

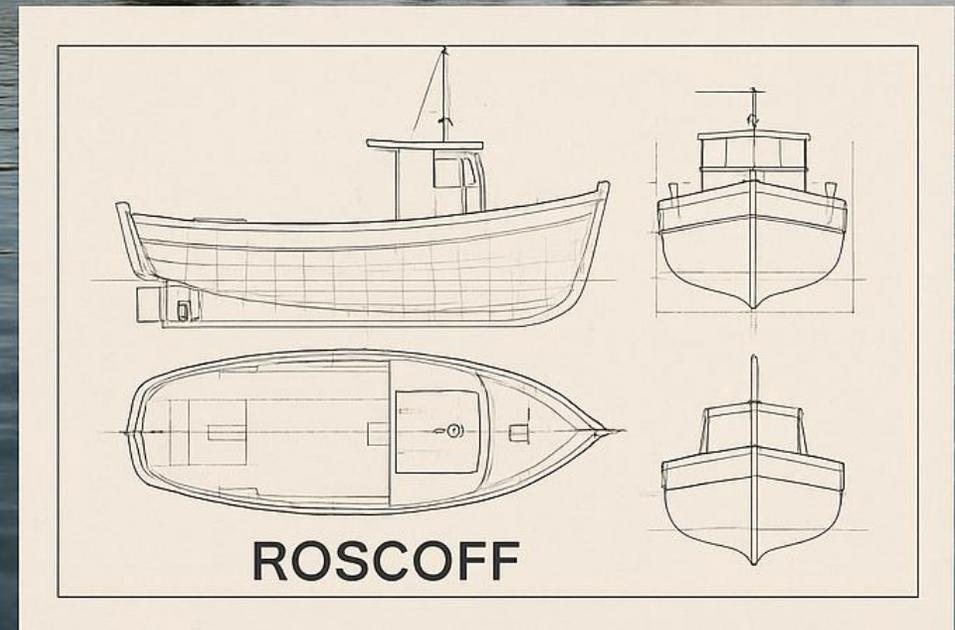
Ecole « Du détecteur à la mesure »
24-28 novembre 2025

Mécanique des détecteurs



Julien Bettane

Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène
Joliot-Curie (IJCLab), Orsay





Sommaire

1^{ère} partie

1. Introduction

- Généralités sur la mécanique
- La mécanique dans les labos IN2P3
- La mécanique dans les détecteurs
- Quelques chiffres et ordres de grandeurs

2. Analyse, Conception et Fabrication

- Analyse du besoin
- Conception mécanique
- Dimensionnement, simulation numérique
- Fabrication mécanique
- Métrologie
- Essais mécaniques, qualification et validation

2nd partie

3. Intégration détecteurs

- Photodétecteurs
- Détecteurs gazeux
- Bolomètre
- Semi-conducteur
- Détecteur optique
- Transport

4. Installation sur site

- Généralités
- Accélérateurs et collisionneurs
- Métrologie et Calibration
- Sites naturels
- Spatial
- Exploitation, maintenance et démantèlement

5. Conclusion

- Résumé
- Perspectives



Sommaire

2^{ème} partie

3. Intégration détecteurs

- Photodétecteurs
- Détecteurs gazeux
- Bolomètre
- Semi-conducteur
- Détecteur optique
- Transport

L'intégration détecteurs (ou assemblage détecteurs)

La phase d'analyse, de conception et de fabrication a permis de définir précisément l'ensemble des éléments constituant le détecteur. Les aspects d'intégration doivent être pris au plus tôt dans la conception (modélisation des PCB, des câbles...).

Les composants, qu'ils soient produits dans les laboratoires ou l'industrie, sont disponibles et doivent être assemblés, c'est la phase d'intégration.

❑ Intégration:

- **Assemblage** des différentes parties constitutives du système de détection
- **Techniques spécifiques** (polissage, collage, emballage, tension de fils, tension de films minces...)
- **Montage Mécanique + Electronique + Câblage**

❑ Objectif:

Rendre le détecteur opérationnel

❑ Particularités:

Cette phase est à distinguer de la fabrication mécanique à proprement parler. L'intégration et montage de détecteurs sollicite des compétences particulières. Dans bien souvent des cas, la sous-traitance n'est pas possible ou serait extrêmement onéreuse compte tenu du temps nécessaire à l'intégration et à la mise au point.

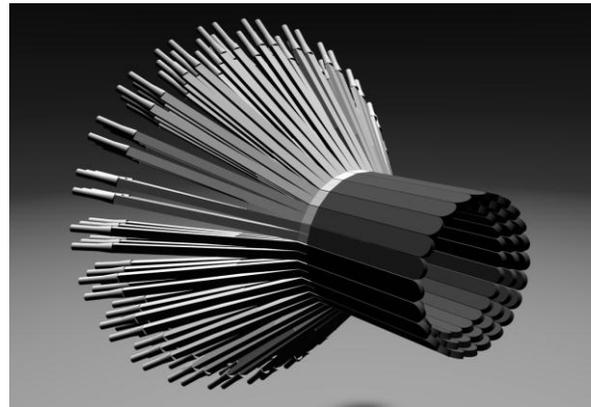
Le montage mécanique requiert très souvent des reprises d'usinages et des ajustements particuliers.

Polissage et collage de guide de lumière et de scintillateurs

Détecteur de Neutrons (Jefferson Laboratory)



Détecteur dans son environnement



Scintillateurs et guides de lumière



Éléments usinés à assembler



Polissage manuel



Collage manuel et avec outil

Isolation lumière, contrôle d'épaisseur et montage mécanique

Détecteur de Neutrons (Jefferson Laboratory)



Isolation à la lumière avec scotch



Vérification de l'épaisseur d'une latte



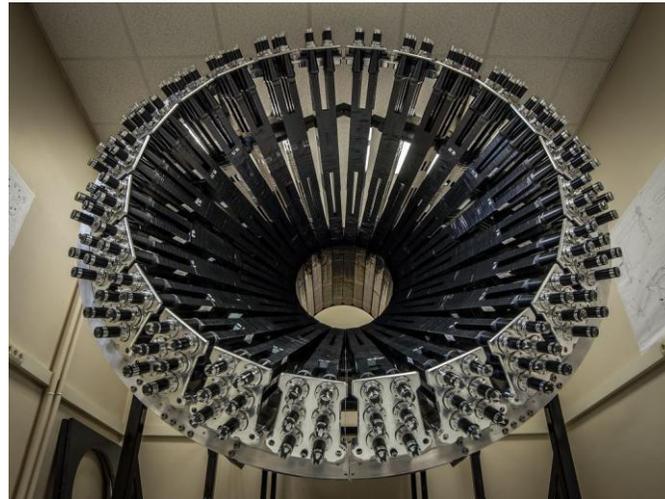
Test d'insertion d'un bloc PMt

Assemblage pas à pas de chaque bloc, contrôle

Détecteur de Neutrons (Jefferson Laboratory)



Début du montage test



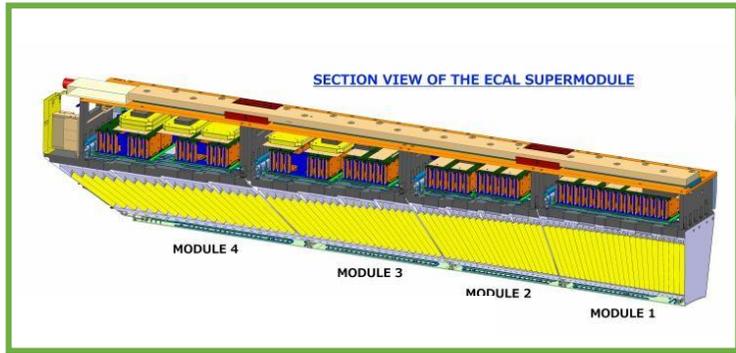
Montage test complet



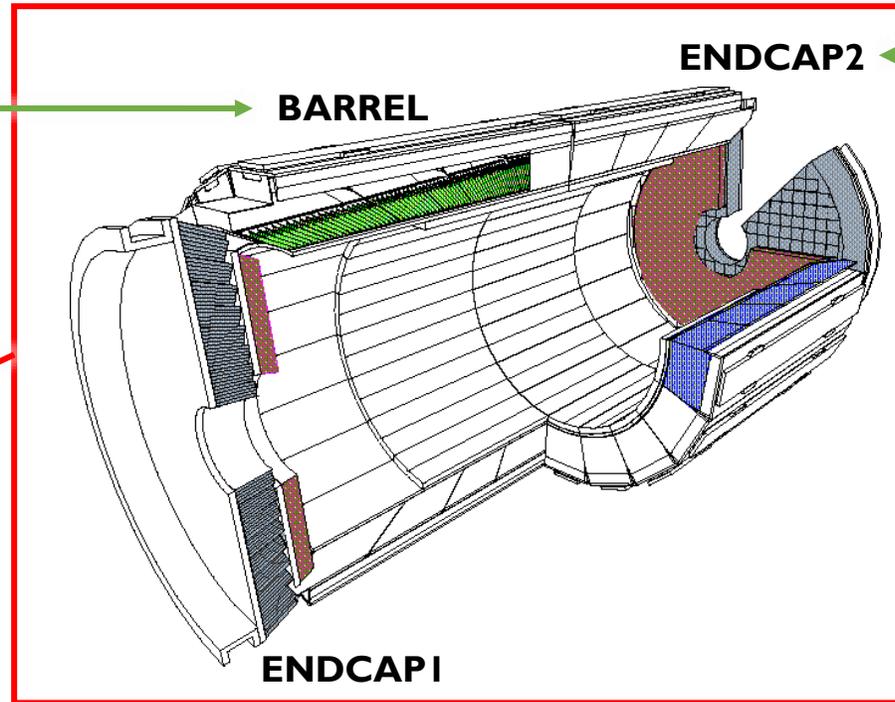
Prise de mesure

Calorimètre électromagnétique de CMS au CERN

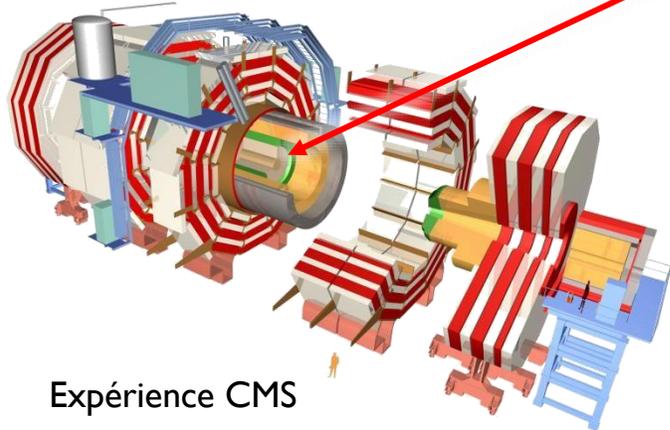
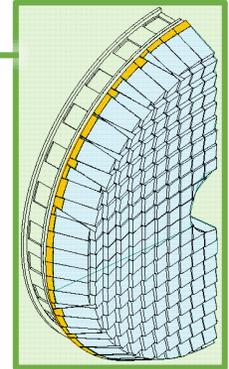
76000 cristaux scintillateurs de PbWO₄, 100 Tonnes, 6 m de long x 60 cm de large



Un supermodule du BARREL

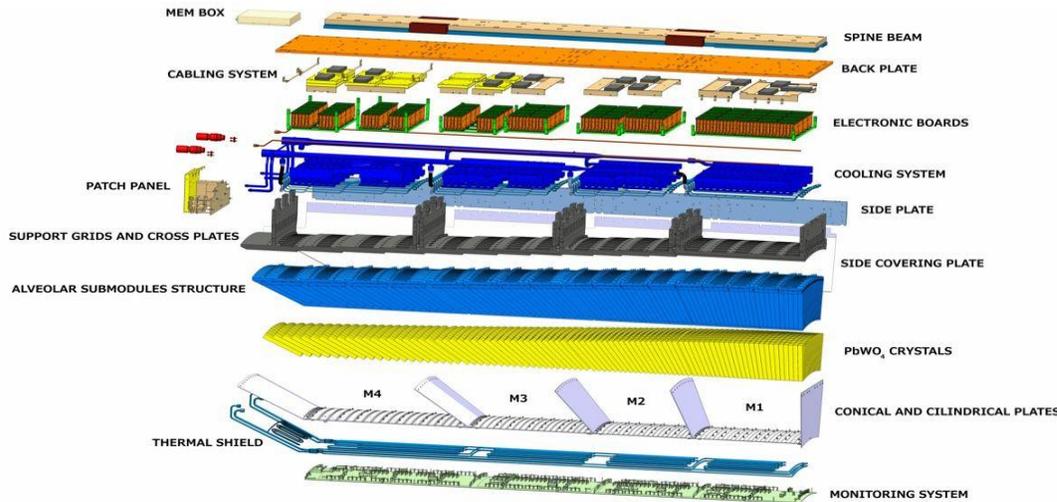
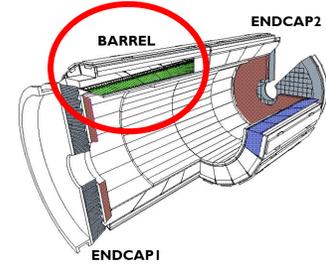


Composition du calorimètre



Calorimètre électromagnétique de CMS au CERN

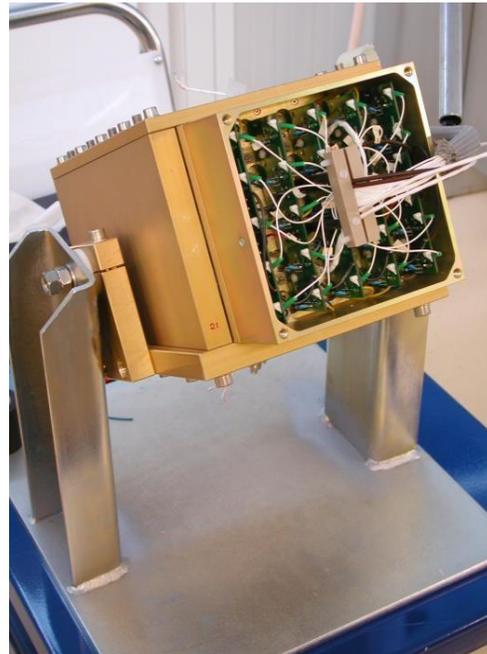
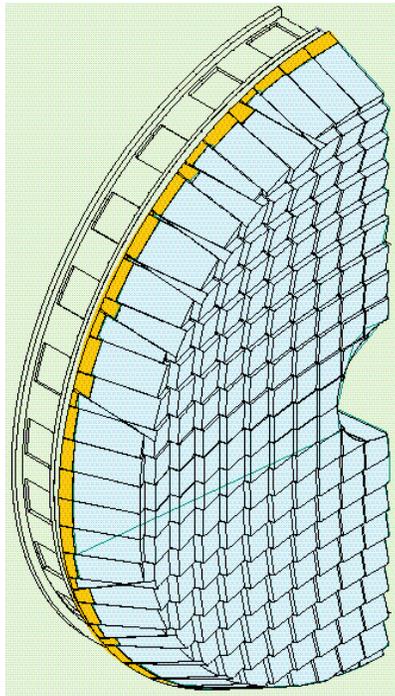
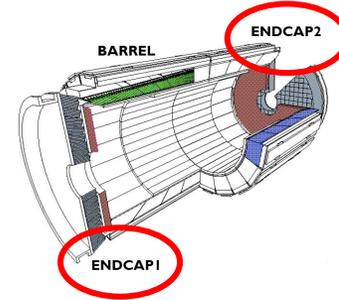
BARREL, Supermodule ECAL (1700 cristaux)



**Cristaux
Mécanique
Composite
Electronique
Refroidissement
Thermique
Monitoring**

Calorimètre électromagnétique de CMS au CERN

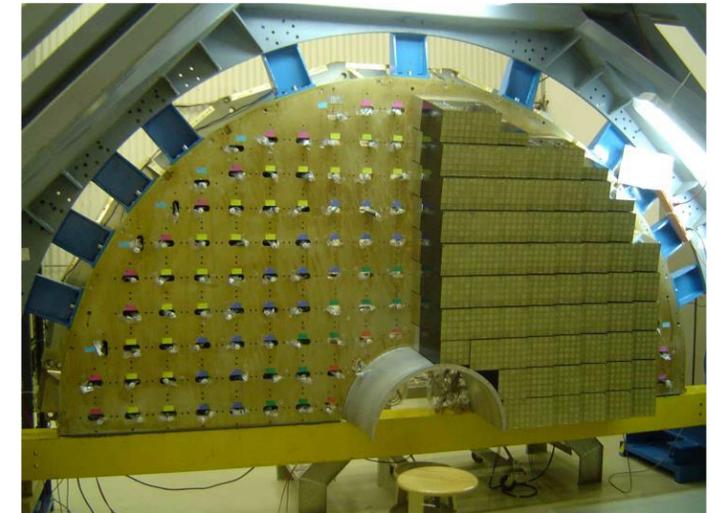
ENDCAP, bouchon (3662 cristaux)



Montage des cristaux dans les alvéoles à l'aide d'un outil



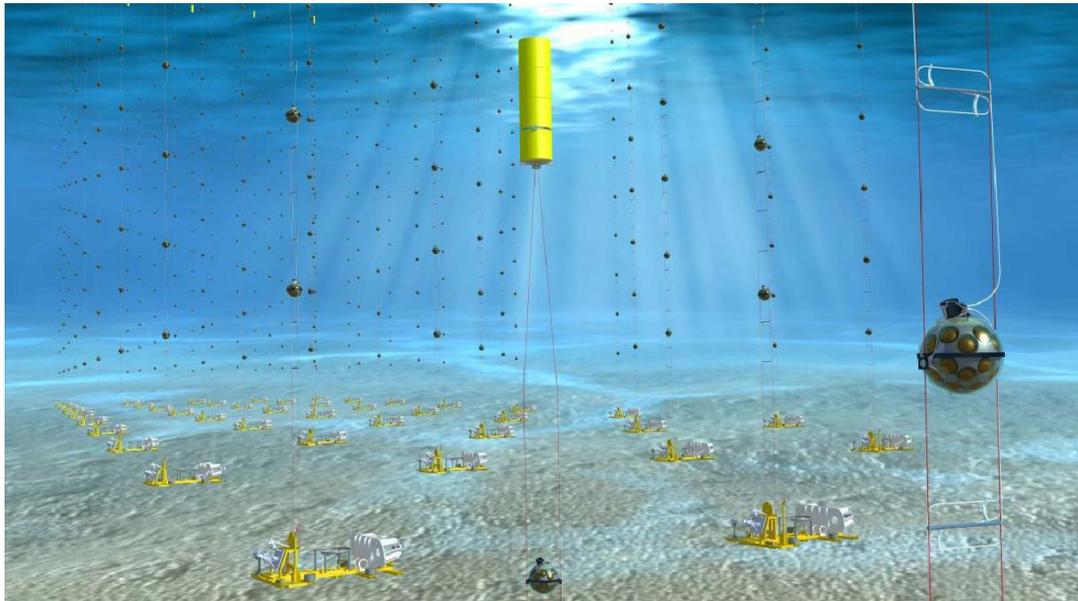
Ajustement mécanique des alvéoles



Assemblage un par des alvéoles

Photomultiplicateurs

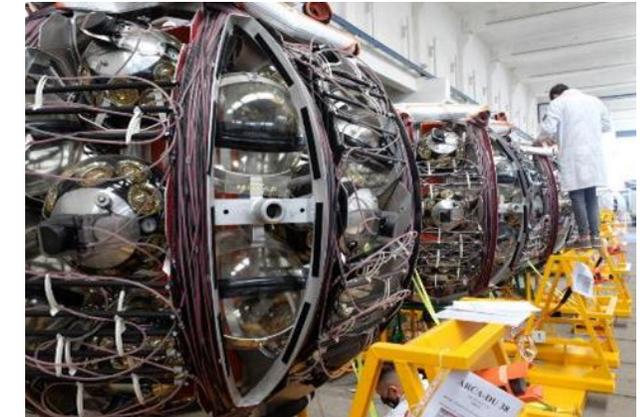
KM3NET (Méditerranée)



Détecteur sous marin, 18 modules optiques de 31 photomultiplicateurs (ANTARES a servi de démonstrateur)



Intégration des modules optiques



Intégration des lanceurs

Plans de détection d'une chambre à fils

Chambre à fils

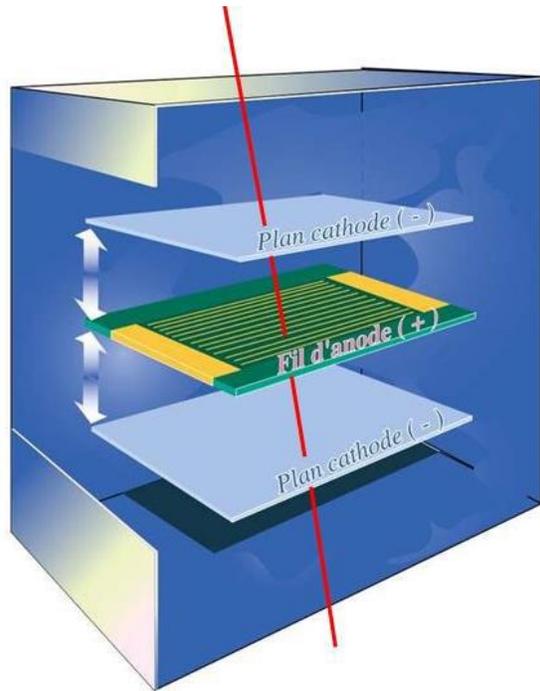
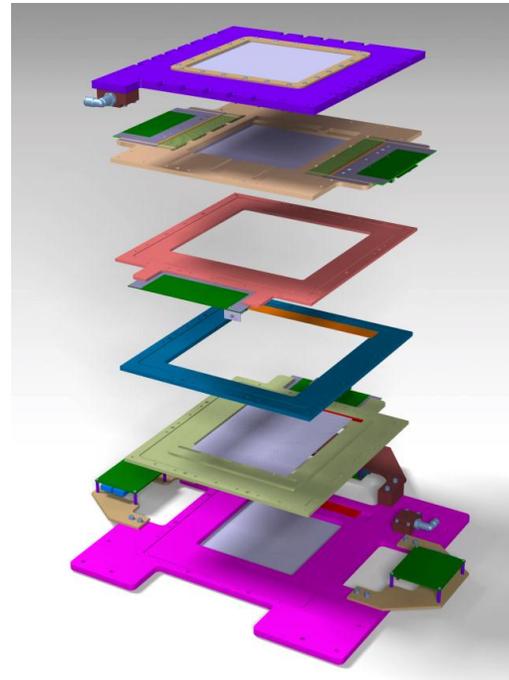
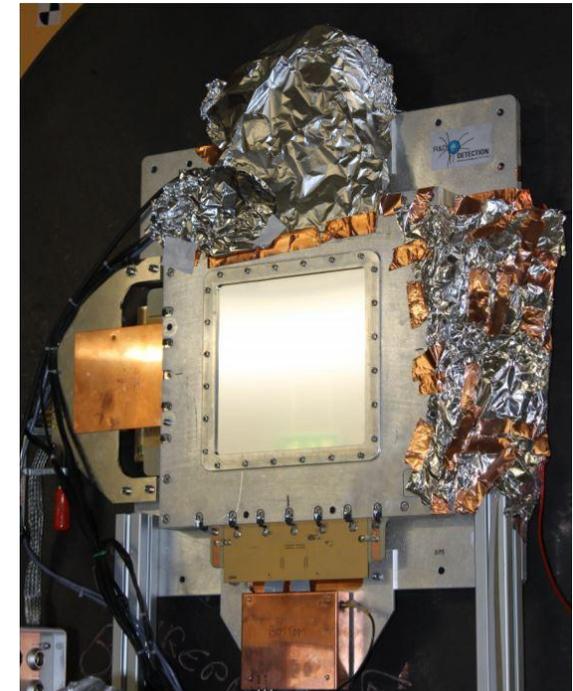


Schéma de principe



Vue éclatée des différents plans



Chambre SOFIA (GSI)

