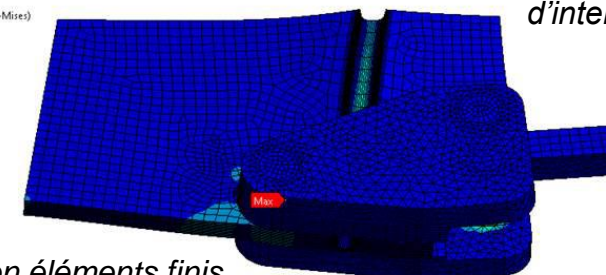
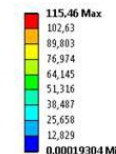


Maquette CAO d'un élément d'interconnexion

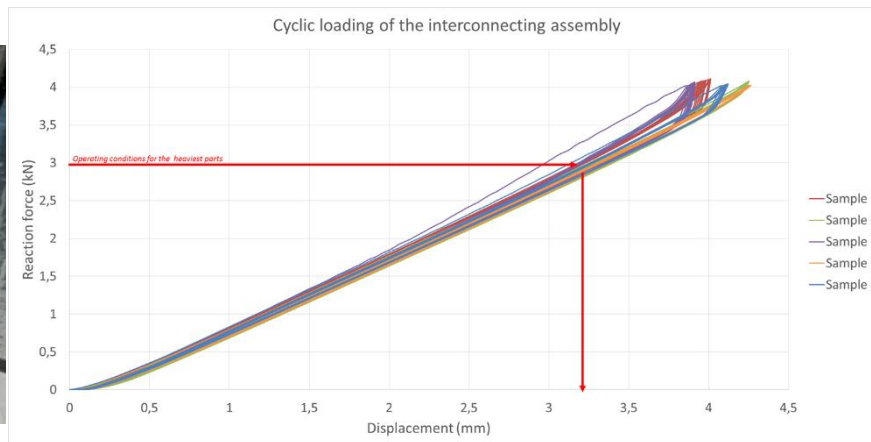


Pièce usinée (Fraisage)

F: Couple de tenue dans le cuivre
Contrainte équivalente
Type: Contrainte équivalente (Von-Mises)
Unité: MPa
Temps: 1
20/07/2020 09:44



Simulation éléments finis



Résultats test de cyclage en machine de traction



Pièce en cours de réalisation (tour CN)

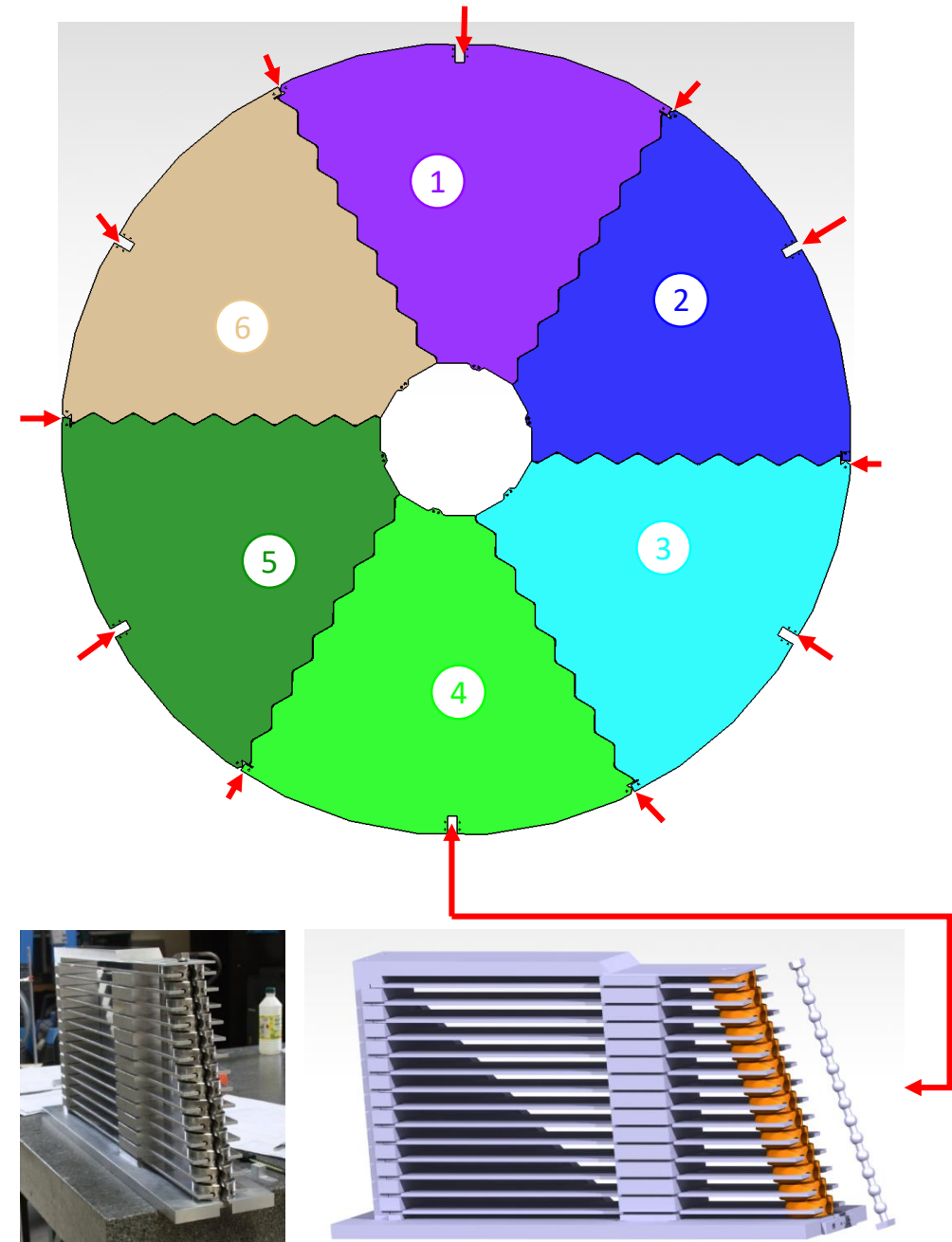
Design mécanique du CE-E : bars de maintien (Z bar)

• Fonctionnalités du composant :

- Limiter les mouvements du détecteur le long de l'axe du faisceau
- Eviter les concentrations de contraintes dues au refroidissement du détecteur

• Tâches réalisées :

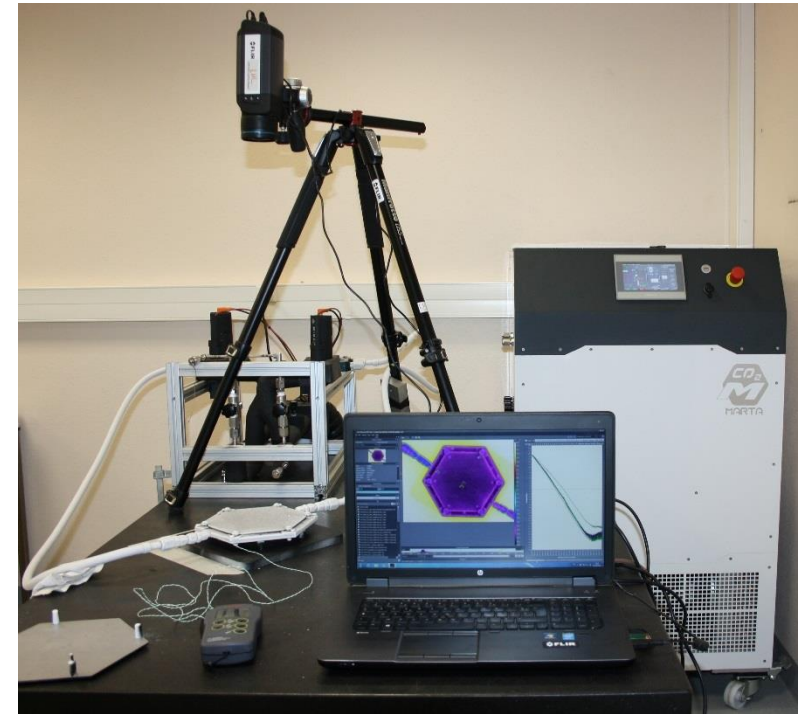
- Conception
- Sélection des matériaux
- Optimisation du design par éléments finis
- Prototypage
- Réalisation de campagne de tests pour valider les fonctionnalités