Réalisation des différents plans de détection

Plans de fils, plan d'anode et de cathode, plan de pads



Plan de fils



Plan de cathode



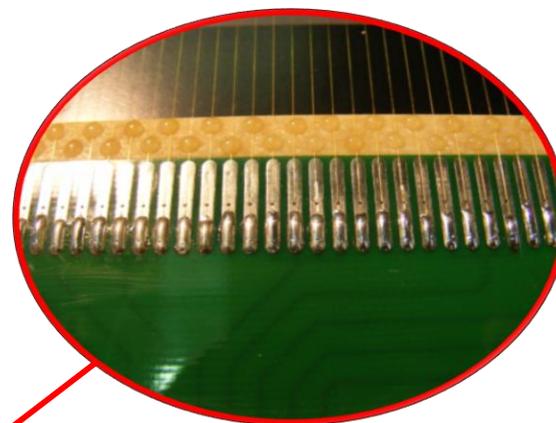
Assemblage des plans avec des pions de centrage



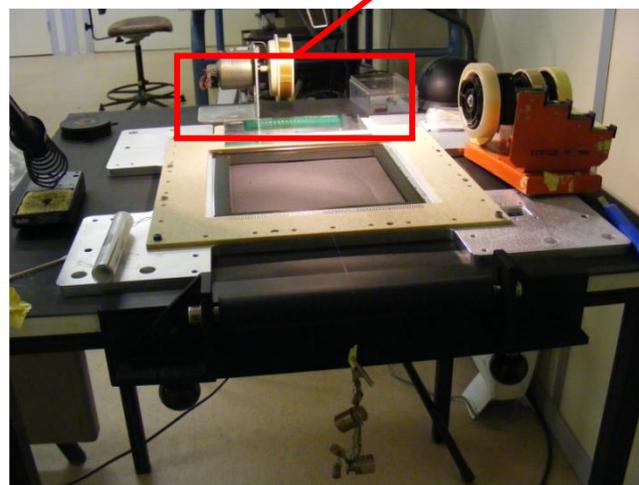
Connection des pistes à la pate à l'argent (ou autre)

Mise en tension mécanique des fils

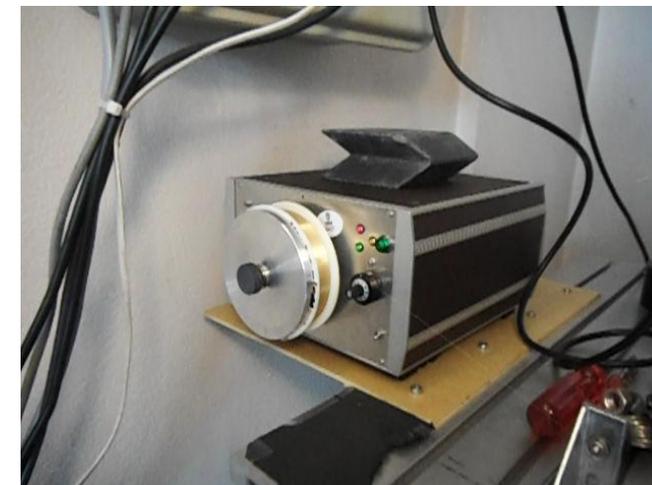
Soudure, sertissage, collage



Tenue mécanique des fils par un procédé de sertissage



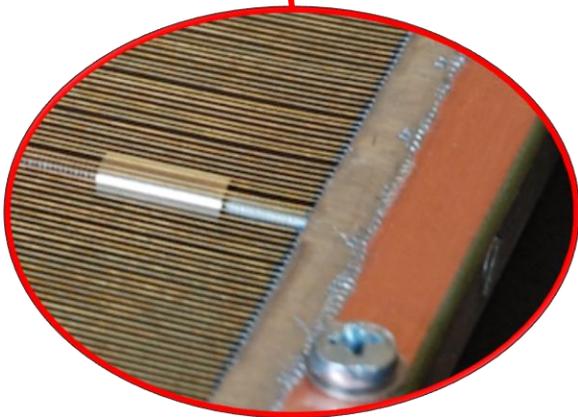
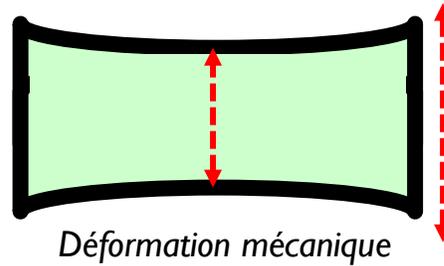
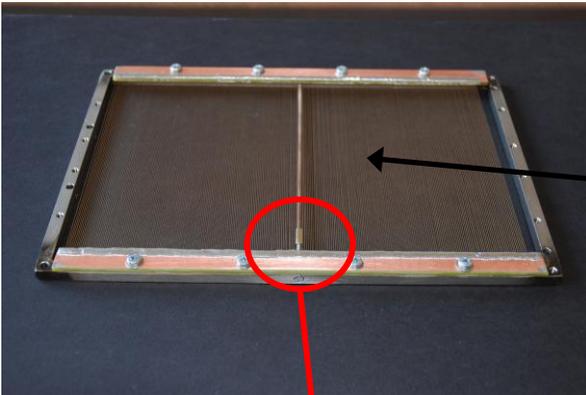
Mise en place par soudure



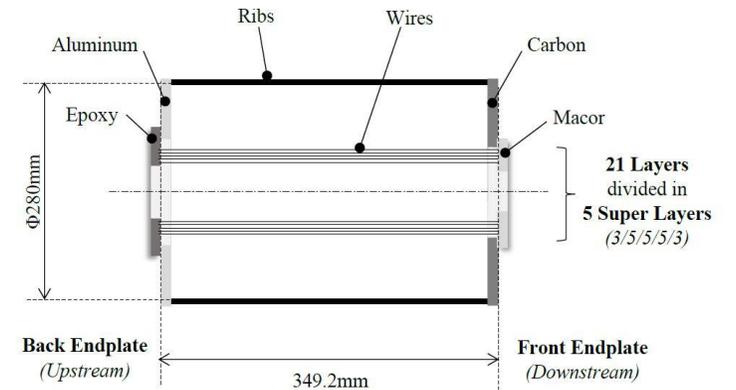
Machine à bobiner automatique

Précontrainte pour assurer une tension optimale

Sur les cadres supports mécaniques ou directement sur les fils



Tissage sur un cadre précontraint



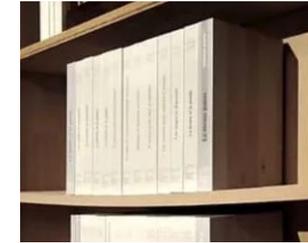
Layer	Radius	Over-	Force on	$y_{up}(r)$	$y_{down}(r)$	$c(r)$	Initial	Final	Difference
	(mm)	tension	Endplates	Back	Front		elongation	elongation	(122
	(mm)	(g)	(g)	(μm)	desired)				
1	30	12	9.94	-73.05	-98.69	171.74	1.00	0.83	17.17
2	32	12	10.02	-70.24	-94.35	164.59	1.00	0.84	16.46
3	34	12	10.11	-67.40	-90.07	157.48	1.00	0.84	15.75
4	36	12	10.19	-64.55	-85.83	150.38	1.00	0.85	15.04
5	38	12	10.28	-61.55	-81.46	143.01	1.00	0.86	14.30
6	40	12	10.37	-58.52	-77.11	135.63	1.00	0.86	13.56
7	42	12	10.46	-55.47	-72.78	128.25	1.00	0.87	12.82
8	44	12	10.55	-52.39	-68.46	120.84	1.00	0.88	12.08
9	46	12	10.64	-49.28	-64.14	113.42	1.00	0.89	11.34
10	48	12	10.73	-45.95	-59.57	105.52	1.00	0.89	10.55
11	50	12	10.83	-42.59	-55.02	97.61	1.00	0.90	9.76
12	52	12	10.92	-39.22	-50.46	89.68	1.00	0.91	8.97
13	54	12	11.02	-35.84	-45.91	81.75	1.00	0.92	8.18
14	56	12	11.11	-32.45	-41.37	73.82	1.00	0.93	7.38
15	58	12	11.21	-28.88	-36.62	65.50	1.00	0.93	6.55
16	60	12	11.31	-25.28	-31.85	57.14	1.00	0.94	5.71
17	62	12	11.41	-21.72	-27.14	48.86	1.00	0.95	4.89
18	64	12	11.51	-18.18	-22.44	40.62	1.00	0.96	4.06
19	66	12	11.61	-14.65	-17.76	32.42	1.00	0.97	3.24
20	68	12	11.71	-11.05	-12.97	24.00	1.00	0.98	2.40
21	70	12	11.81	-7.44	-8.21	15.65	1.00	0.98	1.57
			33.23						
			(Kg)						

Tissage avec valeur de tensions mécaniques initiales requises

Résistance des matériaux / Fluage, Flambement et Flexion

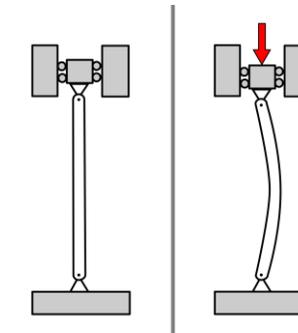
Fluage

- ❑ Le fluage est le phénomène de déformation permanente des matériaux sous l'effet d'une contrainte constante appliquée pendant une période prolongée.
- ❑ Ce processus peut conduire à une déformation lente et progressive des matériaux, même à des niveaux de contrainte inférieurs à leur limite d'élasticité.



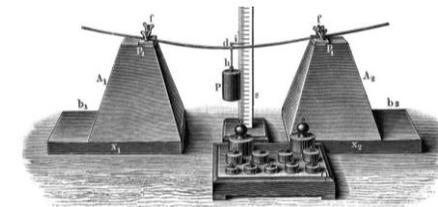
Flambement

- ❑ Le flambement est l'instabilité structurelle qui se produit lorsqu'une colonne ou un élément mince est soumis à une compression axiale critique.
- ❑ Sous une certaine charge critique, la colonne perd sa capacité à supporter la charge et fléchit latéralement, généralement dans un mode de déformation sinusoïdal ou de flexion.



Flexion

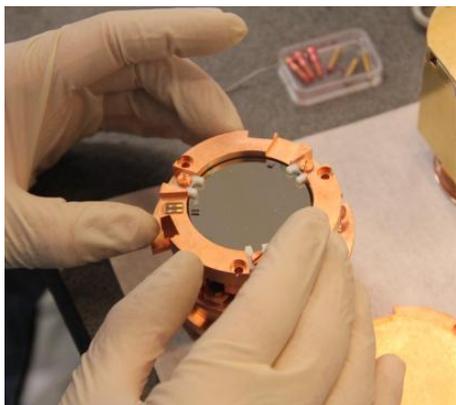
- ❑ Elle se produit lorsqu'une force est appliquée sur une poutre ou une structure.
- ❑ Entraîne une courbure de celle-ci.
- ❑ La flexion peut causer une contrainte de compression sur une face de la poutre et une contrainte de traction sur l'autre face, et ces contraintes peuvent entraîner une déformation permanente ou une rupture de la poutre si elles dépassent la limite de résistance du matériau.



*Dispositif de mesure de la flèche ;
E. Wiedemann et H. Ebert*

De la mécanique aussi dans les bolomètres

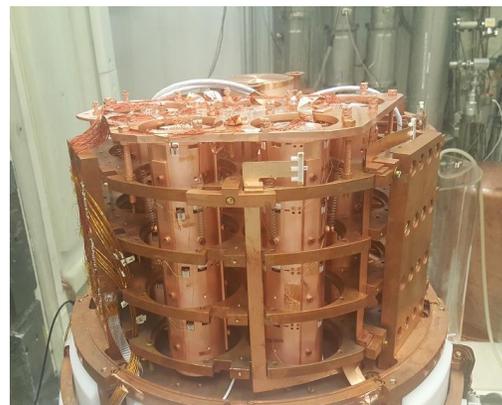
Polissage, conception cryo-mécanique



Bolomètre scintillant



Interféromètre bolométrique



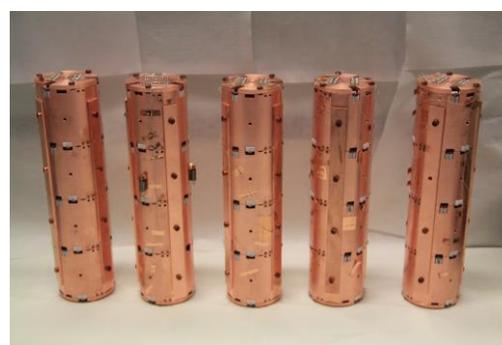
Montage complet CUPID



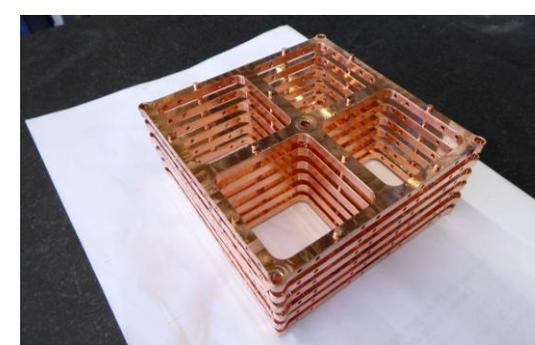
Montage fin bolomètre



Mécanique conventionnelle



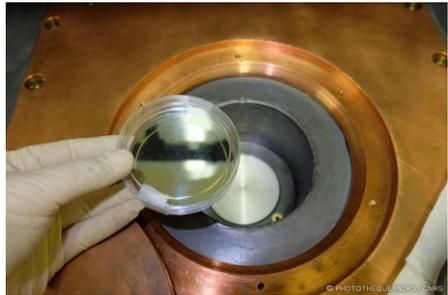
Usinage cuivre



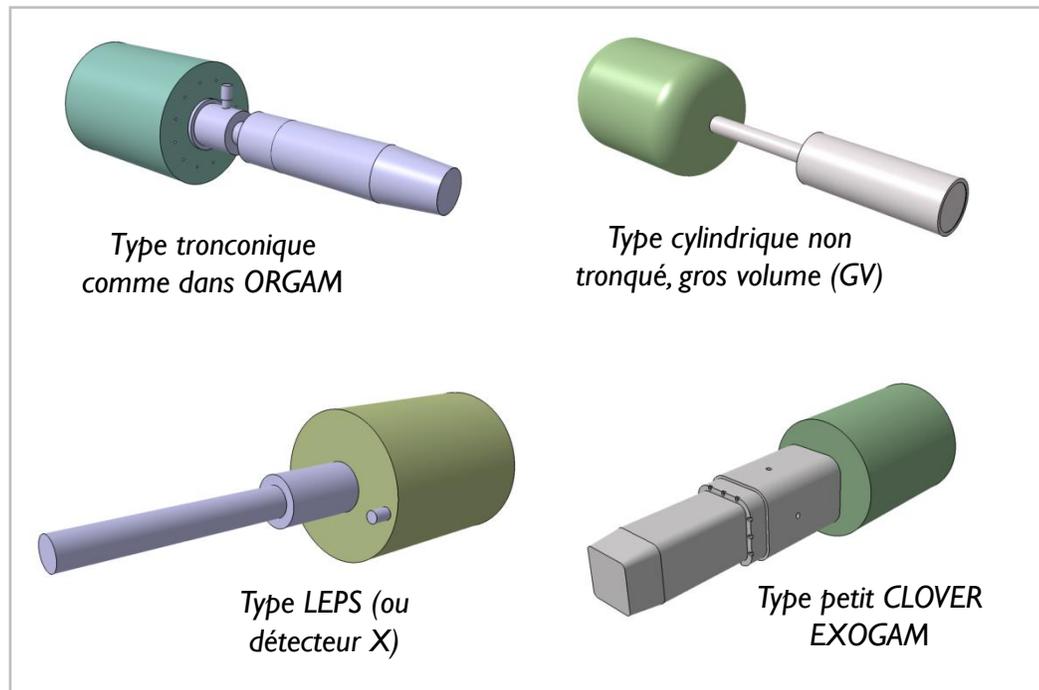
Usinage cuivre

Intégration de détecteurs à semi-conducteurs (Ge)

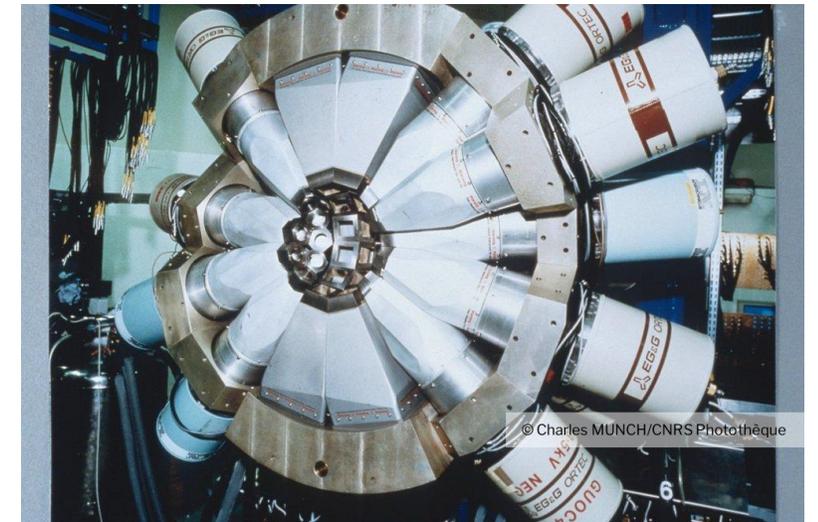
Détecteurs très utilisés en physique nucléaire (GANIL, Alto...)



Partie active du détecteur Ge



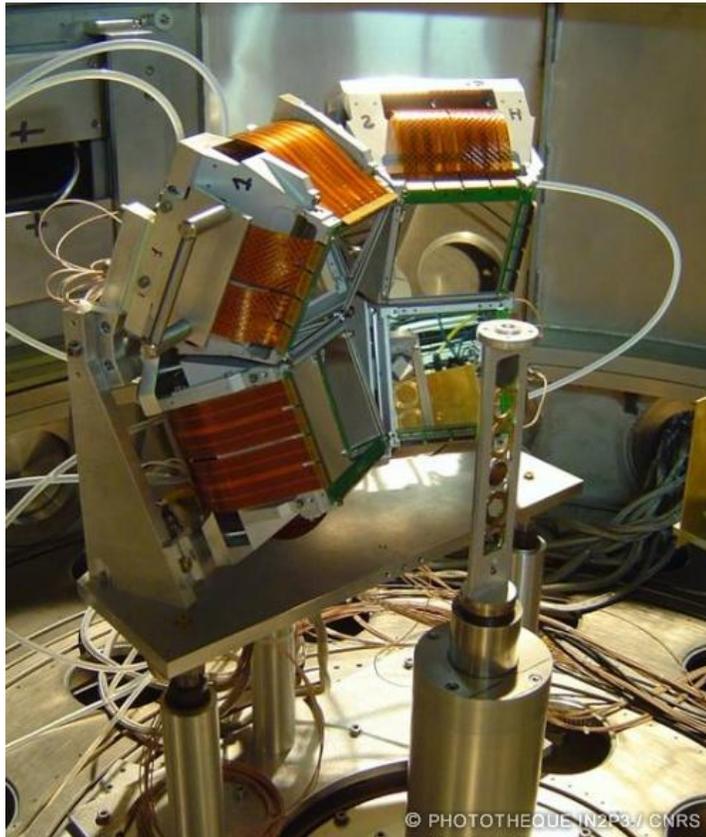
Quelques exemples de détecteurs Ge



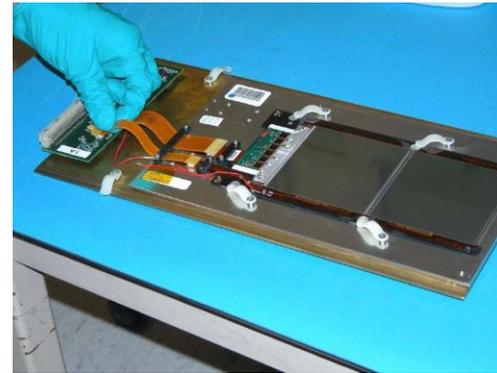
Intégration de détecteurs Ge en structure
« Gamma sphère » (détecteur EUROGAM)

Intégration de détecteurs à semi-conducteurs (Si, SSD)

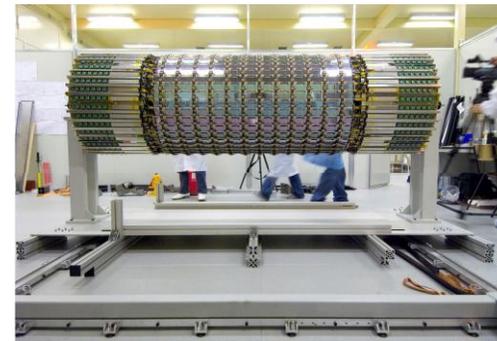
Détecteurs très utilisés pour les trackers



Intégration de 4 ensembles MUST



Un module du tracker de CMS



Un tonneau du tracker d'ATLAS



Un disque du tracker de CMS

© PHOTOTHEQUE IN2P3/CNRS

A la frontière de la mécanique et de l'optique...

Miroir pour VIRGO (Italie)



Interféromètre (Michelson)



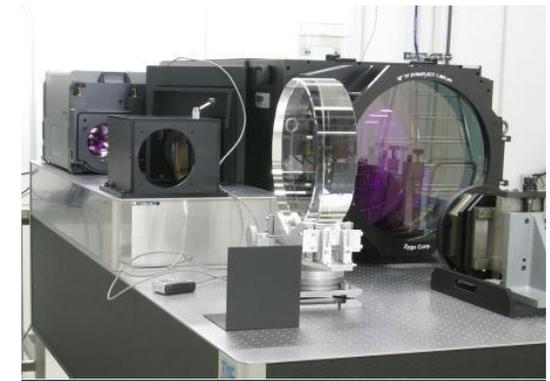
Substrat, pièce avant polissage



Polissage « parfait »



Coating sous vide pour améliorer
les performances



MéTROLOGIE optique

A la frontière de la mécanique et de l'optique...

Chargeur de filtres pour LSST (Chili) / LPSC, LPNHE, CPPM, APC, LPC



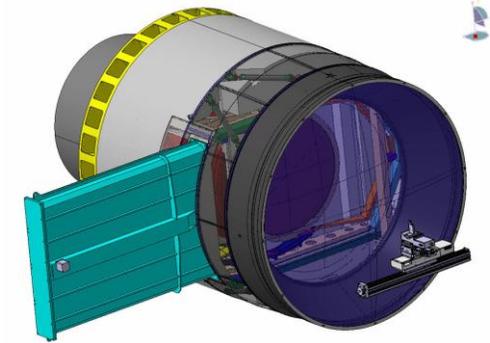
Infrastructure du télescope LSST



Télescope LSST



Intégration mécanique du chargeur de filtre



CAO du chargeur de
filtre de la caméra

Dernière étape avant l'installation sur site

Conditionnement, sécurité, structure adaptée, amortisseur, capteur de chocs, transport (avion, bateau, camion...)



Boite de transport, routier + aérien (USA)
CND, CLAS I2 (JLab)



Structure support, routier + maritime
KM3NET (méditerranée)



Boite de transport, conditions de transport difficiles
Télescope HESS (Namibie)

A prendre en compte dès la conception

Pour éviter les problèmes et les difficultés...



Aïe!!



Caisse US non adaptée à la taille du camion



Au centimètre...