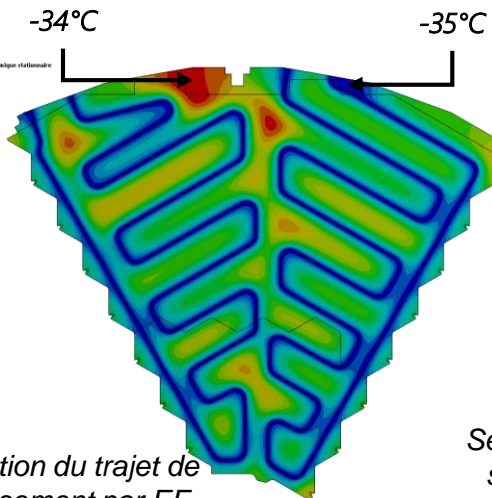
Prototype de Z bar réalisé au LLR

Design mécanique du CE-E : Prise en compte du refroidissement

- **Objectifs des études:**
 - Optimiser l'efficacité du refroidissement
 - Définir l'effort de pression à appliquer aux modules
 - Sélectionner le meilleur procédé pour incorporer un circuit de refroidissement
 - Optimiser le trajet du circuit de refroidissement sur chaque couche
- **Tâches réalisées :**
 - Simulations par éléments fini en thermomécanique mais aussi en fluide
 - Conception et réalisation de banc de test
 - Corrélation entre les éléments finis et les résultats obtenus



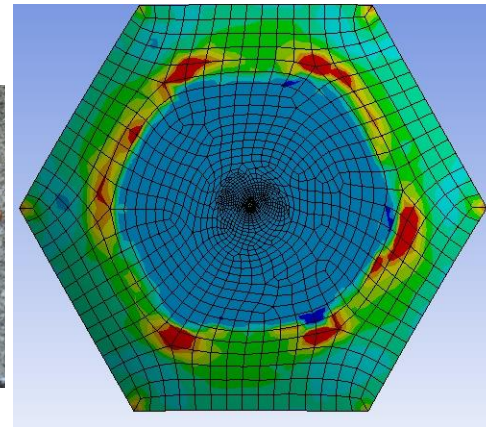
Test réalisé avec une unité de refroidissement CO₂ (MARTA)



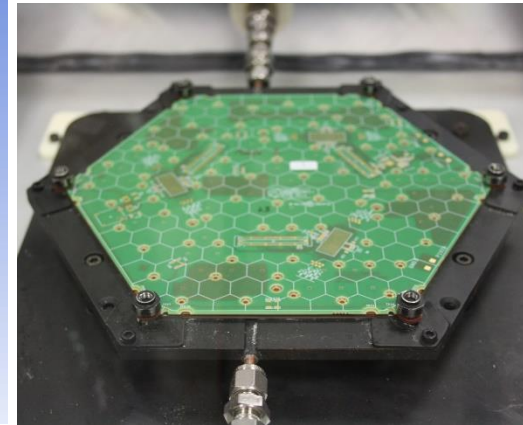
Optimisation du trajet de refroidissement par EF