Sommaire

2^{ème} partie

4. Installation sur site

- Généralités
- Accélérateurs et collisionneurs
- Sites naturels
- Spatial
- Métrologie et Calibration
- Exploitation, Maintenance et démantèlement

Installation sur site

❑ Définition:

Action qui consiste à placer l'ensemble des composants du détecteurs à l'endroit prévu en vue de réaliser l'expérience

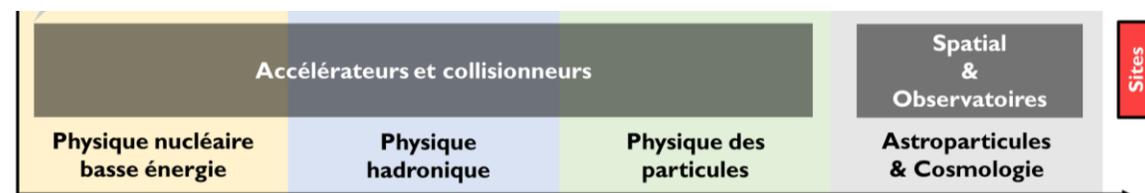
❑ Contraintes:

- Liées à l'environnement du site de l'expérience
- Accessibilité et Sécurité
- Procédures d'installation, traçabilité
- Communication avec les responsables de sites

❑ Compétences requises élargies:

- Infrastructure
- Manutention
- Mécanique, conception d'outillages simples ou complexes (nécessitent surtout une optimisation budgétaire)

❑ Différents types de sites:



- Accélérateurs et collisionneurs
- Sites naturels
 - ✓ Observatoire de surface
 - ✓ Observatoire sous-marin
 - ✓ Observatoire sous-terrain
- Spatial

Installation de détecteurs, accélérateurs et collisionneurs

❑ Contraintes:

- Nombreux problèmes d'interfaces entre les systèmes
- Nécessite une maîtrise totale de l'environnement et des moyens, difficultés d'accès
- Opérations effectuées par le personnel des instituts scientifiques avec les responsables de sites

❑ Outillage:

- Echafaudage, structure simple structure plus complexe et optimisée (conception, dimensionnement, fabrication, test et validation)
- Utilisation combinée d'air-pads pour soulever et de vérins hydrauliques pour déplacer (charges lourdes)



Position ouverte (CMS, CERN)



Insertion (CMS, CERN)



bars, décollement 1 cm, 350t, 1m en 10 mins)

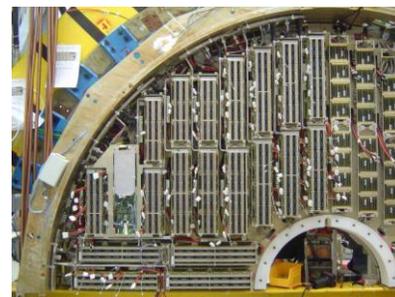
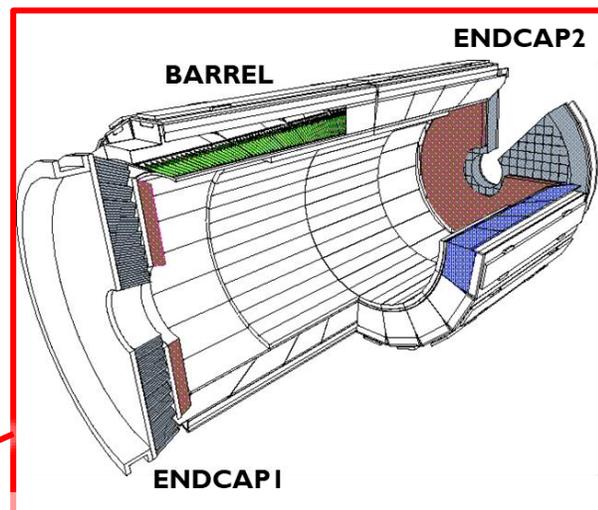
Air-pad, rail de guidage, vérin hydraulique

Calorimètre électromagnétique de CMS (ECAL) au CERN

Conception d'outillage spécifique, Mise en place d'échafaudages



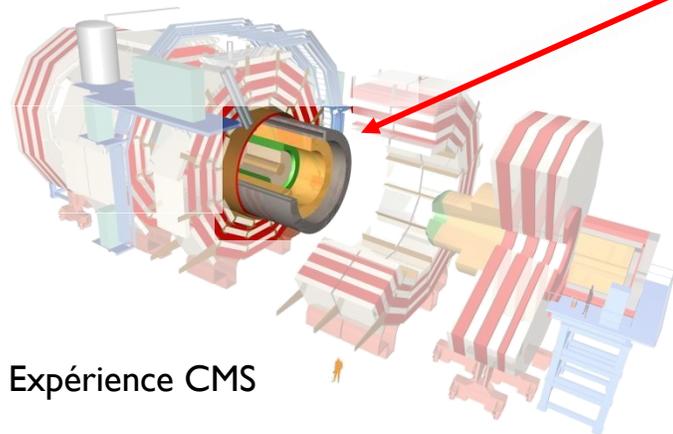
BARREL -
Supermodule intégré



ENDCAP - Dee intégré



Installation des structures supports,
échafaudages et outillages



Expérience CMS

Calorimètre électromagnétique de CMS (ECAL) au CERN

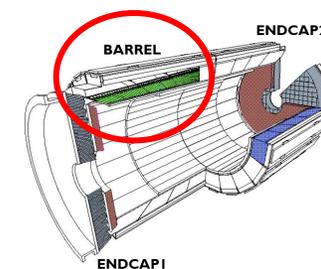
BARREL



Mise en position des modules sur le rail



Installation des modules un par un

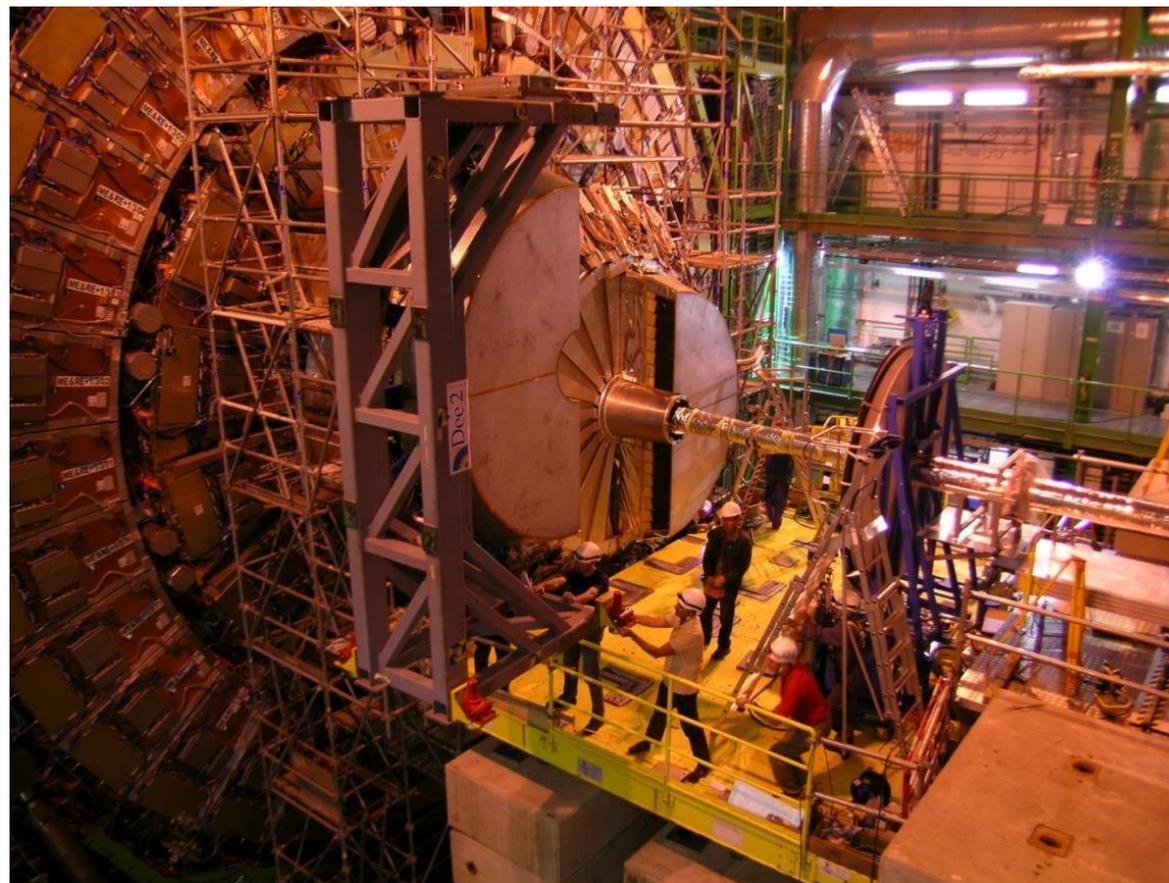


Calorimètre électromagnétique de CMS (ECAL) au CERN

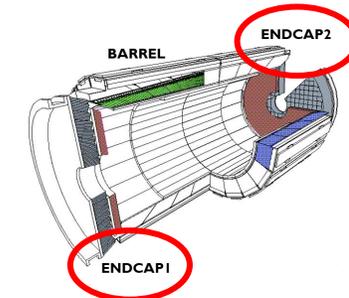
ENDCAP



Mise en position verticale



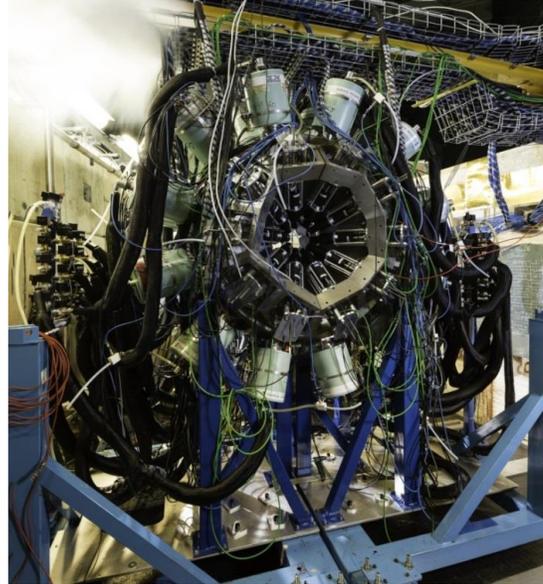
Installation sur son support



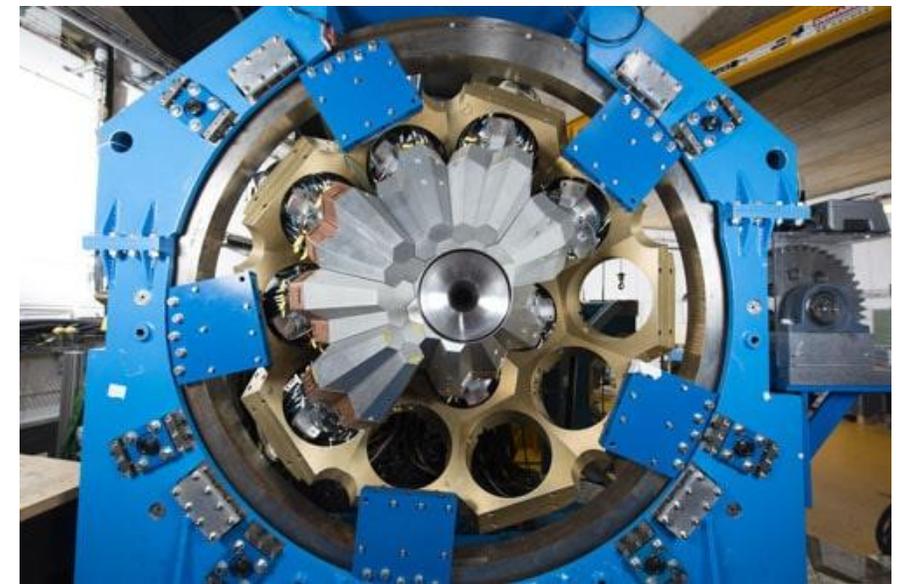
Structures mécaniques, détecteurs Ge (GANIL, Alto...)



Installation de la structure mécanique sur rails de guidage



Mise en des détecteurs Ge et du câblage



Installation des détecteurs Ge autour d'une chambre à vide

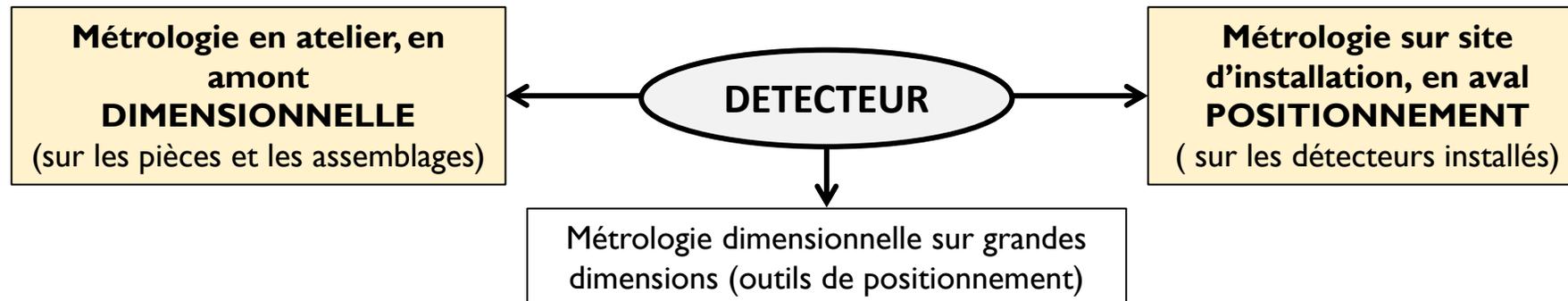
Métrologie des ensembles de détection

❑ METROLOGIE **DIMENSIONNELLE**: (voir 1^{ère} partie)

- Réalisée après de la fabrication et l'assemblage des ensemble de détections
- Spécifications dimensionnelles et angulaires (longueurs, angles) et spécifications géométriques (forme, orientation, position...)
- Instruments: réglet, pied à coulisse, micromètre, machine tridim, bras de mesure

❑ METROLOGIE DE **POSITIONNEMENT**:

- Réalisée sur des parties de détecteurs de grandes dimensions avant installation
- Réalisée sur les ensembles de détection installés auprès des accélérateurs
- La grandeur des dimensions à mesurer nécessite des instruments différents (théodolite, télémètre, caméras...)



Prise en compte des incertitudes de mesure dans les deux cas

❑ Pourquoi mesurer la position et la forme exacte du détecteur?

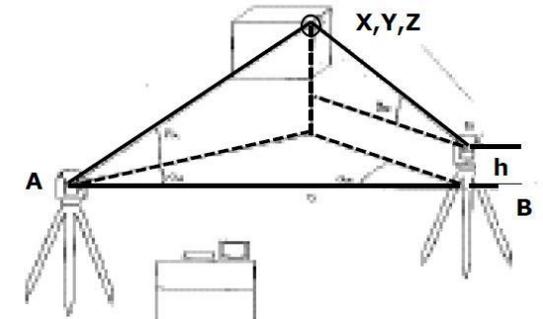
- Malgré la précision de fabrication, d'assemblage et de contrôle des détecteurs lors de la phase d'intégration, il existe toujours des différences entre la CAO et le produit construit
- Lors des installations, il apparaît également des décalages de positionnement des détecteurs par rapport au design théorique (entre les différents détecteurs et par rapport au faisceau)
- Ces différences doivent être connues afin de les implémenter dans les codes permettant la reconstruction des événements pendant les expériences
- Ces mesures nécessitent des instruments différents et des compétences spécifiques (géomètres)
- Un langage commun entre le géomètre et le mécanicien doit s'instaurer
- Les physiciens attendent des géomètres la livraison des positions relatives 3D des différentes couches de détecteurs jusqu'au cœur de l'expérience
- Parfois couteux en personnel et en temps
- A prendre en compte dès la conception, mise en place de cibles ou mires

❑ Comment mesurer les grandes dimensions et la position des détecteurs installés?

- Topométrie (mesure de longueur et d'angles, directe ou indirecte via angle) *Tachéomètre, Théodolite, Télémètre, Laser tracker*
- Photogrammétrie (mesure d'images 2D dans des positions différentes) *Caméras*

Topométrie

- Méthode utilisée initialement pour la détermination métrique des cartes
- Mesure directe avec décamètre
- Mesure indirecte avec télémètre et à partir des éléments d'un triangle (mesure des angles avec tachéomètre)
- Principaux procédés: intersection, le relèvement, le rayonnement et le cheminement
- Précision de l'ordre de 0,1 mm



Tachéomètre



Cibles et mires à positionner sur les détecteurs



Théodolite



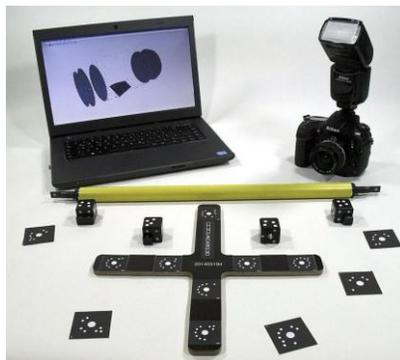
Niveau numérique



Laser tracker

Photogrammétrie

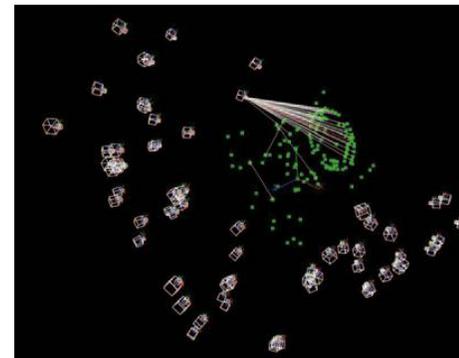
- Technique permettant de déterminer les dimensions et les volumes des objets à partir de mesure effectuées sur des photographies montrant les perspectives de ces objets
- Basée sur le même principe que les yeux humains
- On ne mesure pas l'objet mais son image 2D
- On traite les images 2D pour obtenir une représentation 3D de l'objet
- Il est nécessaire d'avoir au moins deux photos de deux positions différentes
- Mise à l'échelle obligatoire, utilisation de barre calibrée ou connaissance de longueurs sur l'objet
- Précision de l'ordre de 0,5 mm



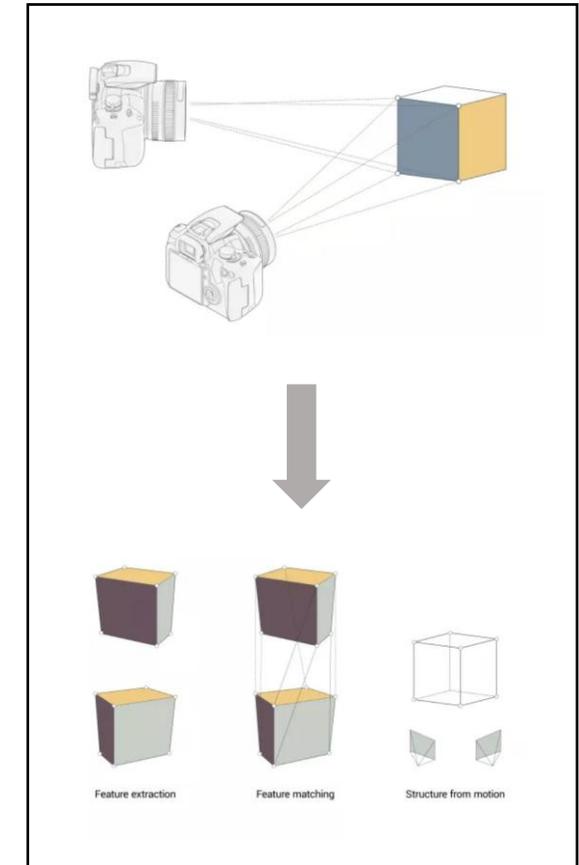
Caméras + flash avec cibles photogramétriques



Au moins 2 caméras pour la photogrammétrie



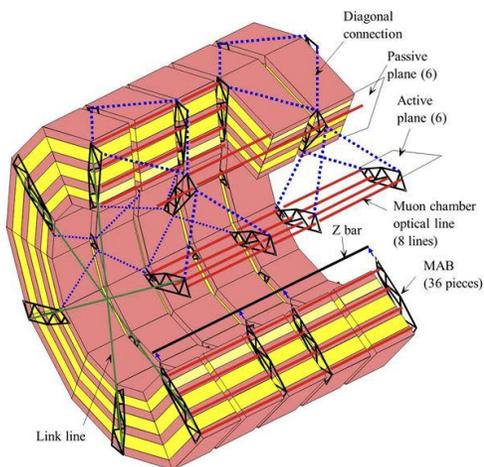
Visualisation spatiale des stations de caméras sur un logiciel dédié



Principe de fonctionnement

Photogrammétrie

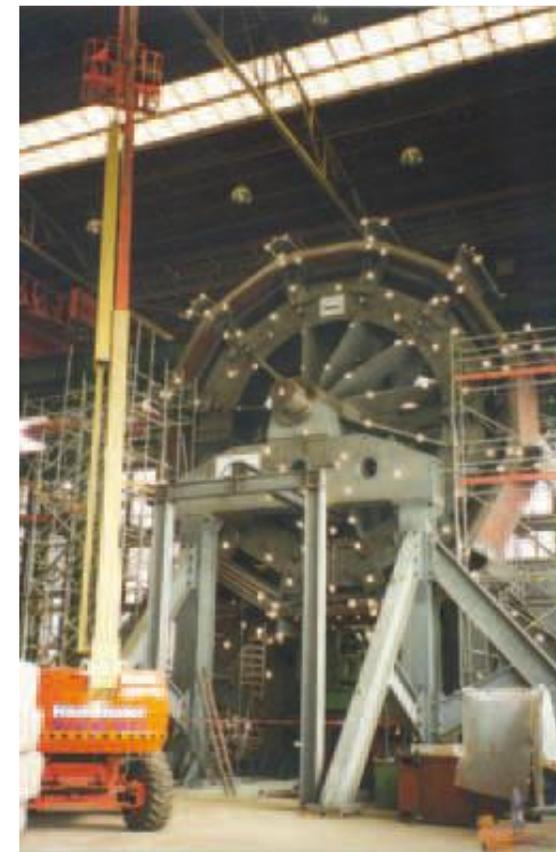
- Utilisé dans les ateliers pour mesurer et valider les fabrications (grandes dimensions)
- Utilisé pour mesurer la position exacte et finale des détecteurs
- Utilisé dans des systèmes complets de monitoring de position



Calibration optique d'une structure



Installation des structures



Contrôle en usine de structure de grande dimension

Système d'alignement du détecteur à muon de CMS avec cibles montées sur 36 structures

DéTECTEURS sur sites naturels

❑ Contraintes:

- Difficultés liées à l'environnement et maîtrise seulement partielle des éléments
- Accessibilité souvent difficile et risquée pour les détecteurs
- Les opérations sont effectuées en étroite collaboration avec des entreprises spécialisées

❑ Environnement:

- Désert (faible pollution lumineuse)
- Altitude
- Sous-marin (utilisation du milieu)
- Sous-terrain (blindage naturel)
- Plaine (grande surface)

❑ Transport:

- Aérien
- Routier
- Marin



Bateau pour le transport d'ANTARES



Arrivée de la structure
des télescopes CTA

Télescopes de CTA (Canaries)

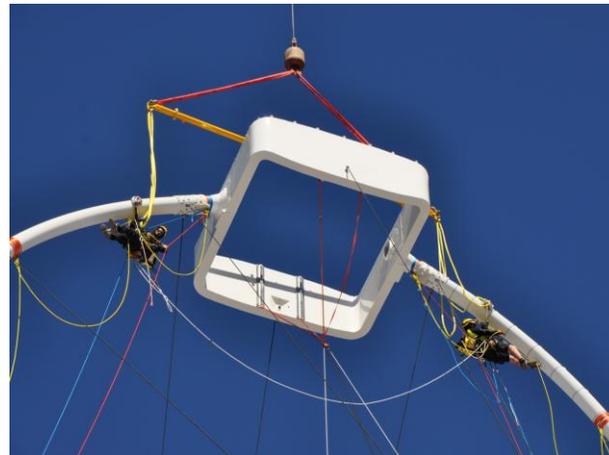


Site de l'expérience CTA



Télescope CTA

Télescopes de CTA (Canaries)



Télescopes de CTA (Canaries)