Set up de plaque de cuivre avec son tuyau de refroidissement



Simulation EF du contact entre le module et la plaque de refroidissement



Module dispose sur la plaque de refroidissement

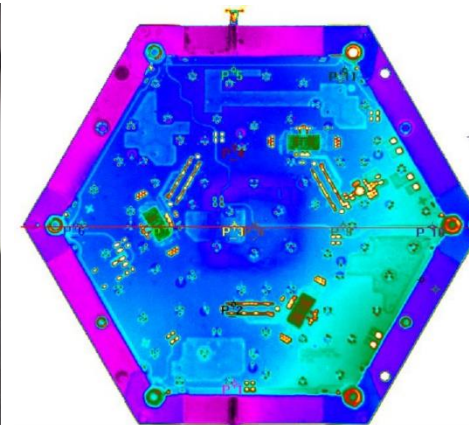
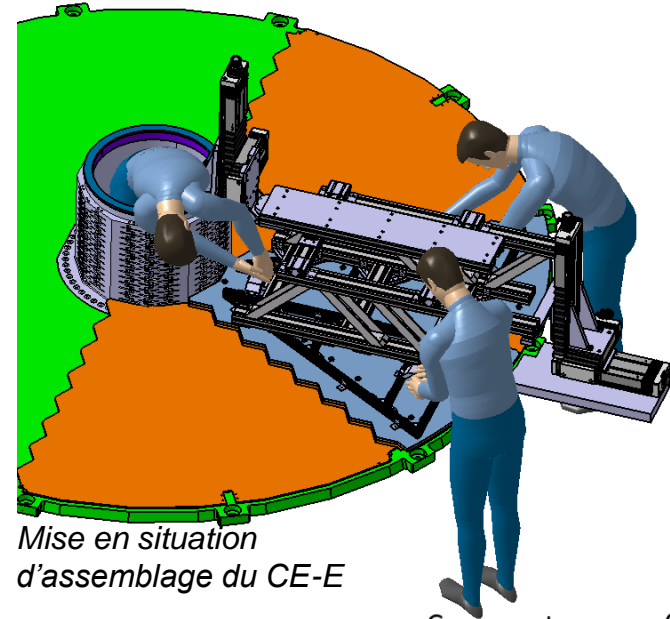


Image Infrarouge du champs de température sur le module

Design mécanique du CE-E : Outillages

- Outillage de manipulation des cassettes
 - **Fonctionnalités du composant :**
 - Manipuler une cassette
 - Retourne les cassettes
 - Assurer la protection des cassettes dans les transports
- Outillage d'insertion des cassettes
 - **Fonctionnalités du composant :**
 - Insérer les cassettes autour du support central pour assembler l'intégralité du CE-E



Mise en situation
d'assemblage du CE-E

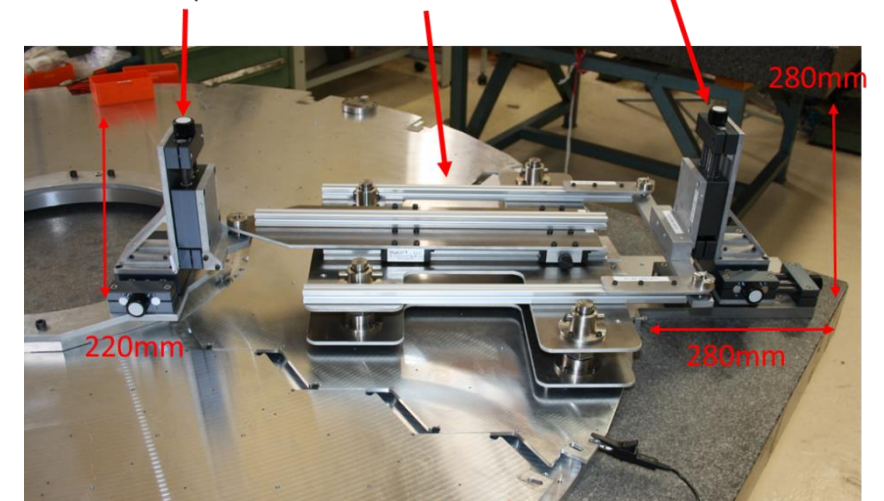
Cone part

Cassette part

External part



Outillage de manipulation des
cassettes du CE-E



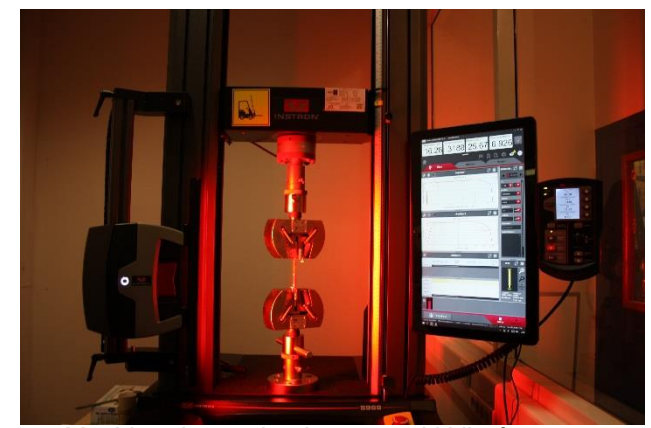
Prototype d'outillage d'insertion des cassettes