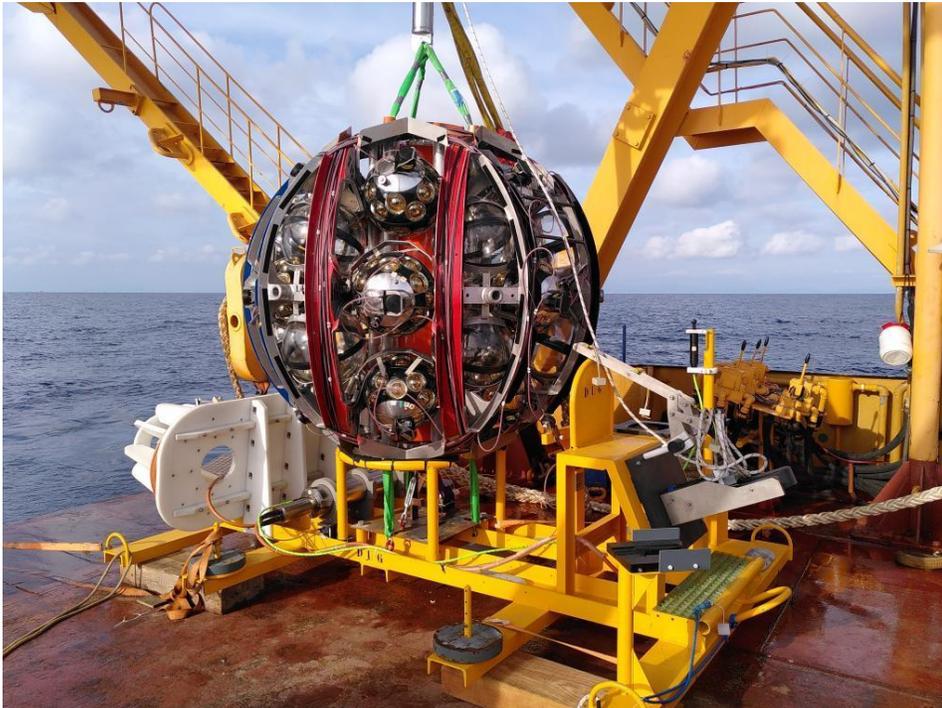


Grutage du CSS, en accéléré

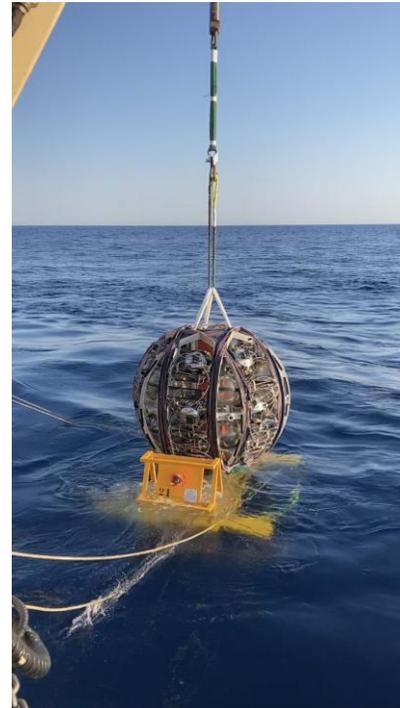


Fixation définitive des haubans a la nacelle, en accéléré

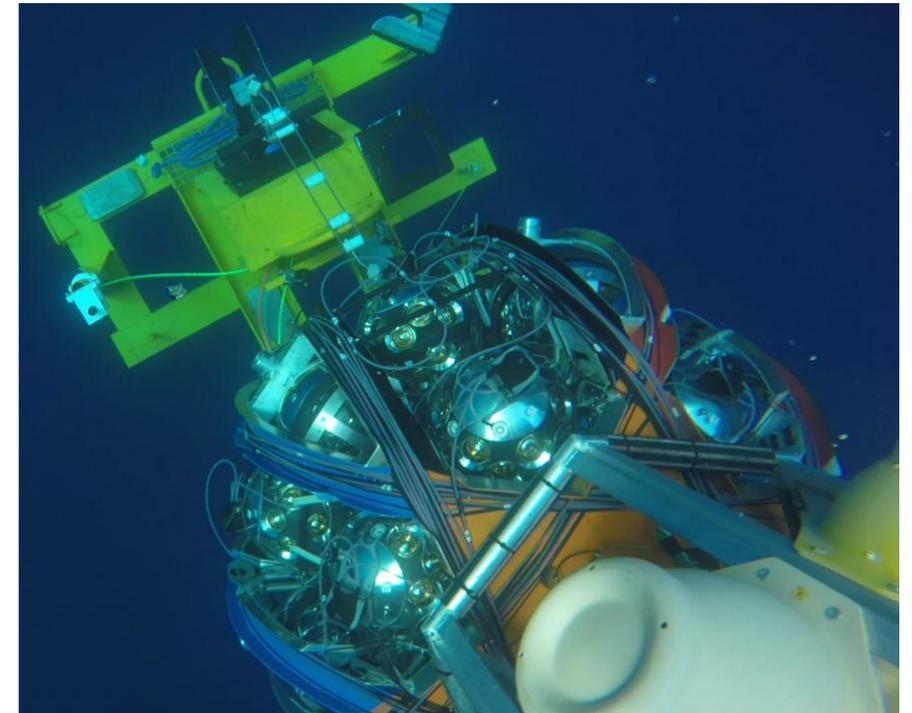
DéTECTEURS de KM3NET (mer méditerranéenne)



Installation des lanceurs pour mis à l'eau

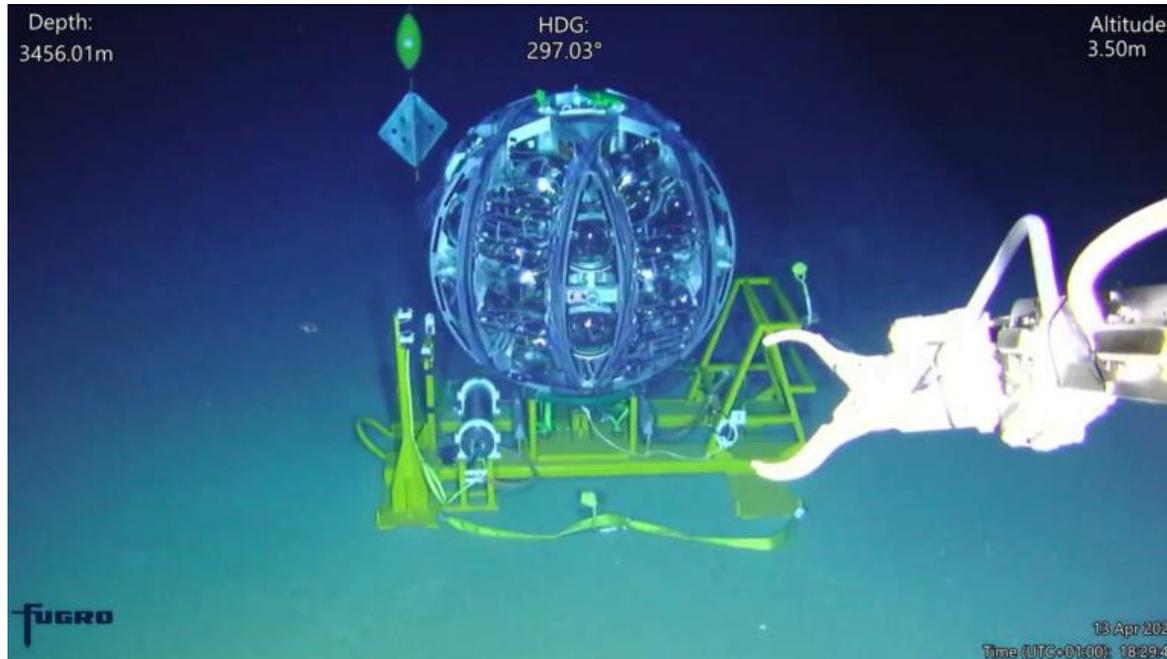


Mise à l'eau des
lanceurs



Descente vers les abysses

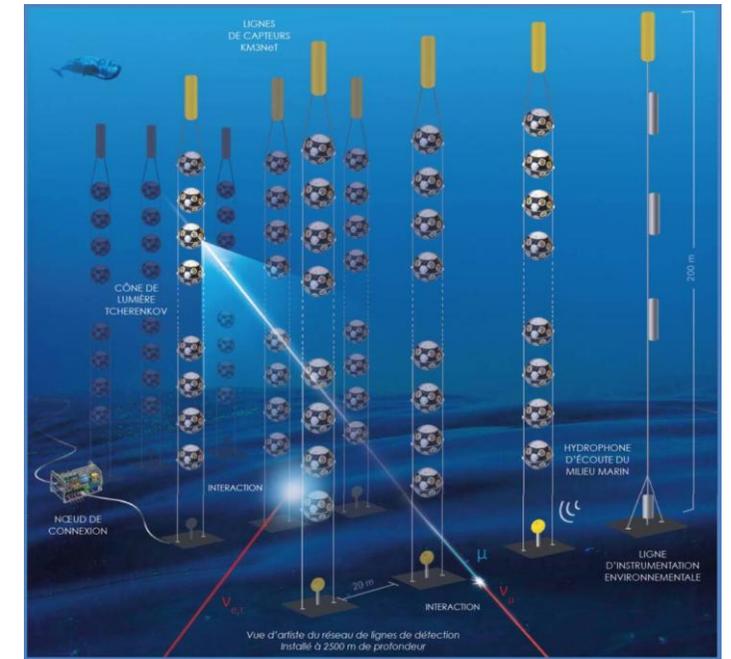
DéTECTEURS de KM3NET (mer méditerranéenne)



Connexion avec l'aide d'un ROV (véhicule sous-marin téléopéré)



Remontée du lanceur



Site avec tous les modules

Photomultiplicateurs de Super-Kamiokande (Japon)

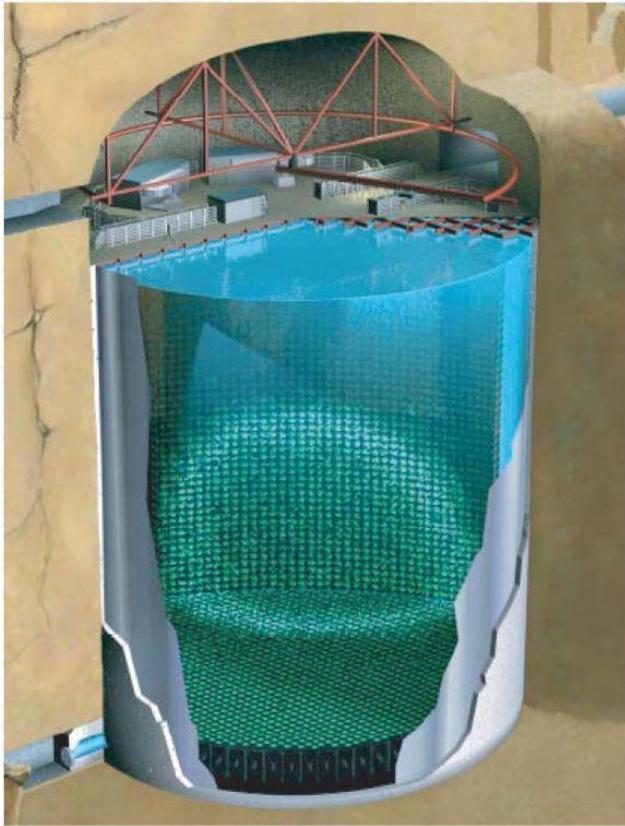
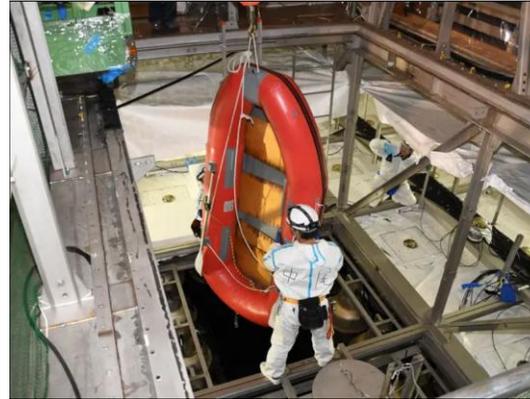


Schéma de l'expérience



Outil adapté mais
« atypique »



Installation manuelle des photomultiplicateurs

DéTECTEURS dans le spatial

❑ Contraintes:

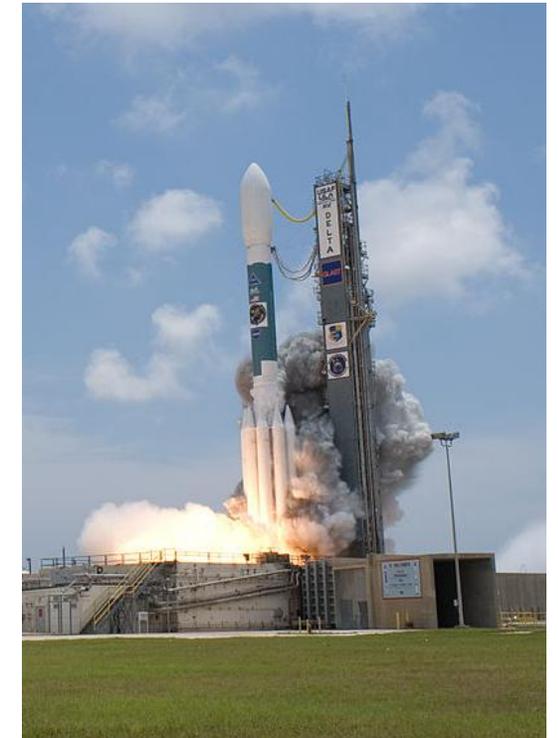
- Difficultés liées à l'environnement et maîtrise seulement partielle des éléments
- Le lancement est assuré par un opérateur extérieur aux équipes scientifiques
- Contraintes liées aux organisations type NASA ou ESA
- « Obligation » de satisfaire le calendrier imposé (orbites, planification des moyens financiers et humains)

❑ Environnement:

- Interface avec le lanceur
- Contraintes mécaniques: accélération, vibrations, chocs thermiques...
- Plus d'accessibilité possible

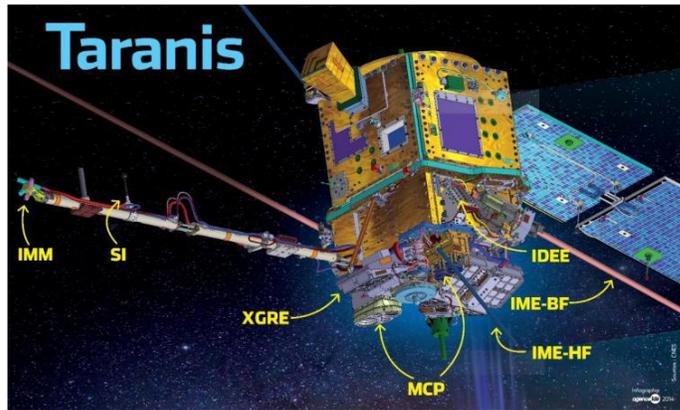


Télescope Fermi
(2,5 m de côté et de 2,8 m de haut
avec une masse de 4,3 tonnes)

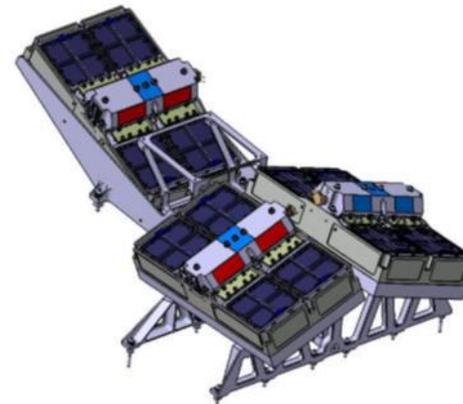


Décollage du lanceur Delta
II emportant Fermi

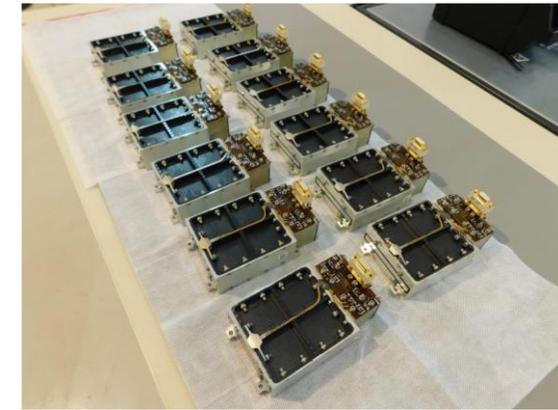
Instruments pour la mission TARANIS



Mission satellite Taranis



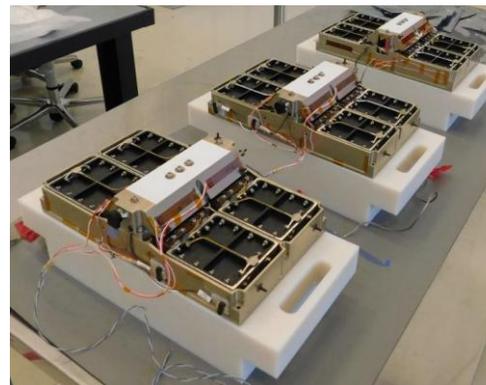
Ensemble cristaux, plastiques et PMt



Intégration des unités de détection



Test vibratoire



Unités prêtes au lancement



Echec du lanceur VEGA, mission Taranis 2 ?

Proche du spatial, les vols en ballon

❑ Capacités et avantages:

- Permet d'effectuer des expériences hors sol (conditions différentes des labos)
- Permet de limiter les coûts par rapport à une mission spatiale
- Permet de réaliser des observations astrophysique et climatiques

❑ Ballon stratosphérique ouvert (BSO):

- L'intérieur du ballon communique avec l'extérieur, le gaz est en équilibre
- Hauteur de 40 km (avec de l'Hélium)
- Durée de quelques heures à quelques jours
- Charge utile de 2500 Kg
- Chaîne de vol de 100 à 300 m (Enveloppe + nacelle + radar + expériences)

❑ Ballon stratosphérique pressurisé (SPB):

- Volume de l'enveloppe constant et pression supérieur à celle de l'atmosphère
- Enveloppe hermétique, le gaz ne s'échappe pas dans l'atmosphère
- Durée de plusieurs semaines à plusieurs mois (si pas de fuite)



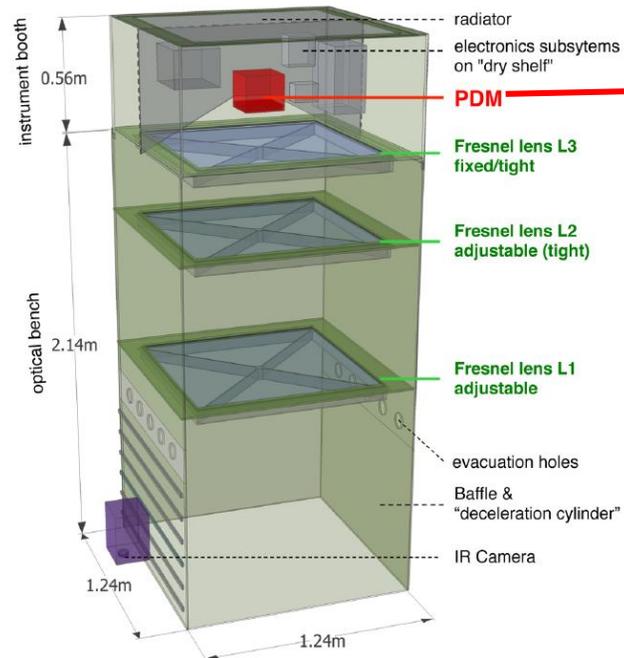
Victor Hess au départ d'un vol ballon en 1911
Etude de la variation de la radioactivité avec l'altitude
(Premier vol ballon scientifique à Paris 1783)

Vol ballon

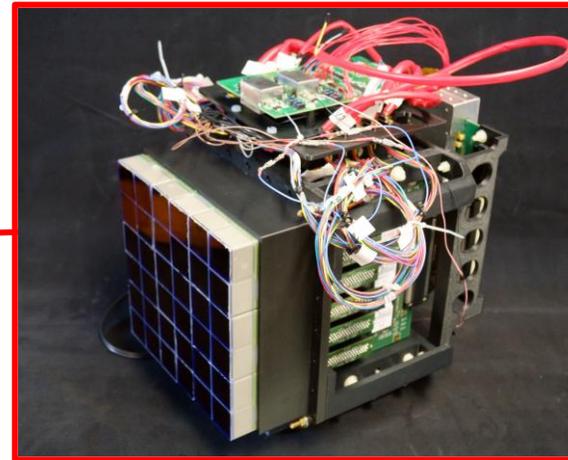
Missions EUSO-balloon et EUSO-SPB



Intégration des différents dans la « gondole »



Composition du détecteur EUSO-balloon

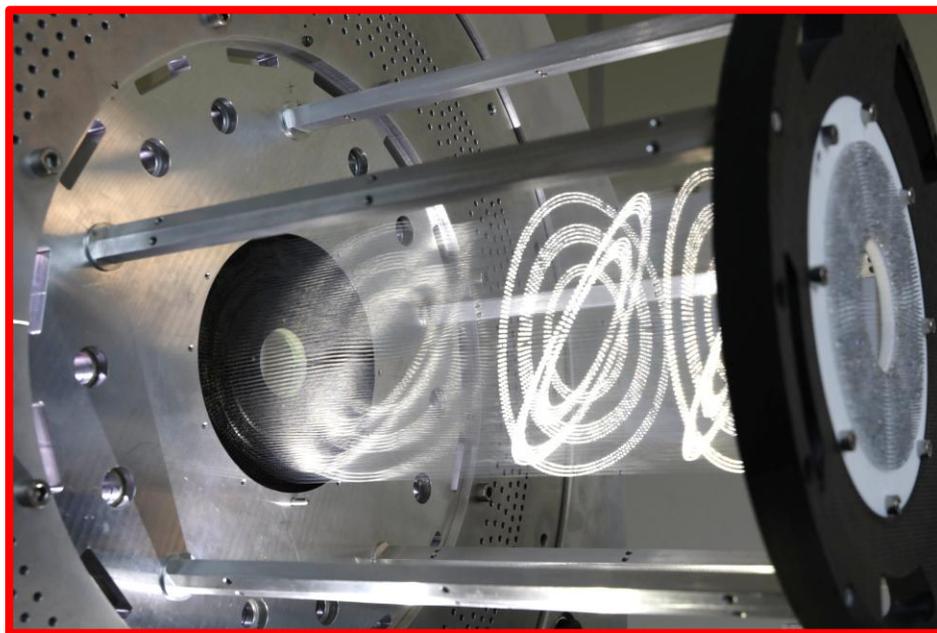


Remplissage He du ballon avant le décollage



EUSO-SPB équipé de panneaux solaires (mission plus longue)

Attention aussi au démontage...



ALERT detector (Jlab) -2025
Hyperbolic Drift Chamber – 3026 fils Aluminiums 30 μ m



Support et disponibilité

- Les temps des équipes techniques sur les sites d'installation est limité
- Nécessité de bien documenter le détecteur et les procédures d'installation à communiquer aux responsables de sites pour qu'ils puissent être autonomes
- A la mise en route, le responsable mécanique du détecteur doit se rendre disponible auprès des responsables scientifiques et des responsables de sites

Intervention sur site

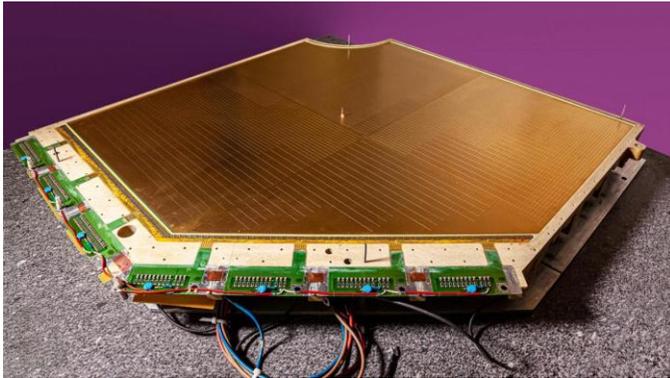
- Parfois nécessaire de se rendre en urgence sur les sites d'installation
- Déplacement sur site également pour récupérer un détecteur pour maintenance
- La fréquence des interventions dépend du type d'expérience et de la proximité (plus fréquent en physique nucléaire)
- Les expériences de physiques de particules nécessitent une logistique plus grosse donc sont moins souvent démontées



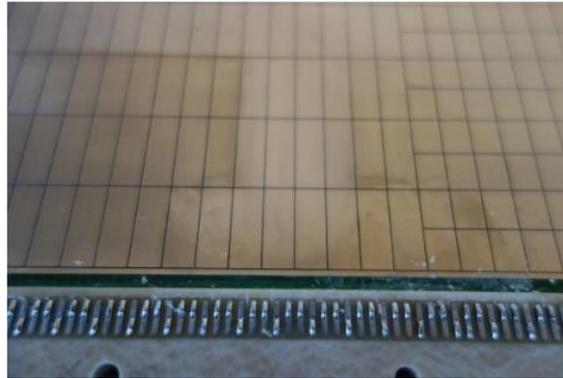
Démontage de quadrants d'ALICE

Réparation et upgrade

- Amélioration des performances de l'électronique nécessitant de changer des circuits
- Ajouts ou retraits de détecteurs
- Problème de fonctionnement de détecteurs gazeux (détente ou casse mécanique de fils, usure localisée...)



Ouverture des quadrant d'ALICE
changement de l'électronique et nettoyage



Nettoyage de pads de chambre à
fils d'ALICE



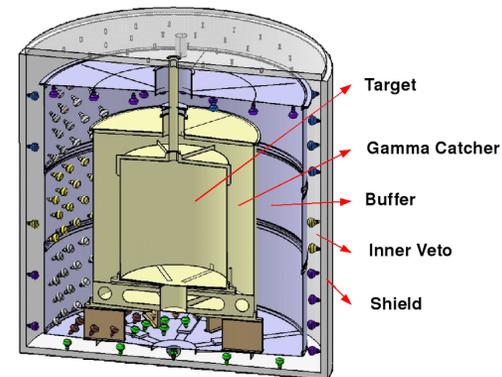
Réparation de fils cassés sur SOFIA. Envoi de
la chambre de GSI (Allemagne) vers Orsay

Démantèlement et récupération de matériel

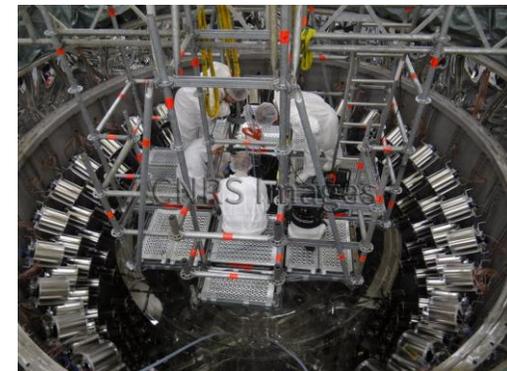
- Les grosses expériences doivent inclure un plan de démantèlement, nécessite d'anticiper parfois sur plus de 20 ans
- Importance capitale de la gestion documentaire
- La budgétisation est difficile
- Le CERN va voir arriver des phases de démantèlement
- Les équipes mécaniques doivent intégrer ces phases dans le management
- Pas toujours évident de motiver les troupes pour du démantèlement
- Possibilité de récupérer des câbles, des cristaux, des plastiques, des PMTs, baies, pompes, cuves...
- Le matériel est parfois récupéré pour être exposé, pour des musés, pour le grand public



Expérience Double Chooz sur le site de la centrale nucléaire des Ardennes



Composition des détecteurs



Récupération des PMTs de l'expérience pour le projet Liquidó

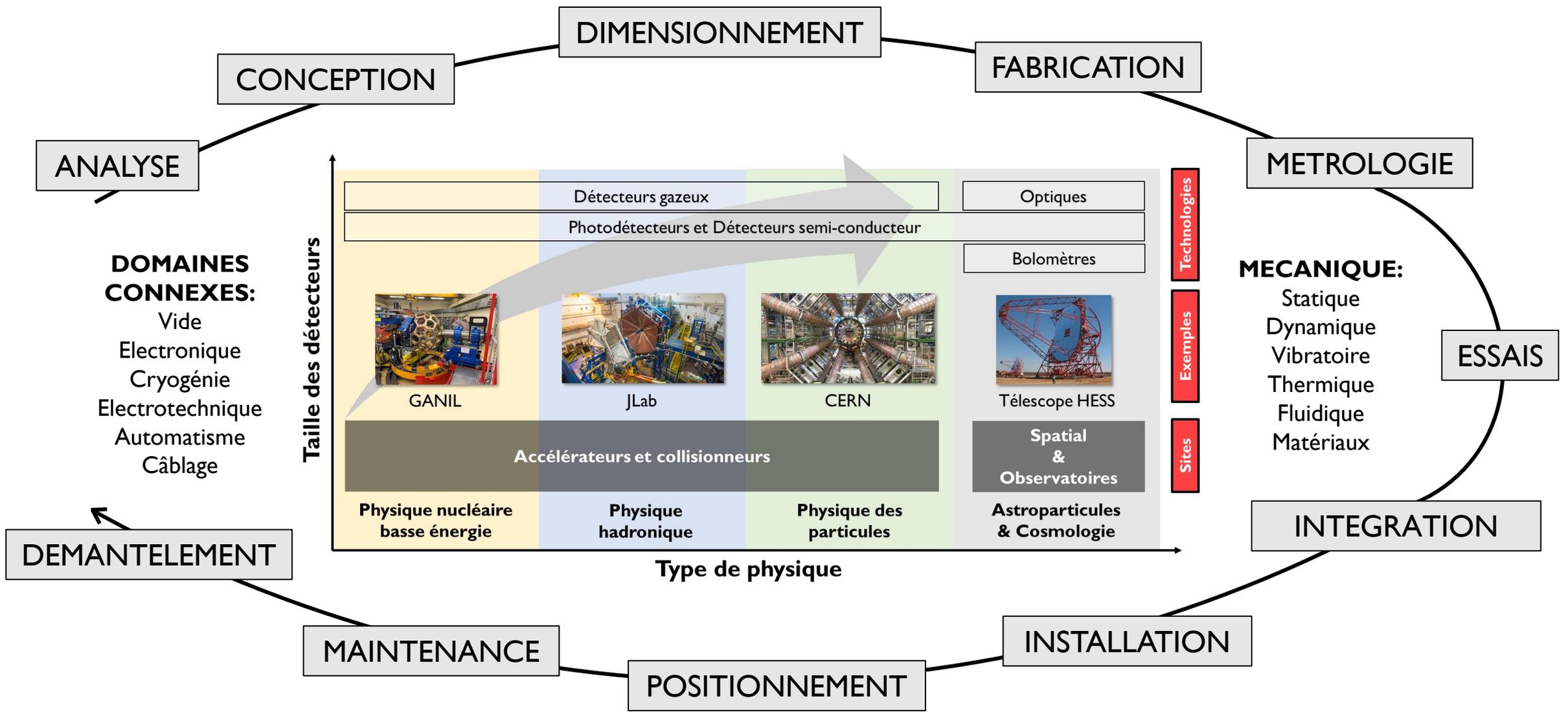


Sommaire

2^{ème} partie

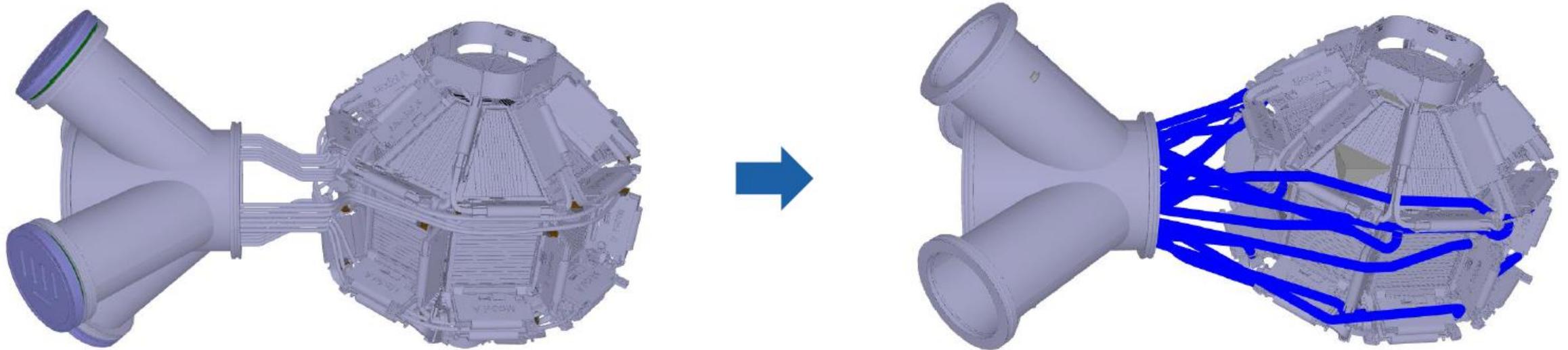
5. Conclusion

- Résumé
- Perspectives



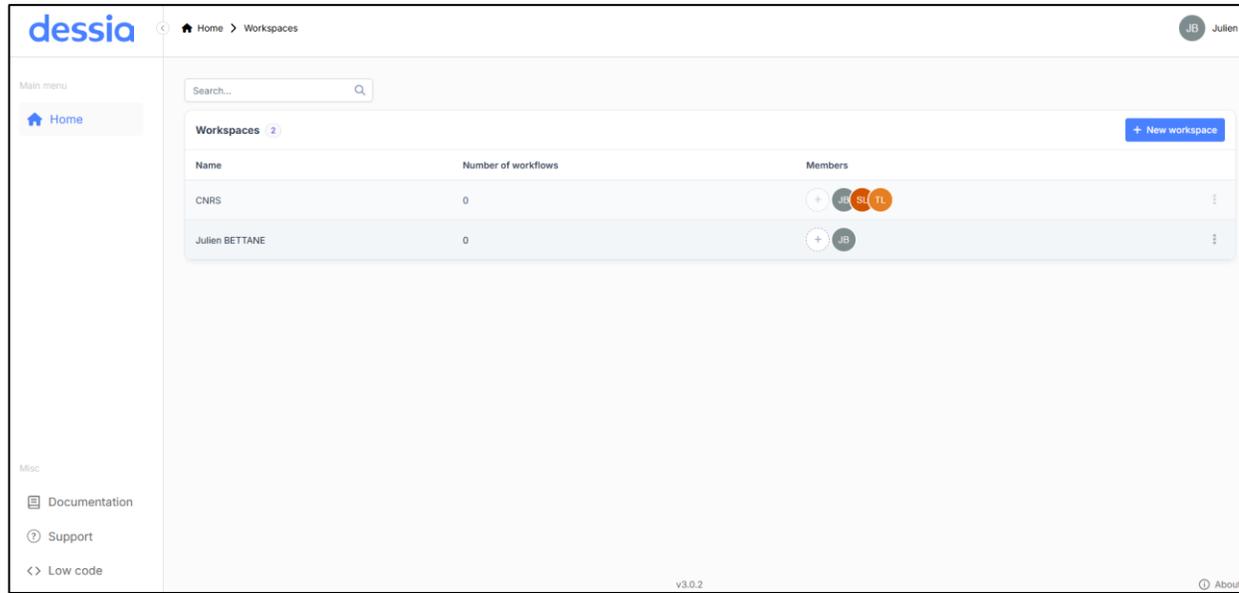
Configurer la CAO pour le routage automatique:

- Collaboration DESSIA-IJCLab en cours (câblage automatique détecteur de particules)
- Définition des ports : positions, tangentes et longueurs
- Définition des conduits à tracer : associer chaque port d'entrée à son port de sortie
- Définition des règles métier : règles de proximité et de mutualisation entre les conduits

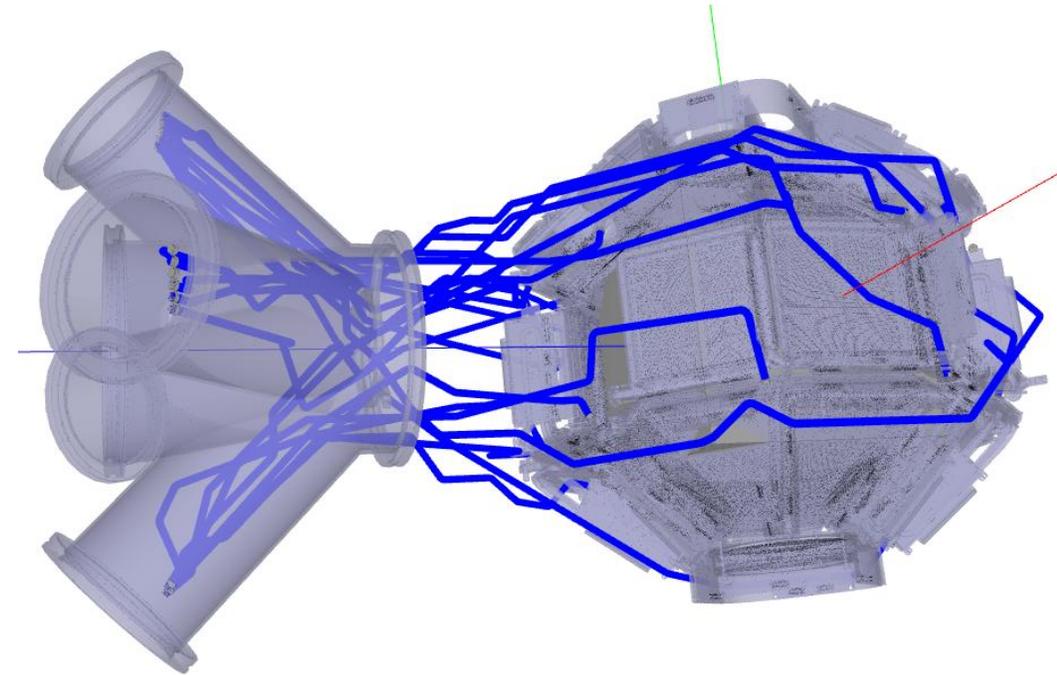


Routage automatique:

- « kick-off » meeting le 15 septembre
- Mise à disposition de la plateforme DESSIA pour 2 utilisateurs IJCLab (CNRS)
- Converger vers une solution pour la fin de l'année 2025
- → Projet 2026, avec stagiaire ?



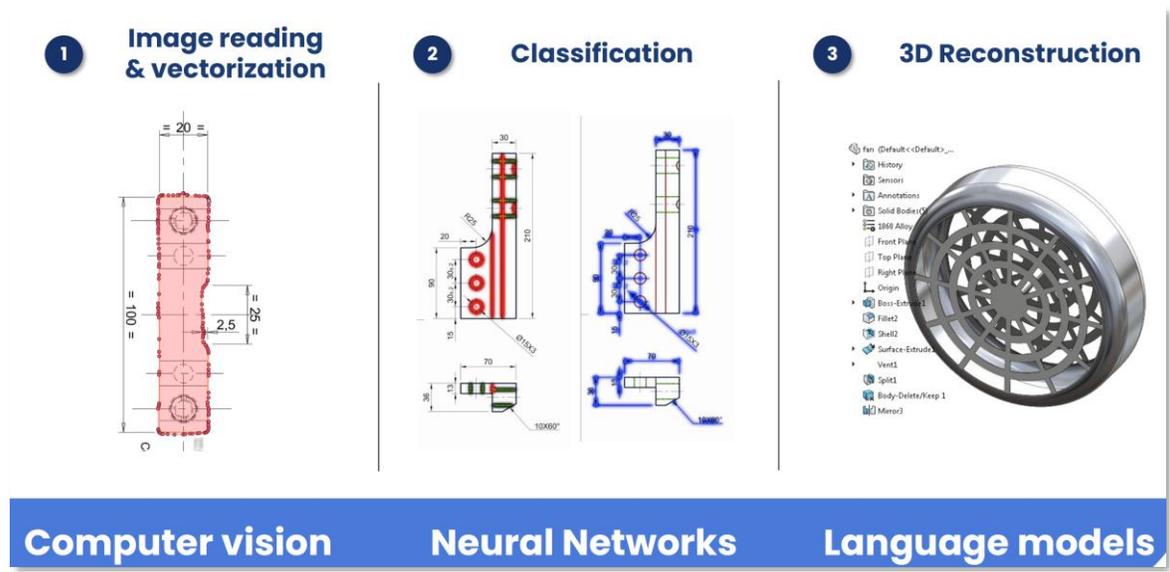
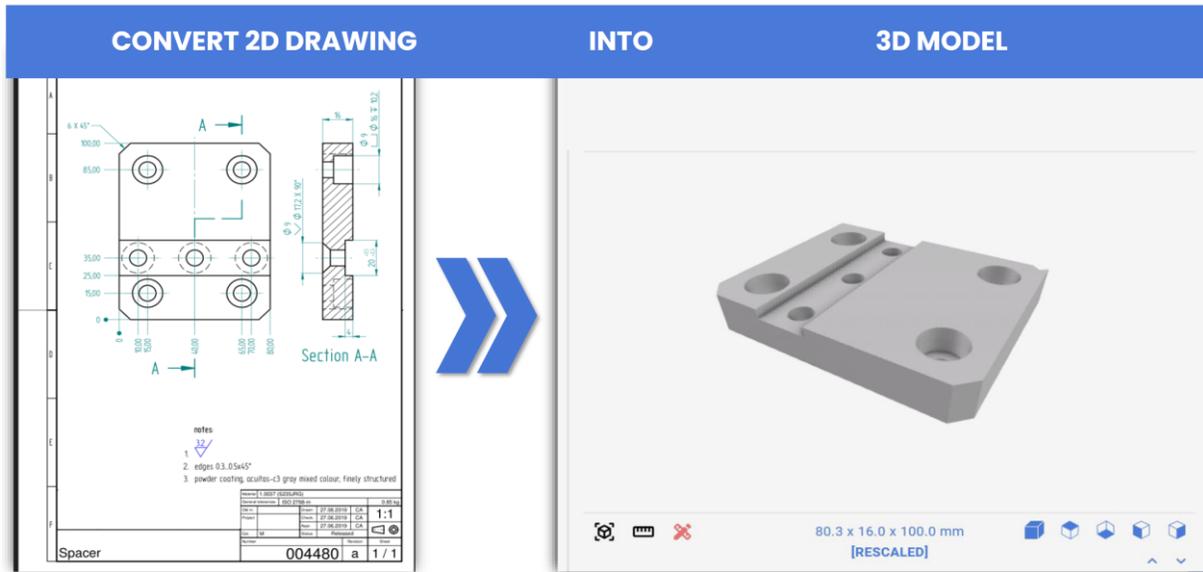
Dessia Platform



Résultat actuel

Reconstruction 3D:

- A partir de drawings 2D
- 20% de dessins peuvent être reconstruits avec une réussite de 90%
- Objectifs: 100% pour 2027 (+ Scan to 3D)
- → Suivi de l'avancement avec IJCLab (via DataIA)

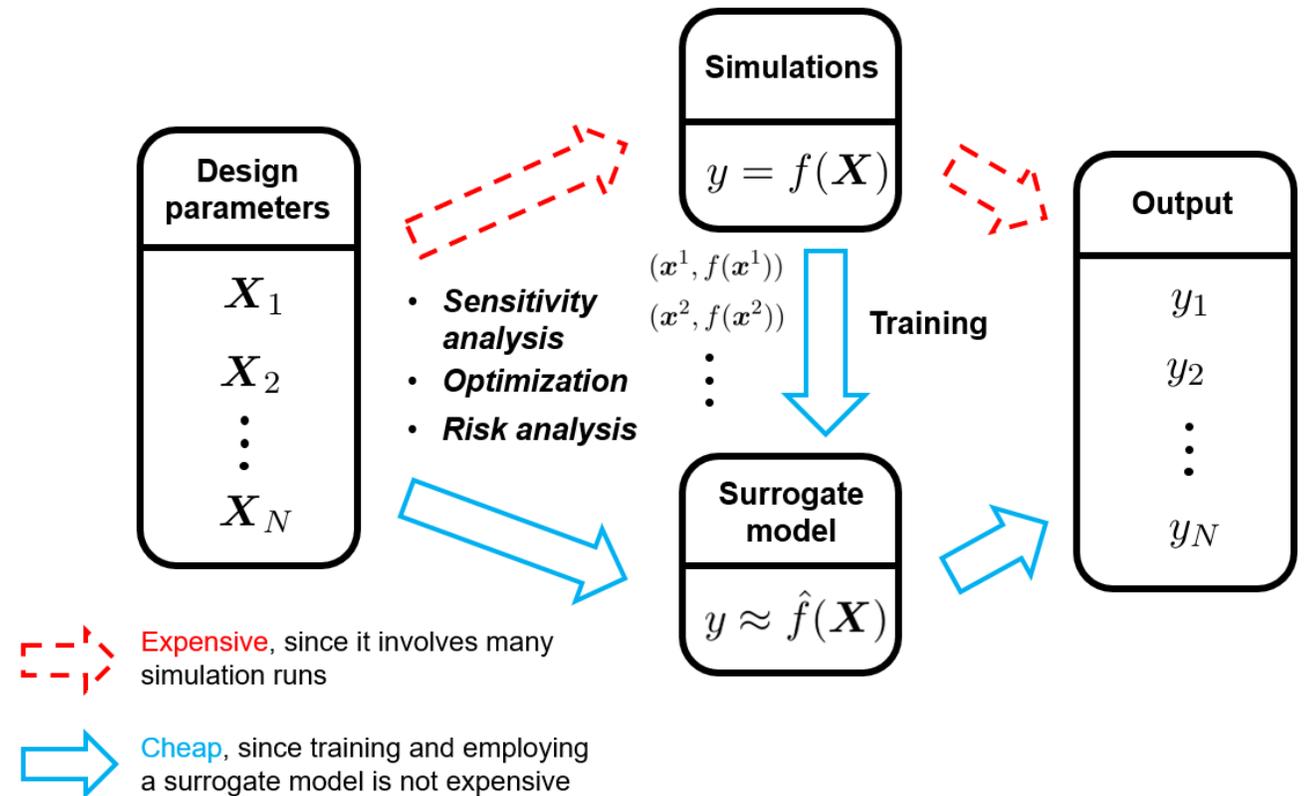


Simulation avec entraînement

Remplacer le solveur physique par un modèle surrogate (réduit)

Surrogate model (modèle de substitution):

- Représentation mathématique ou statistique allégée d'un modèle complexe (EF, CFD...)
- Entraîné ou construit à partir de données simulées ou expérimentales
- 2 types surrogates: ROM (Reduced Order Model) ou Surrogate data-driven
- Très rapide (exploration) mais approximatif

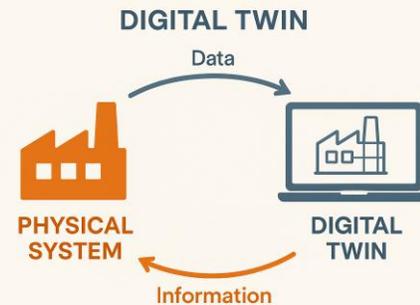


Jumeaux Numériques

C'est une représentation virtuelle d'un objet réel (simuler et décrire), qui évolue en même temps que lui et qui agit sur le réel, dans une boucle fermée

Éléments:

- Entité physique
- Modèle numérique
- Couplage de données temps réel
- Analyse & simulation
- Interface utilisateur



Différences avec une CAO:

- CAO → 1er niveau du jumeau numérique
- Simulation → 2nd niveau du jumeau numérique
- Evolution temporelle: le jumeau change quand l'objet change
- Boucle fermée: le jumeau revoie des enseignements ou consignes
- Apprentissage continu

□ Actuellement:

- Exploitation et upgrade du CERN
- 2020-2030: Mise en service d'expériences (au GANIL, à Jefferson Lab, DUNE, FAIR...)

□ A venir:

- Arrêt du LHC? Démantèlement de détecteurs (ALICE 2033)?
- Gros projets en perspectives (EIC, Einstein Telescope, FCC...)
- Dépendra des contextes géopolitique, budgétaire, énergétique
- Evolution métier (IA)

□ Contexte CNRS:

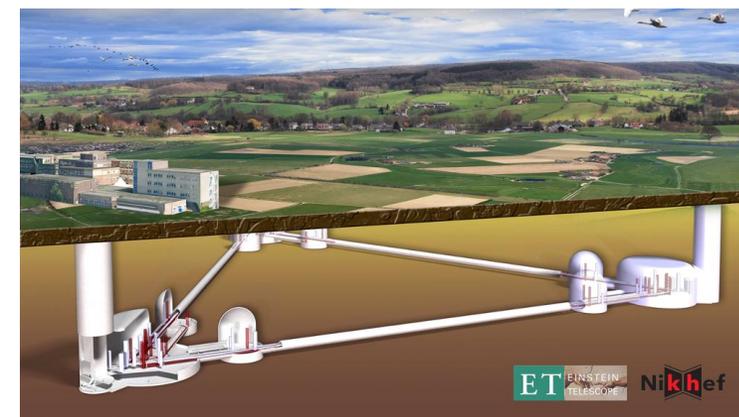
- Suivi des tendances en terme d'embauche (réduction du nombre de techniciens)
- Faire connaître le métier de mécanicien à l'IN2P3 (formations, stagiaires, apprentis...)