Perspectives

- La phase de conception va progressivement laisser place à la phase de production
- Le LLR s'équipe en conséquence pour mener à bien les tâches à venir
- To be continued...



Tour Tsugami 5 axes livré en 2018



Machine de traction Instron 50kN livrée en 2018



MMT Hexagon grand format livrée en 2021 (+ cabine de régulation)



Unité de refroidissement CO₂ MARTA livrée en 2020



Enceinte climatique Instron livrée en 2019



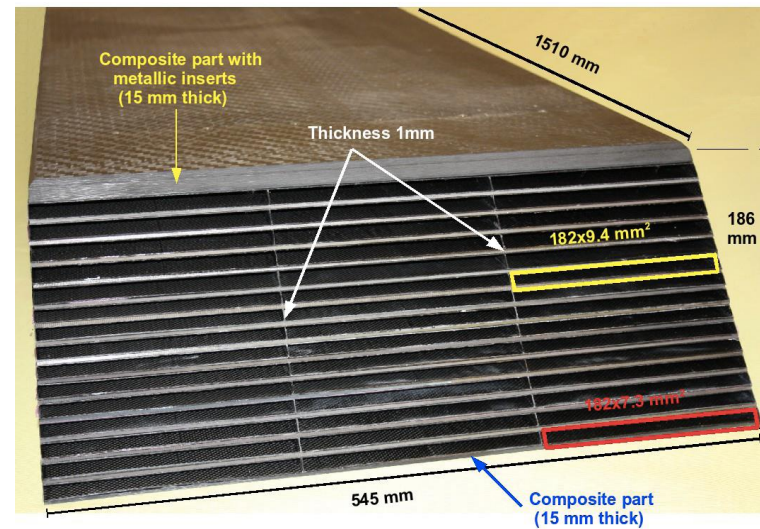
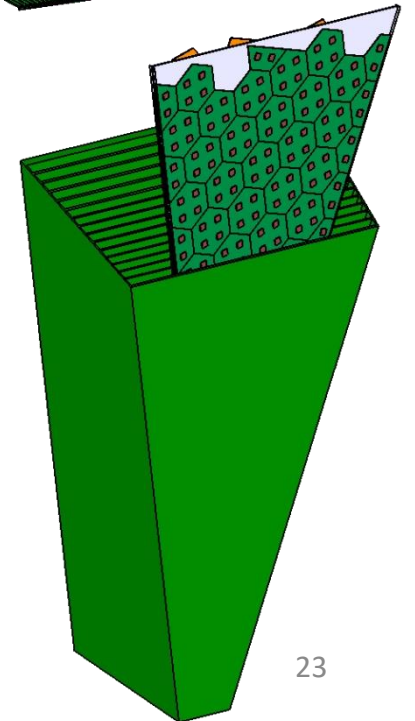