□ Veille technologique:

- R&D interne à mener (nouveaux matériaux pour la détection...)
- Réseaux professionnels (calcul, détecteurs, alignement...)
- Workshop techniques détecteurs



Future Circular Collider



Télescope ondes gravitationnelles
Einstein Telescope



Mécanique des Détecteurs

Du détecteur à la mesure

Biblio 1/2

- « Mécanique des détecteurs », Marc Anduze / LLR
- « La simulation multi-physique », Lionel Gendre et David Neron / ENS Cachan, Université Paris-Saclay
- « Simulation thermique pour ComptonCam », Christine Legalliard / IJCLab
- « Optimisation topologique », Techno sans frontière, Lynda Allouache et Jonathan Van Rhijn
- « Guide du dessinateur industriel », Hachette Technique, André Chevalier
- « Impression 3D photodétection », Andrey Boyarintsev et Sergey Barsuk/ IJCLab
- « Réseau fabrication additive », Stéphane Jenzer / IJCLab / <https://reseaufabricationadditive.wordpress.com/>
- « Fabrication dans les laboratoires », ateliers mécaniques d'Orsay IJCLab
- « Fabrication des Large Size Telescope, CTA », Journées Techniques Détecteurs 2021, Guillaume Deleglise / LAPP
- « Xenon », Conférence MDS2 2019, Grégory laquaniello / IJCLab
- « Calorimètre électromagnétique pour ALICE », Conférence MDS2, Jean-Sébastien Stutzmann / Subatech
- « Intégration CND et NPS », atelier de montage détecteurs / IJCLab
- « Intégration du calorimètre CMS au CERN », Marc Anduze / LLR
- « Mise en œuvre de photomultiplicateurs dans les abysses avec KM3NeT », Journées Techniques Détecteurs 2021, Sylvain Henry / CPPM
- « Spectromètre à muons d'ALICE », Conférence MDS2 2019, Hervé Carduner / Subatech
- « Quadrants d'ALICE », présentation de service RDD, Jean Peyré / IJCLab
- « Micromégas courbe », Conférence MDS2 2019, Stephan Aune/ IRFU CEA
- « QUBIC, Interféromètre bolométrique », Jean-Pierre Thermeau / APC



Mécanique des Détecteurs

Du détecteur à la mesure

Biblio 2/2

- « Réalisation mécanique bolomètre CUPID », atelier de fabrication d'Orsay, Eric Guérard / IJCLab
- « Montage de détecteurs diamants », Journées Techniques Détecteurs 2021, Jean-François Muraz / LPSC
- « Fabrication des miroirs pour VIRGO », Journées Techniques Détecteurs 2021, Benoit Sassolas / IP2I LMA
- « Chargeur de filtres LSST », mécanique / APC
- « Métrologie appliquée à l'expérience CMS au CERN », Jean-Frédéric FUCHS – Raphaël GOUDARD – Christian LASSEUR – Jean-David MAILLEFAUD – Aurélie MAURISSET / CERN
- « Instrument XGRE, projet TARANIS », Journées Techniques Détecteurs 2021, Damien Pailot / APC
- « D'EUSO-Balloon à EUSO-SPB : intégration, tests et résultats », thèse de doctorat d'Astrophysique, Simon Bacholle / IPGP
- « Polissage de fibres optiques dans le cadre du projet d'upgrade de AUGER », Journées Techniques Détecteurs 2021, Miktat Imre / IJCLab
- « Analyse vibratoire projet ILD », T. Pierre-Emile / LLR
- « Analyse fluide multiphasique, Refroidissement CO2 », Roman Kossakowski / LAPP



Mécanique des Détecteurs

Du détecteur à la mesure

SLIDES ADDITIONNELS

Les 3 Lois de Newton

1. Loi de l'Inertie

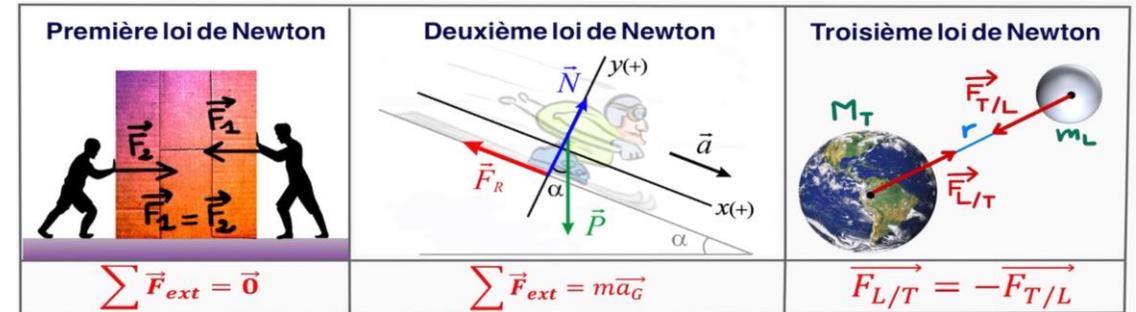
« Un objet en mouvement reste en mouvement et un objet au repos reste au repos, à moins qu'une force extérieure n'agisse sur lui. »

2. Loi Fondamentale de la Dynamique

« La force nette agissant sur un objet est égale au produit de sa masse et de son accélération ($F = ma$). »

3. Principe d'Action et de Réaction

« Pour chaque action, il y a une réaction égale et opposée. »



PFD: $F = m \cdot dv/dt = m \cdot a$

La somme des force est égale à la variation de la quantité de mvt

Héritage Historique

Les lois de Newton ont révolutionné la physique, marquant le début de la mécanique classique et jetant les bases de la science moderne.

Elles ont permis d'expliquer et de prédire le mouvement des objets sur Terre et dans l'univers, contribuant à une compréhension profonde de la nature.

Applications

Utilisées dans de nombreux domaines, des calculs d'ingénierie aux explorations spatiales, les lois de Newton sont omniprésentes dans notre compréhension du monde.

Très grande diversité de développements

❑ Dimensionnelle:

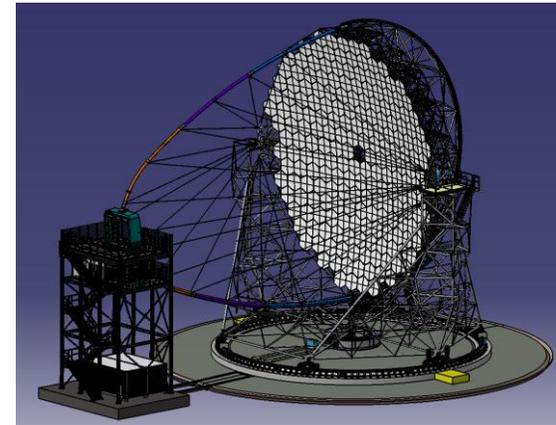
- Masse de quelques kg à plusieurs milliers de tonnes
- Quelques cm à **plusieurs dizaines de mètres**

❑ Technologique:

- Photodétecteurs
- Détecteurs gazeux
- Semi-conducteurs
- Bolomètres
- **Optique**

❑ Contexte et environnement:

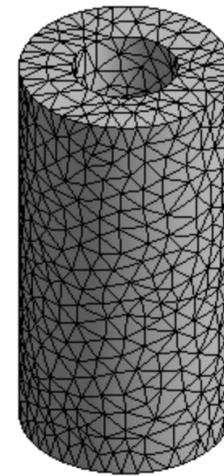
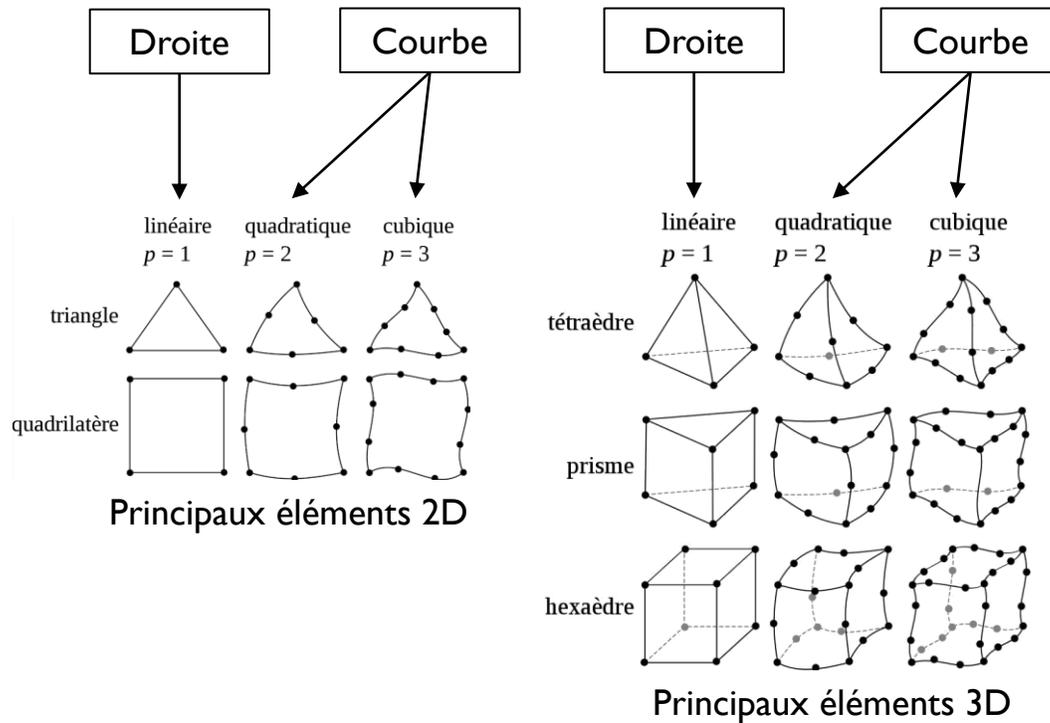
- Accélérateurs et collisionneurs
- Spatial
- **Observatoires**



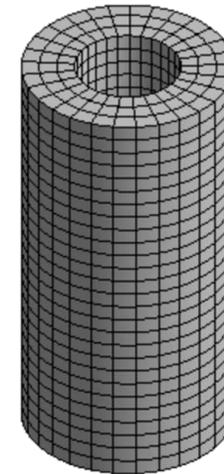
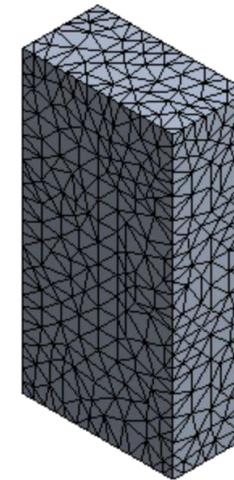
CTA, Canaries, Large Size Telescope

Comment résoudre un problème numérique?

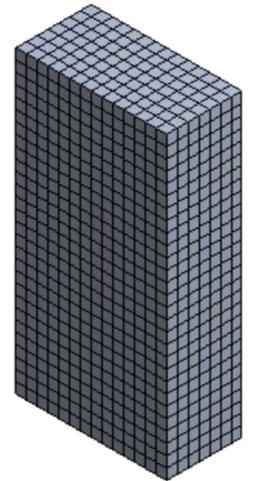
Petite note sur la discrétisation dans l'espace



Maillage tétraédrique (non structuré)

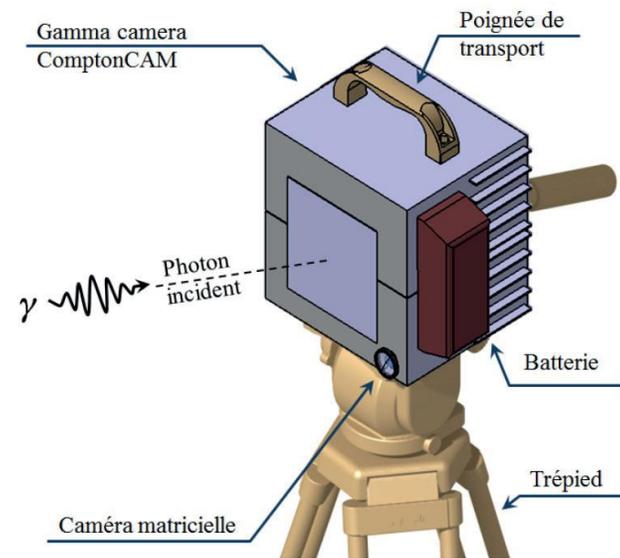
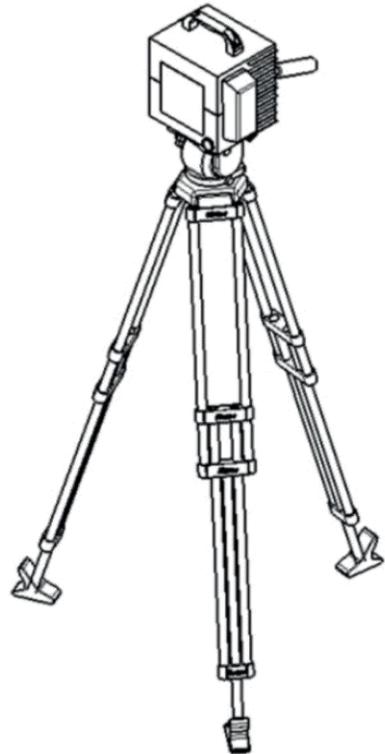


Maillage hexaédrique (structuré)
Surtout pour les formes simples

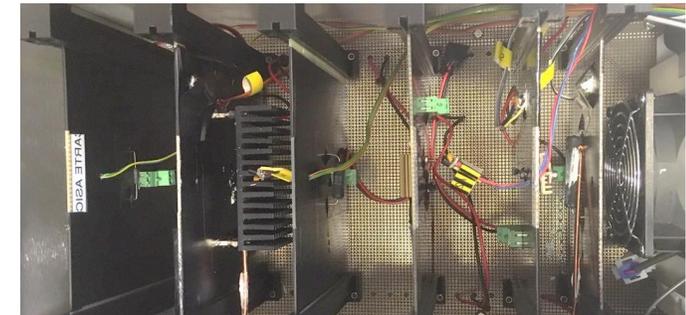
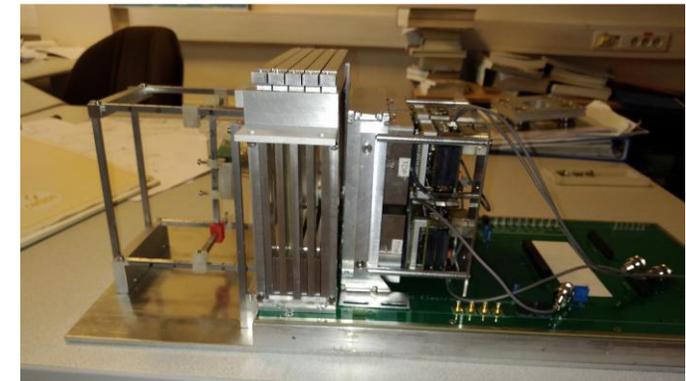


Simulation numérique, couplage thermo-fluidique et thermo-électrique

Projet ComptonCam: Développement d'une gamma caméra portable ultra-sensible pour la localisation et la caractérisation de déchets radioactifs de démantèlement (Projet de valorisation)



Dispositif de détection compact

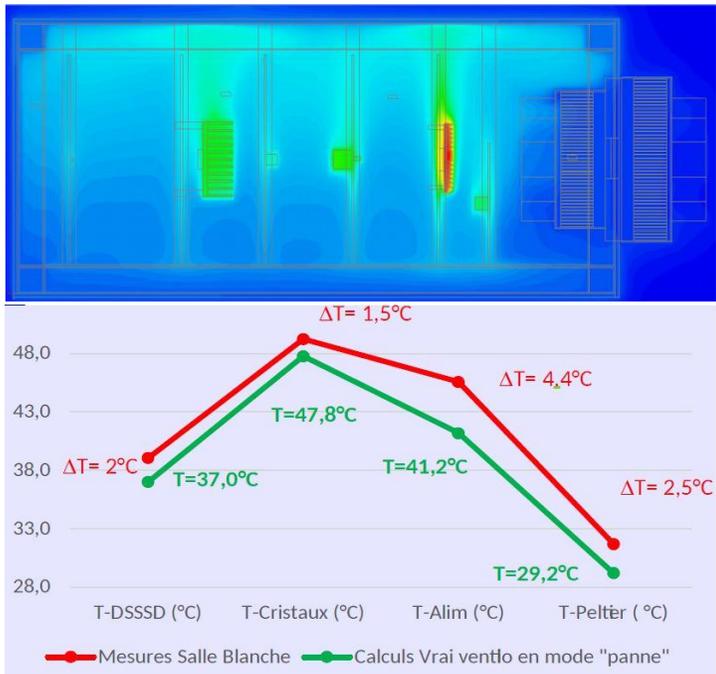


Banc de test et prototype de mesure

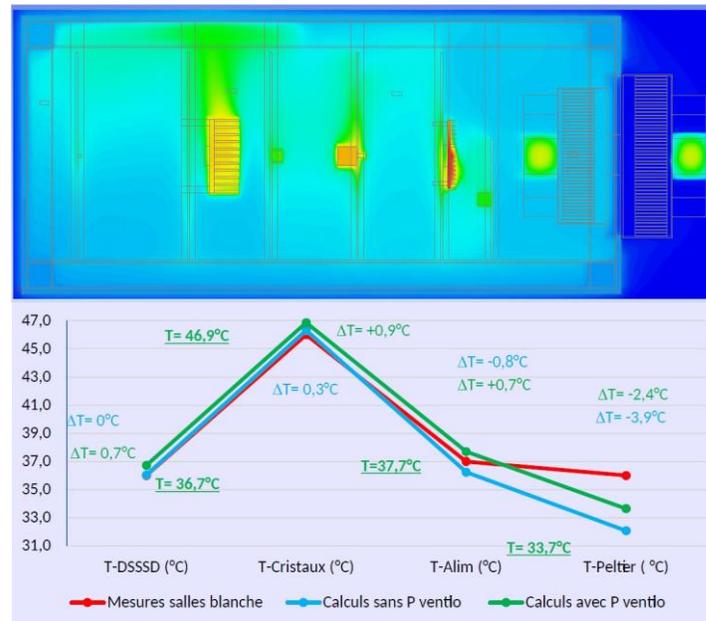
Simulation numérique, couplage thermo-fluidique et thermo-électrique

Projet ComptonCam: **ANALYSE**, comparaison des réponses suivant les dispositifs (ventilateur, module effet Peltier, plaque froide)

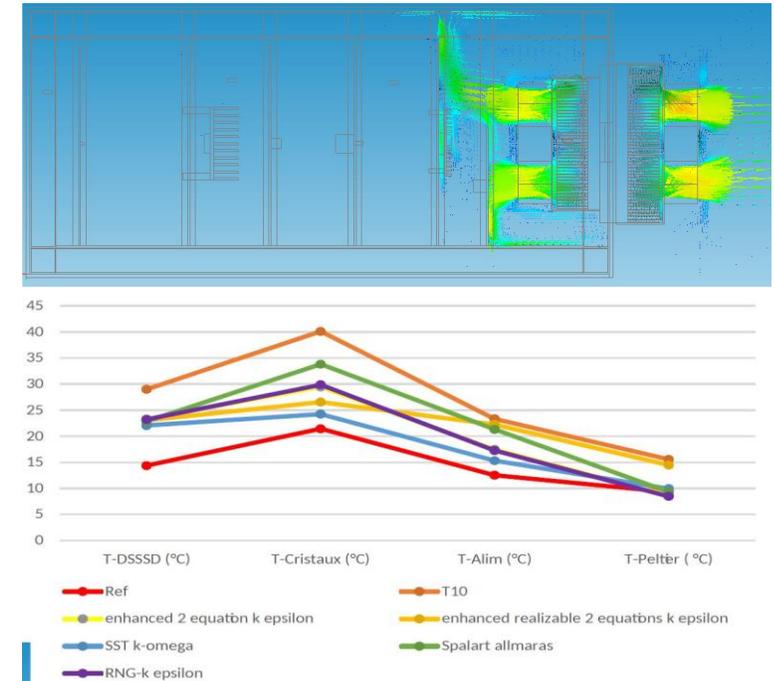
Sans ventilateur et sans Peltier



Avec ventilateur et sans Peltier



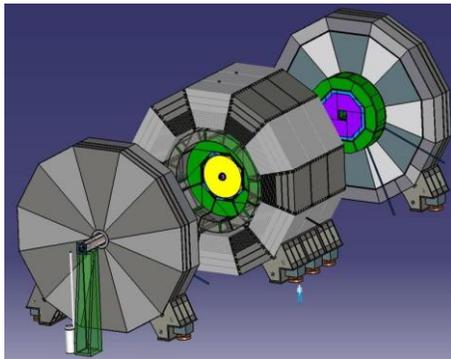
Avec ventilateur et plaque froide



Simulation numérique, Analyse vibratoire

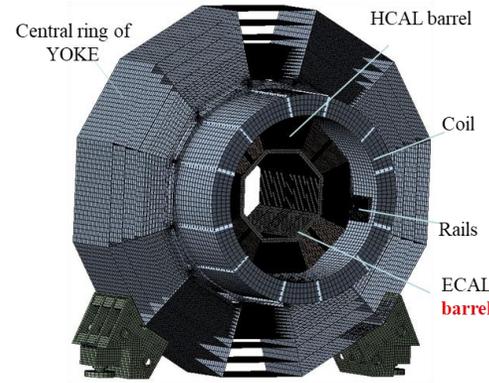
Projet ILD: détecteur pour le futur collisionneur linéaire ILC qui pourrait voir le jour au Japon

Les systèmes doivent être conçus pour ne pas subir de dommages causés par des contraintes sismiques, qui sont susceptibles de se produire pendant la durée de vie de l'instruments



GEOMETRIE

Bobine attachée au cryostat par des ressorts

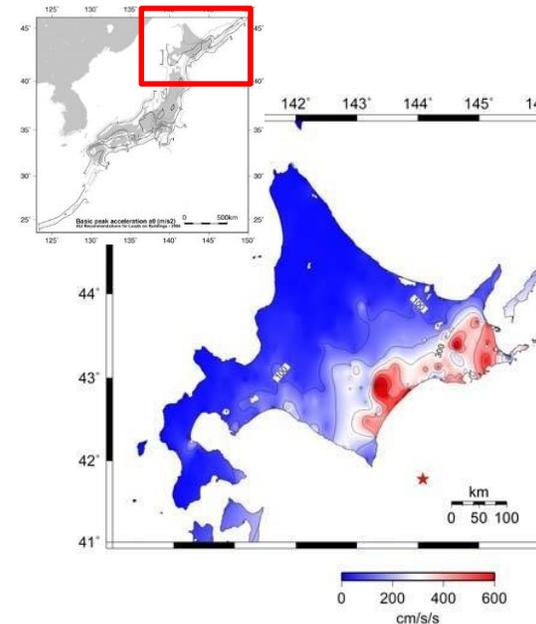


T. Pierre-Emile (LLR)

ILD model :
Mass = 3100 t

DISCRETISATION

Modélisation en modèle coque



Cas de charges :

- Gravité (poids du détecteur)
- Spectre d'accélération du site

Spectre d'accélération :

- Accélération maximale au sol : $A_0 = 1,5 \text{ m/s}^2$
- Taux d'amortissement pour la structure en acier : 2 %
- Type de sol : sol dur

LOIS PHYSIQUES

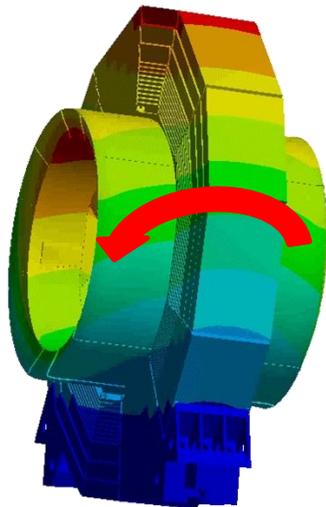
Simulation numérique, Analyse vibratoire

Projet ILD: **ANALYSE**, les premiers modes propres

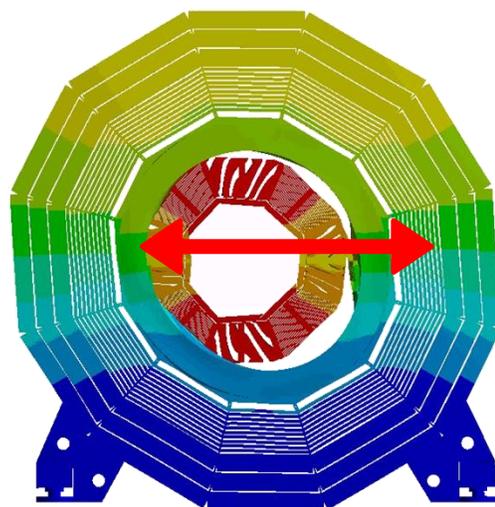
La vibration de tous les points d'un système mécanique à une fréquence donnée est appelée mode propre de vibration. La fréquence à laquelle le système vibre est appelée fréquence propre, elle s'exprime en hertz (Hz).

Le mode propre correspondant à la fréquence la plus basse est appelé le mode fondamental, les autres modes de vibration d'un système sont appelés les modes harmoniques.

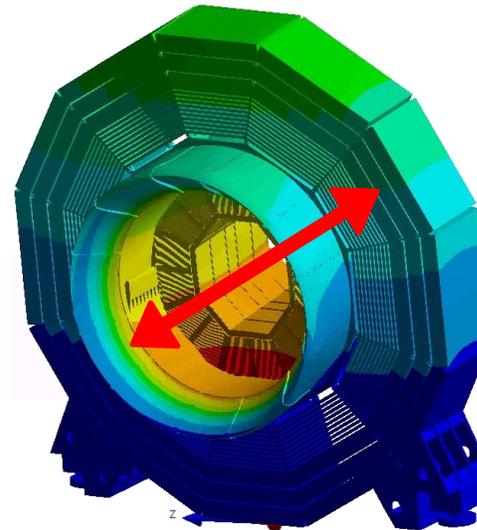
Mode 1 @ 2,3Hz



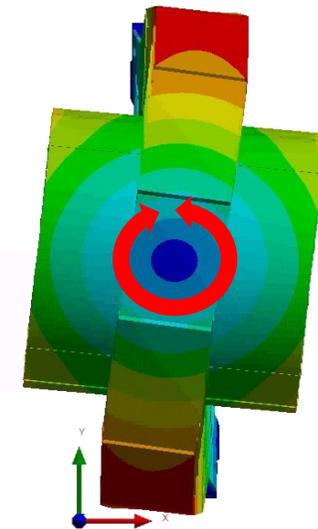
Mode 2 @ 3,05Hz



Mode 3 @ 3,8Hz



Mode 6 @ 7H

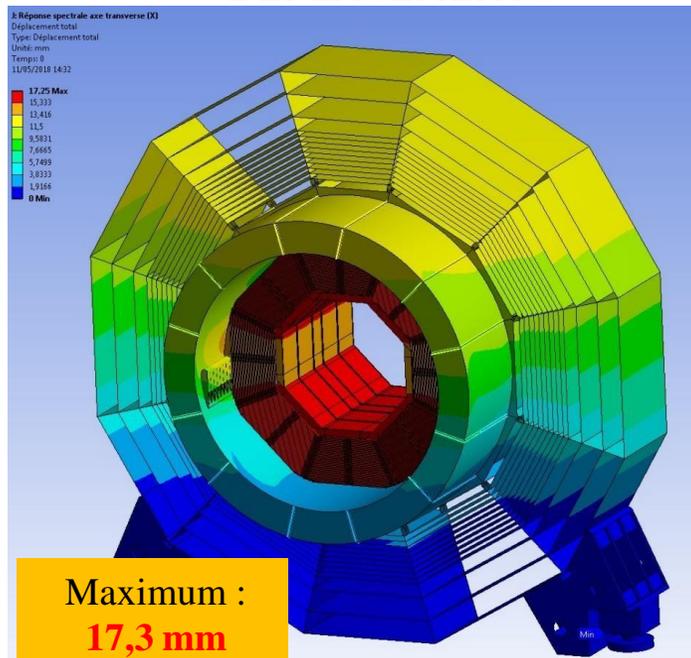


Simulation numérique, Analyse vibratoire

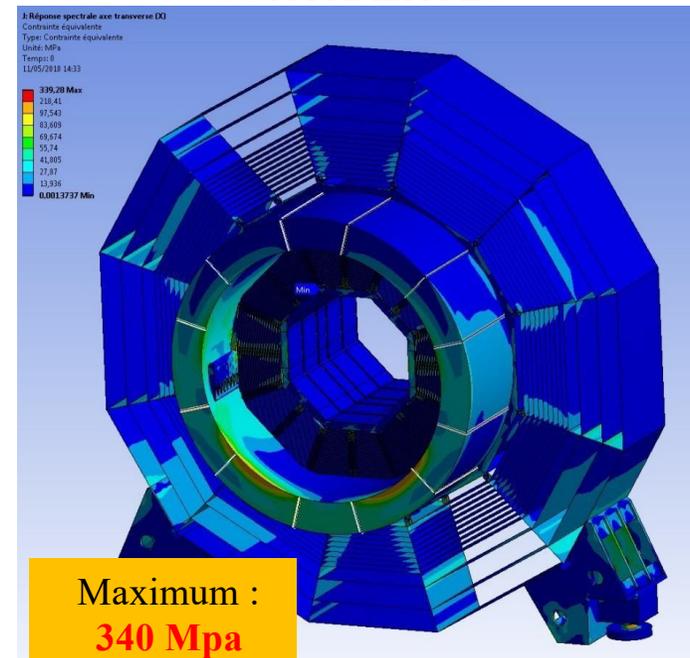
Projet ILD: **ANALYSE**, le spectre d'accélération appliqué transversalement

Déplacement de l'ordre de 17mm, localisé au niveau des calorimètres. Le Yoke plus rigide se déforme moins : Impact important sur le design des rails de supports (340 Mpa)

DEPLACEMENTS



CONTRAINTES



Simulation numérique, Analyse fluide multiphasique

Projet de R&D IN2P3 Refroidissement CO₂ (Roman Kossakowski, pour la collaboration LAPP/CPPM / LAPP/LEGI / LPNHE)

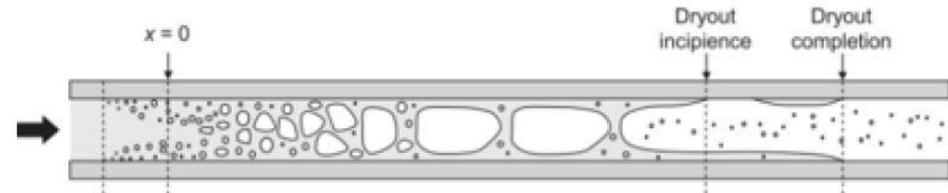
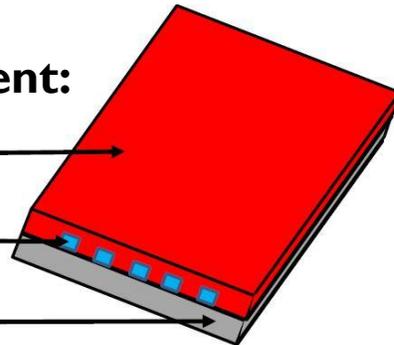
Refroidissement par la circulation de CO₂ dans des micro-canaux. L'objectif est de développer des process moins couteux et proposer des modèles numériques prédictifs.

Principe de refroidissement:

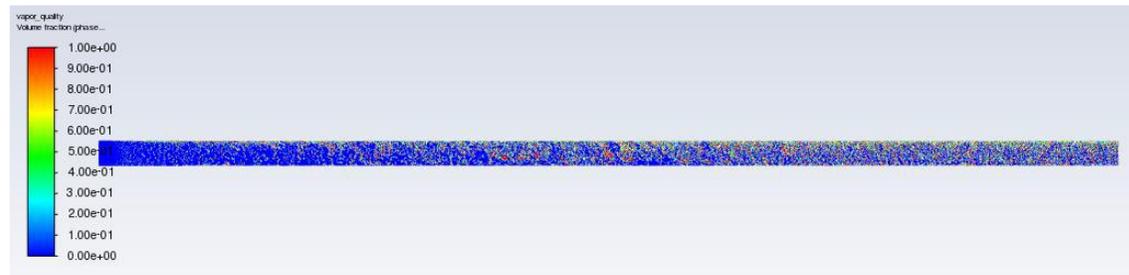
Couche « active » Si du détecteur qui chauffe

Micro-canaux gravés dans Si dans lesquels circule le CO₂ froid

Couche « passive » assurant l'étanchéité



Evolution du rapport gaz/liquide du CO₂ qui capte la chaleur produite par le détecteur



Modèle numérique ANSYS Fluent

Non-linéarité dans les simulations numériques

□ Définition:

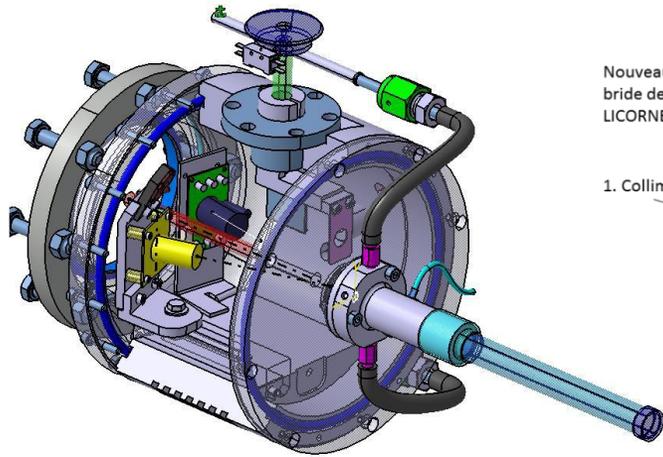
Pour un système linéaire, les effets sont proportionnels aux causes alors que pour un système non-linaire, **l'effet dépend de l'intensité de la cause**

□ Origines de non-linéarité:

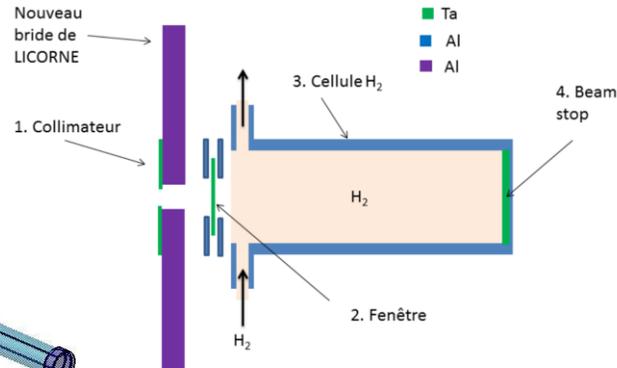
- **Comportement, matériaux**
 - Hyper élasticité
 - Elasto-plasticité (après la limite élastique)
 - Plasticité
 - Elasticité non-linaire
 - Alliage à mémoire de forme
 - Visco plasticité, visco élasticité
- **Géométrie**
 - Mécanisme en grand déplacement
 - Structure mince en grand déplacement
- **Chargement**
- **Conditions aux limites**
 - Contact (surface réduite)
 - Frottement (sec ou intermittent)

Sources de non-linéarité

STATIQUE NON-LINEAIRE:



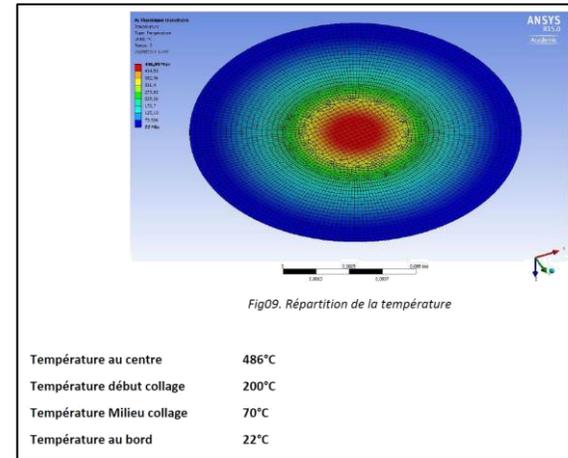
Chambre à vide + Hydrogène



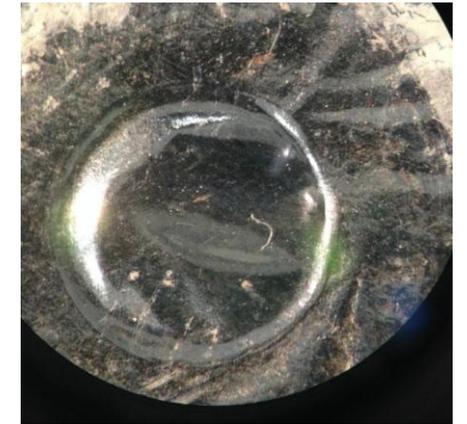
Isolation par feuille mince de tantale

Matériau

Géométrie (grande déformation, structure mince)



Simulation mécanique + thermique (faisceau)



Test mécanique dépassement limite élastique

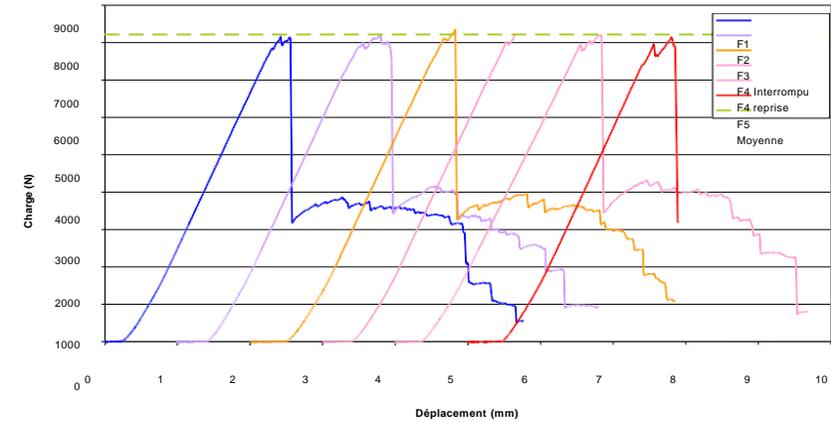
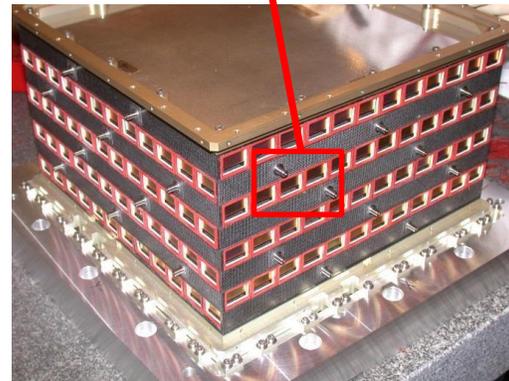
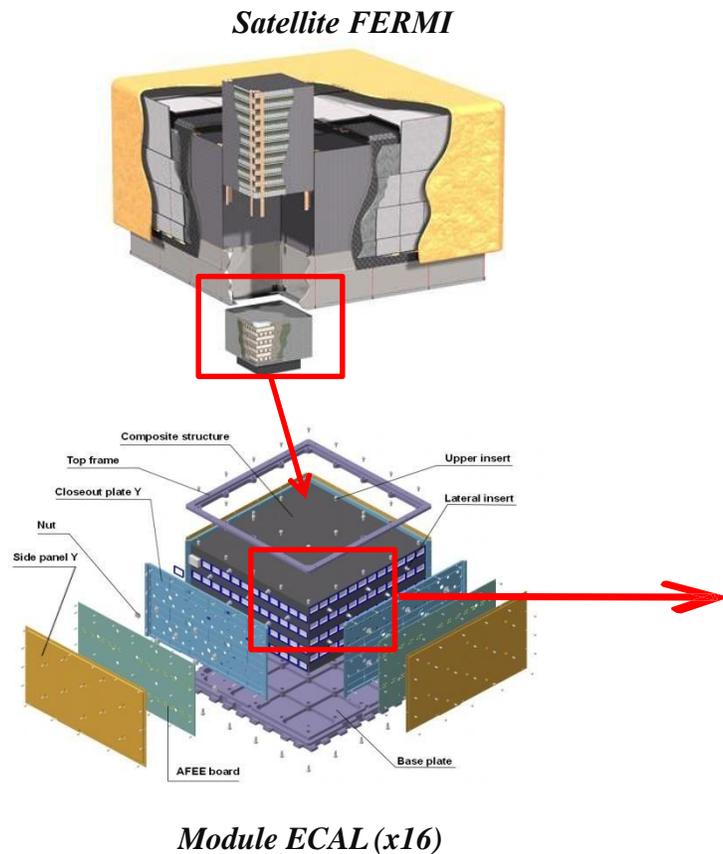
DYNAMIQUE NON-LINEAIRE:

Mécanique vibratoire, principalement issues de non-linéarité géométrique

En général la non-linéarité se manifeste soit dans la matrice de raideur (matériau ou géométrie) où dans l'amortissement (contact ou frottement)

Essai de qualification en dynamique

Caractérisation en traction/torsion/flexion de l'attache inférieure d'un module de satellite (insert/composite)



Résultats de traction (5 éprouvettes)

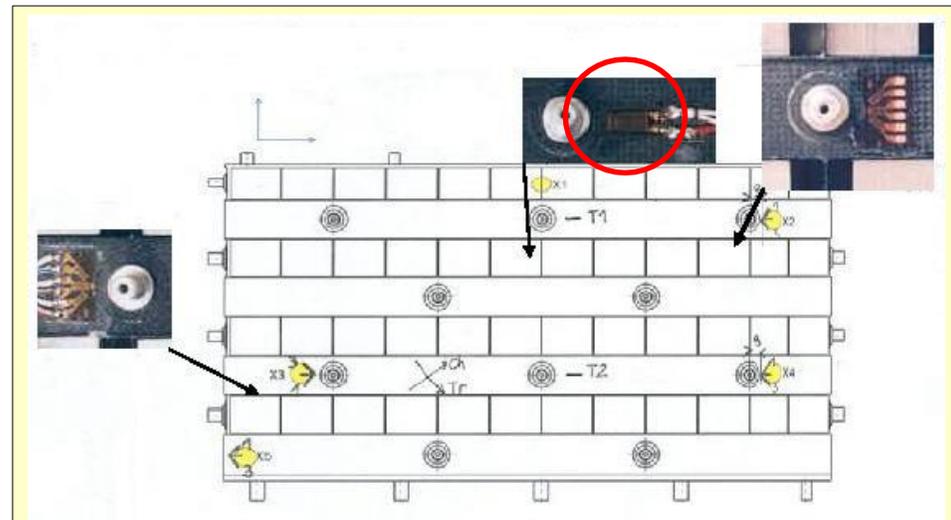


Charge_(rup) = 8000 N

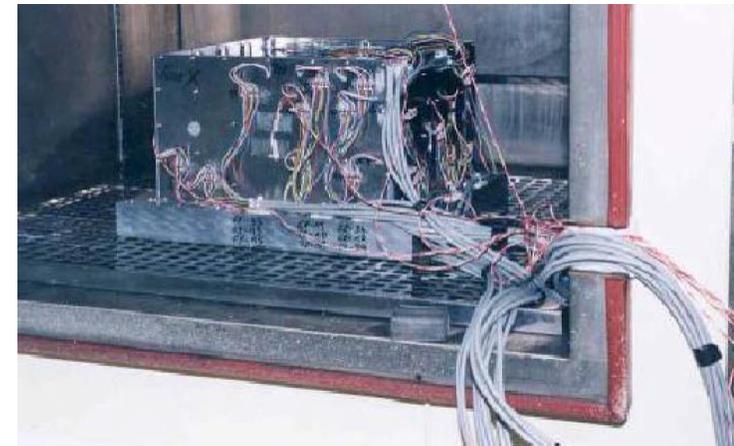
Éprouvette de test après rupture

Essai de qualification thermomécanique

- 43 Cycles thermiques entre -45°C et $+85^{\circ}\text{C}$, à pression atmosphérique (16h par cycle)
- Mesures des contraintes liées à la dilatation différentielles entre la pièce composite et les pièces métalliques
- 13 points de mesure (jauges de contrainte) réparties autour de la structure



Strain Measurements on VM2 during thermal tests



Enceinte thermique

Part	σ_{\max} (MPa)	$\pm 2xS_{\sigma}$ (MPa)
Top Face	50	2
Cells wall	20	8
Inserts face X	33	5
Inserts face Y	34	4

$\sigma_{\max} = 50 \text{ N (top)}$

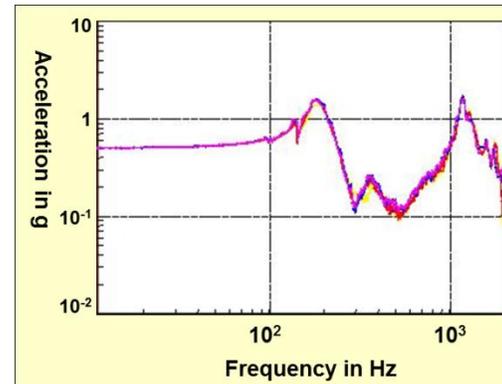
Essai de qualification en vibration

Tests sur les axes transversaux (X et Y) et l'axe de poussée (Z). L'environnement des test structural est divisée en 3 essais (utilisation de 14 accéléromètres) :

- Etude Modale : déterminer la fréquence fondamentale (0,25g ; 10 Hz-1000 Hz).
- Test de vibration aléatoire : soumettre le module d'essai à l'environnement dynamique défini par la densité spectrale d'accélération
- Essai de choc sinusoïdal : soumettre à un niveau d'accélération statique équivalente



*Essais sur pot vibrant
Masse du module ~100 Kg*



Fréquences fond.
X;Y : 180 Hz
Z : 220 Hz

Axis	Frequency	Acceleration	Cycles
X (Transverse)	25 Hz	+6.8	5
Y (Transverse)	25 Hz	+6.8	5
Z (Thrust)	25 Hz	+8.5	5

Acceleration
X;Y : +6,8 g
Z : +8,5 g

Emballage de guide de lumière et de scintillateurs/cristaux

Calorimètre NPS (Jefferson Laboratory)

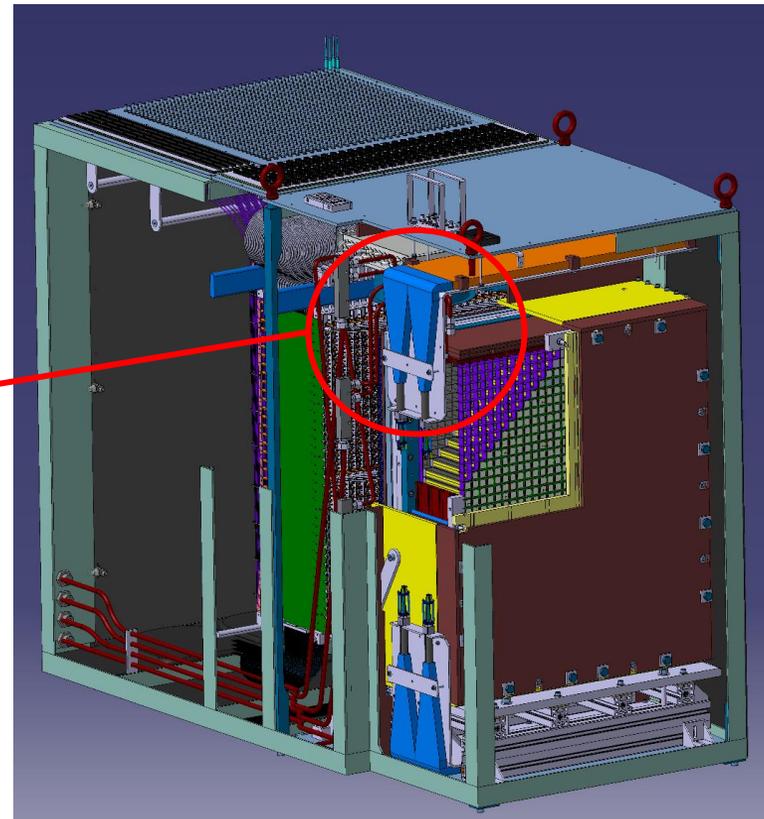
1000 modules avec cristaux PbWO



Emballage réflecteur en aluminium



Usinage des plastiques



Calorimètre NPS



Outillage pour l'emballage VM200 des cristaux

Collage de sondes thermiques, assemblage de cristaux et montage mécanique

Calorimètre NPS (Jefferson Laboratory)