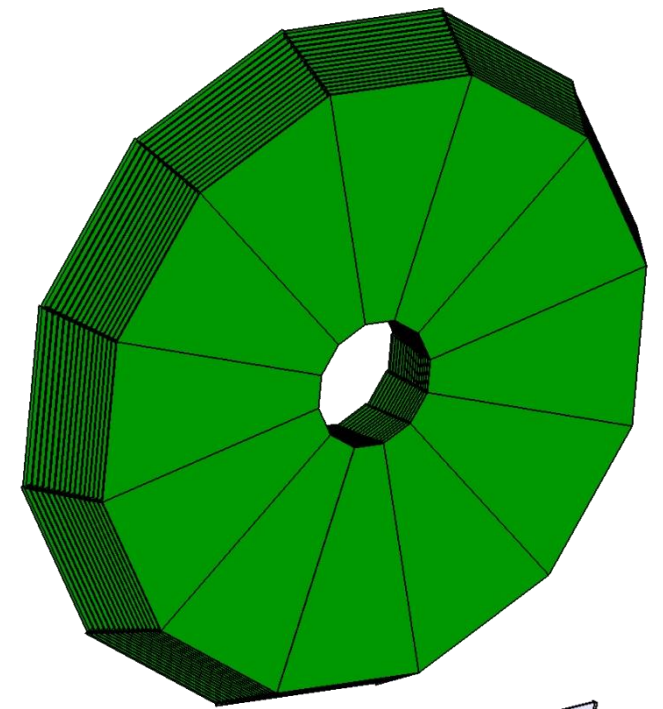
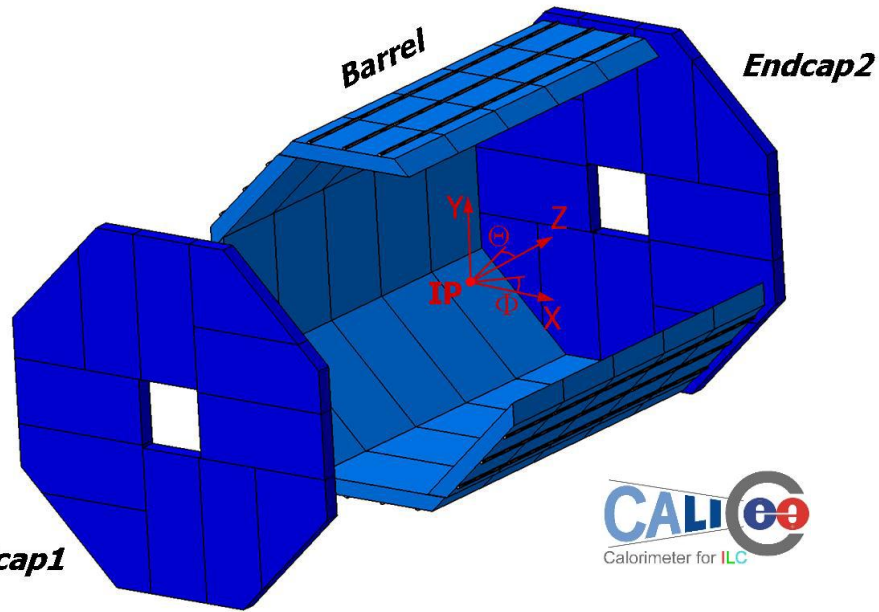
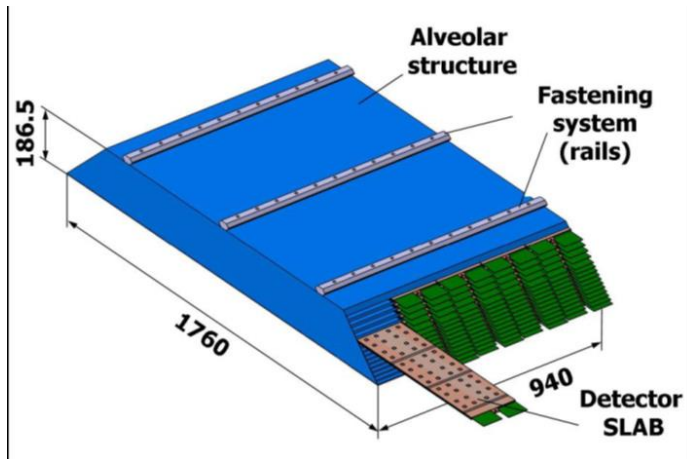
Fraiseuse AXA grande capacité livraison prévue 2021

Merci

Questions?

Backup

Historique de conception au LLR



- Basé sur l'expérience acquise avec la R&D de CALICE, le LLR s'est focalisé sur la partie Electromagnétique du projet HGCAL
- Le LLR entre dans le projet en 2014 avec une première proposition:
 - Structure alvéolaire en fibre de carbone et Tungstène inspirée de CALICE