1000 modules avec cristaux PbWO



Collage des sondes de température



Mise en place des cristaux un par un



Intégration mécanique complète en atelier

Polissage, collage et emballage de guide de lumière et de scintillateurs/cristaux

Calorimètre NPS (Jefferson Laboratory)

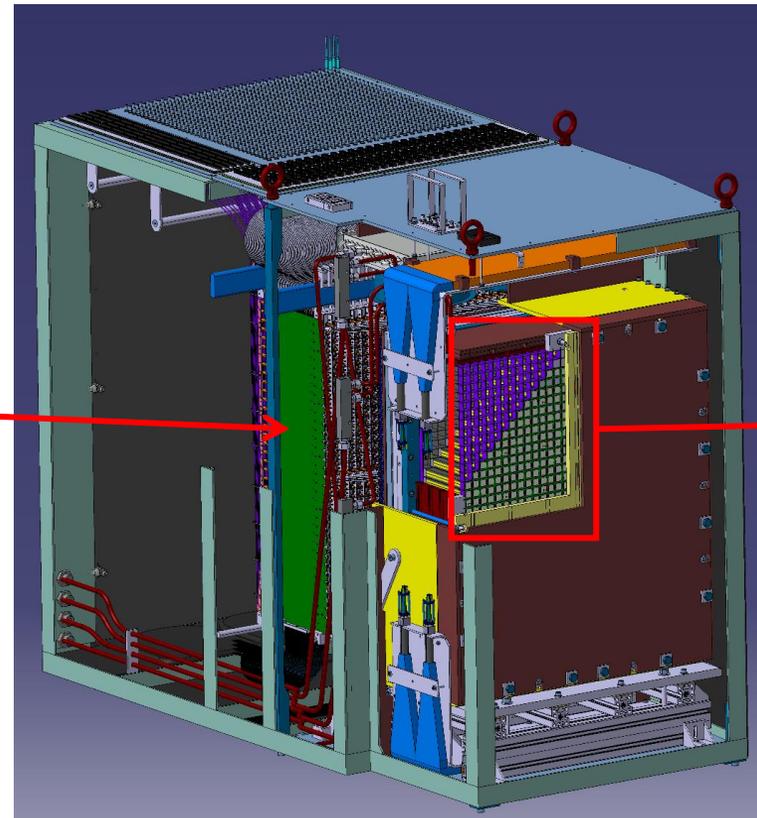
1000 modules avec cristaux PbWO



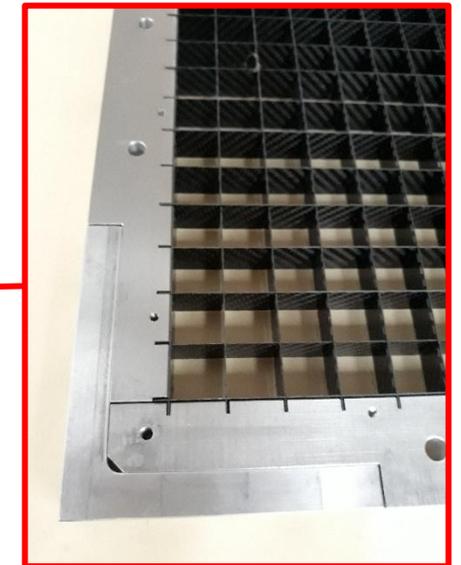
Assemblage des 1080 blocs PMTs



Connexion des fibres optiques de calibration et régénération



Calorimètre NPS



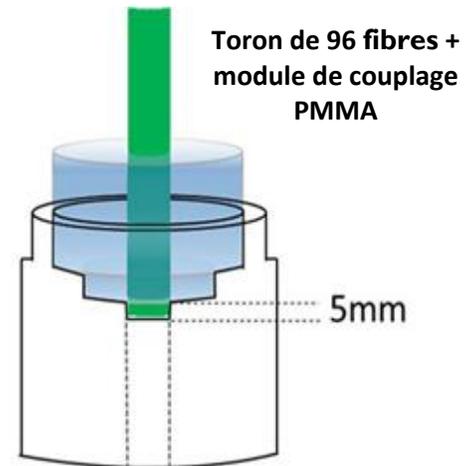
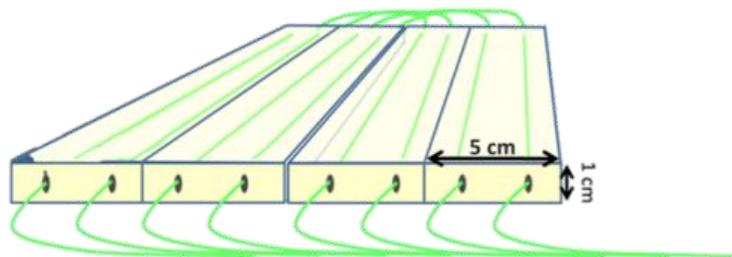
Montage mécanique des plaques en carbone

Découpe et polissage de fibre optique

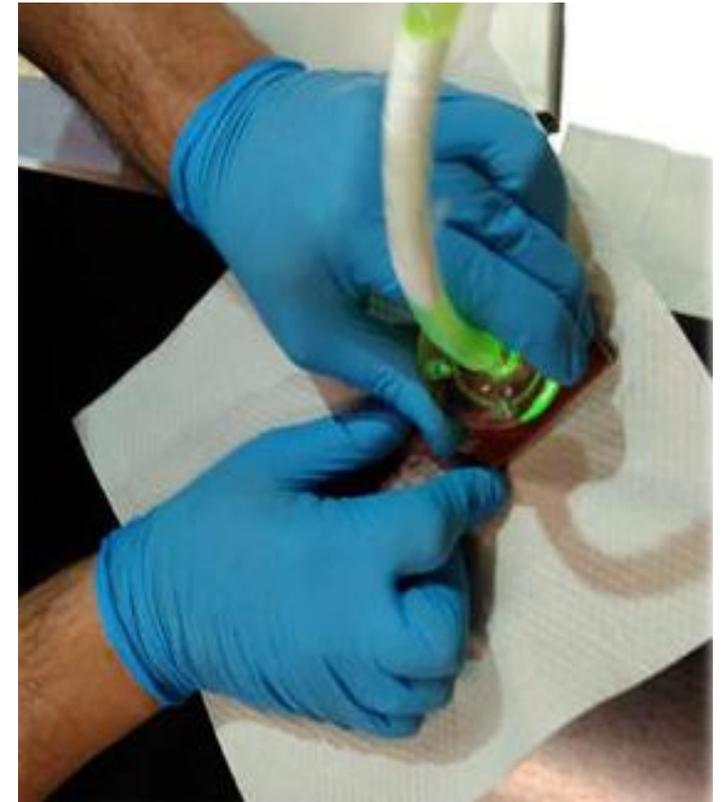
Détecteur Auger (Argentine)



Scintillateurs de surface (SSD) au-dessus de la cuve à eau Tcherenkov pour l'Upgrade d'Auger



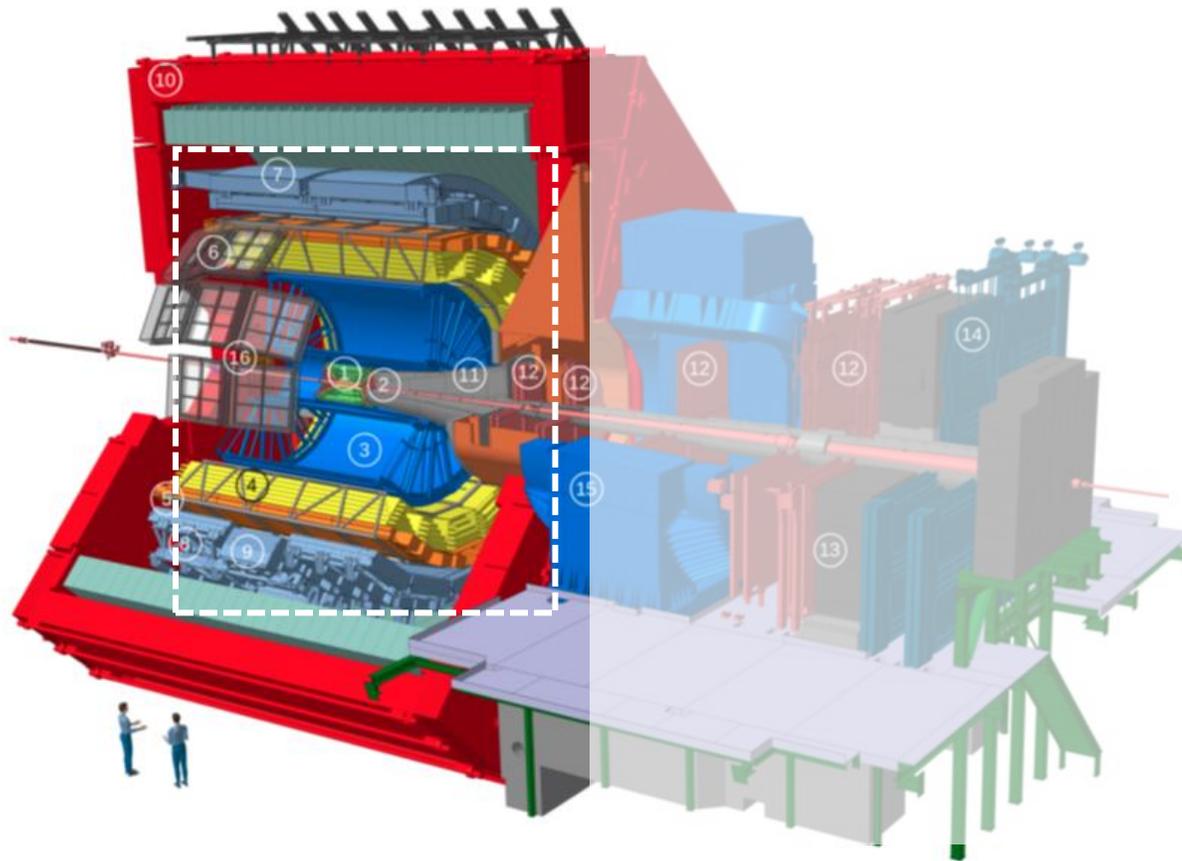
**Outillage
TEFLON**
pour le collage



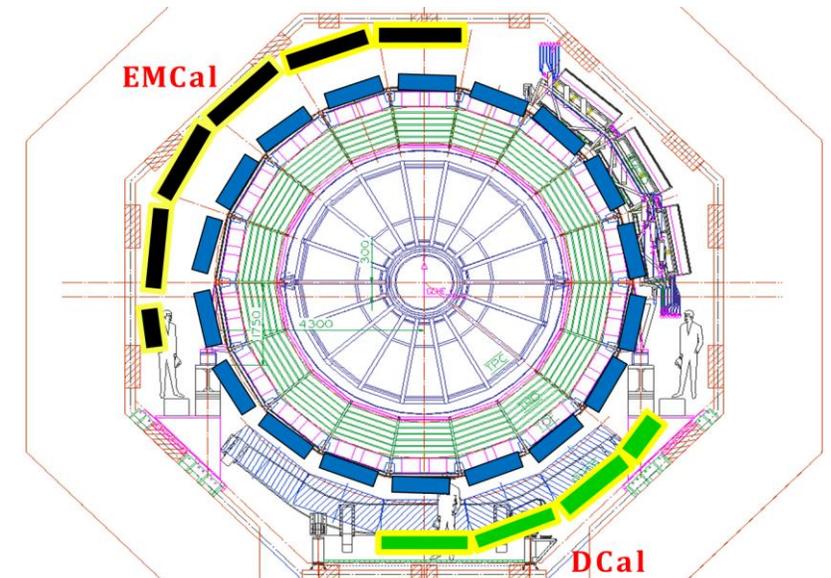
Polissage avec outillage

Calorimètres EMCal et DCal d'Alice (CERN)

4500 modules, 1390000 scintillateurs, 347000 plaques de Pb, 18000 APD et fibres optiques



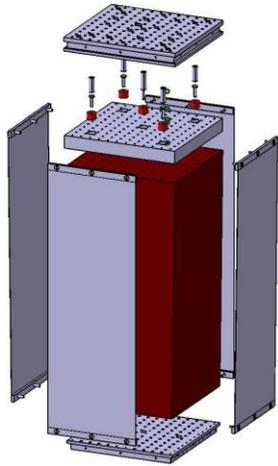
Expérience ALICE



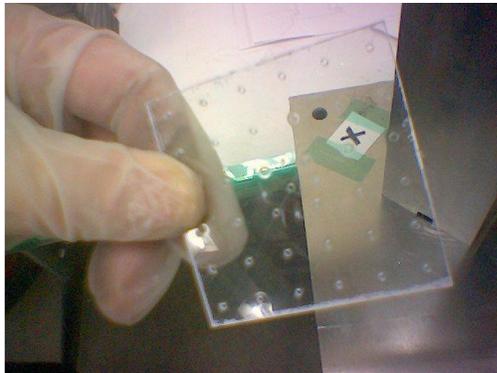
Les deux calorimètres
EMCal et DCal

Calorimètre électromagnétique d'Alice (CERN)

4500 modules, 1390000 scintillateurs, 347000 plaques de Pb, 18000 APD et fibres optiques



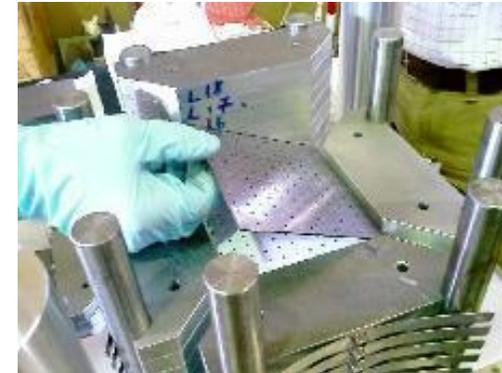
Modèle CAO



Plaque scintillateur



Plaque de Plomb



Assemblage une par une
alternativement



Module assemblé



Assemblage des modules en Stripmodule

Calorimètre électromagnétique d'Alice (CERN)

4500 modules, 1390000 scintillateurs, 347000 plaques de Pb, 18000 APD et fibres optiques



Assemblage de tous les Stripmodules en atelier



Collage des APD et fibres



Assemblage des Stripmodules en Supermodule

EMCal:

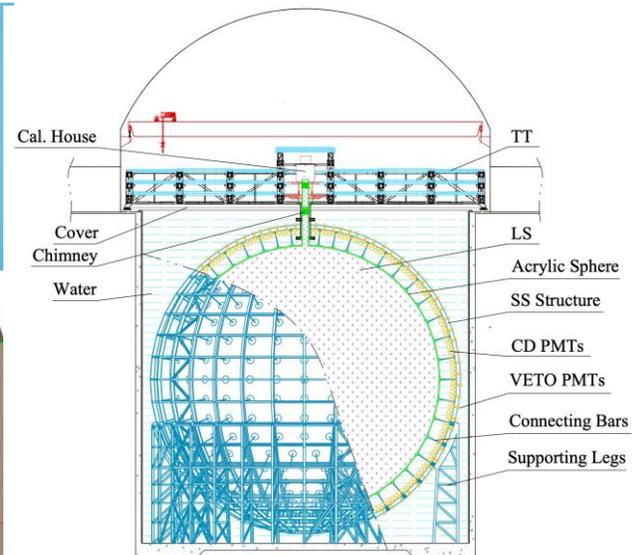
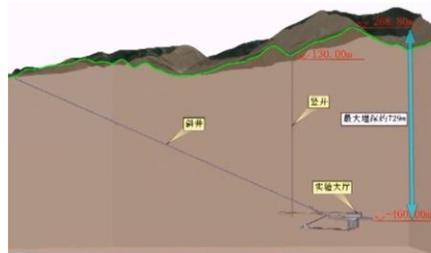
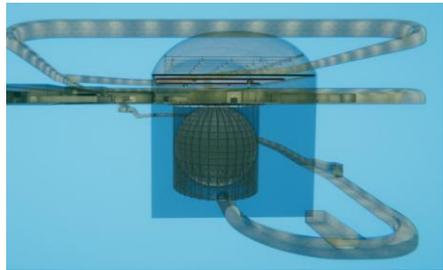
- Assemblage de 240 Stripmodules en 12 Supermodules standards
- Assemblage de 48 Stripmodules en 4 Supermodules spéciaux

Dcal:

- Assemblage de 96 Stripmodules en 12 Supermodules standards
- Assemblage de 32 Stripmodules en 4 Supermodules spéciaux

Scintillateur liquide, photomultiplicateurs

JUNO (Chine)



Détecteur sous terrain, 20000 Tonnes de scintillateur liquide



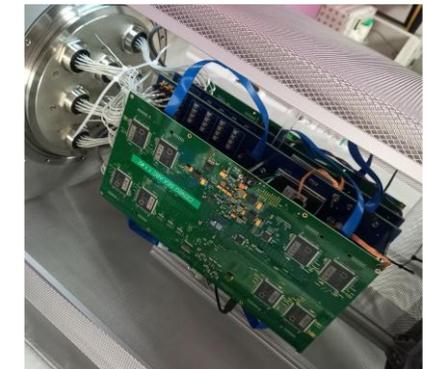
Pré-assemblage de l'acrylique



Intégration câbles



Montage mécanique



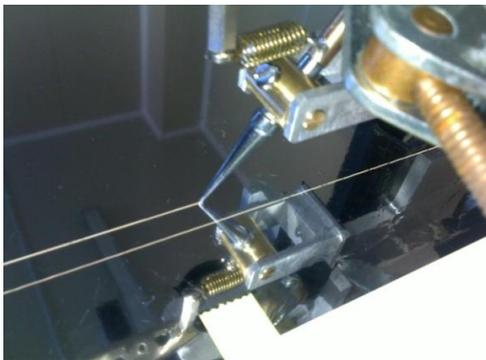
Intégration PCB

Fabrication de plan de détection pour détecteurs gazeux

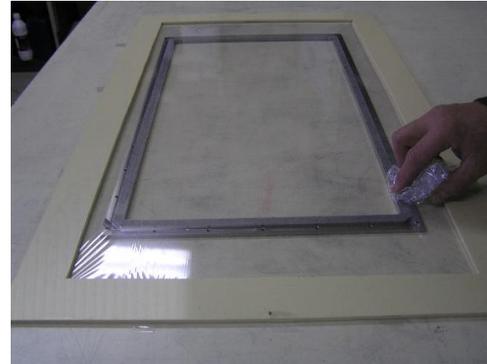
Dégravage et évaporation



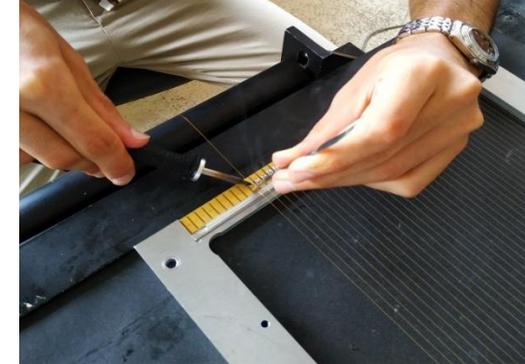
Dégravage manuel 200x200



Machine à dégraver automatique pour les grandes surfaces



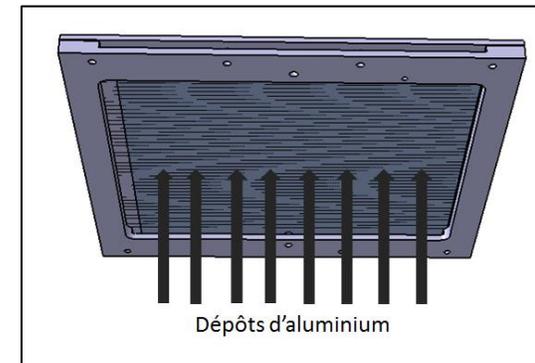
Collage par cadre de transfert



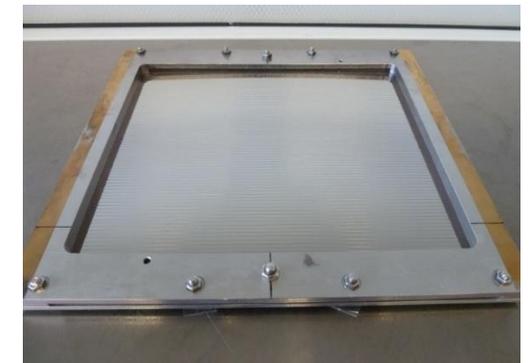
Tissage du cadre masque



Evaporation sous vide / Canon à électrons



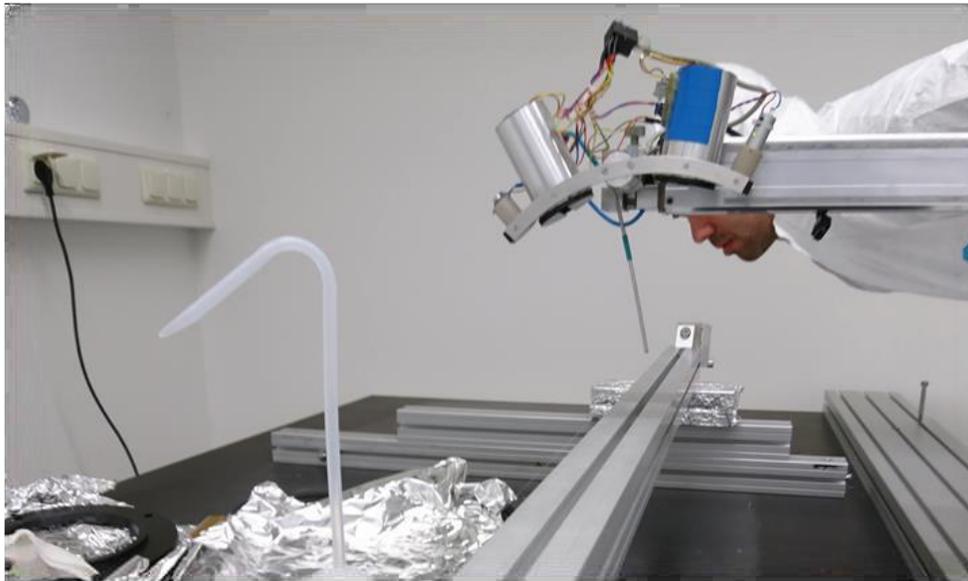
Dépôt de matière



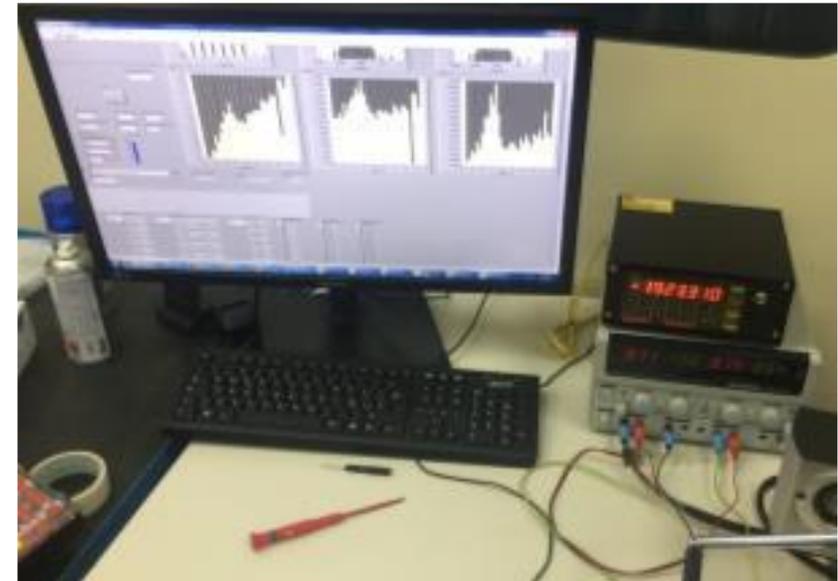
Feuille après évaporation sur son cadre transfert

Contrôle de la tension mécanique des fils

Différents moyens de contrôle de la tension mécanique (vibration du fil)



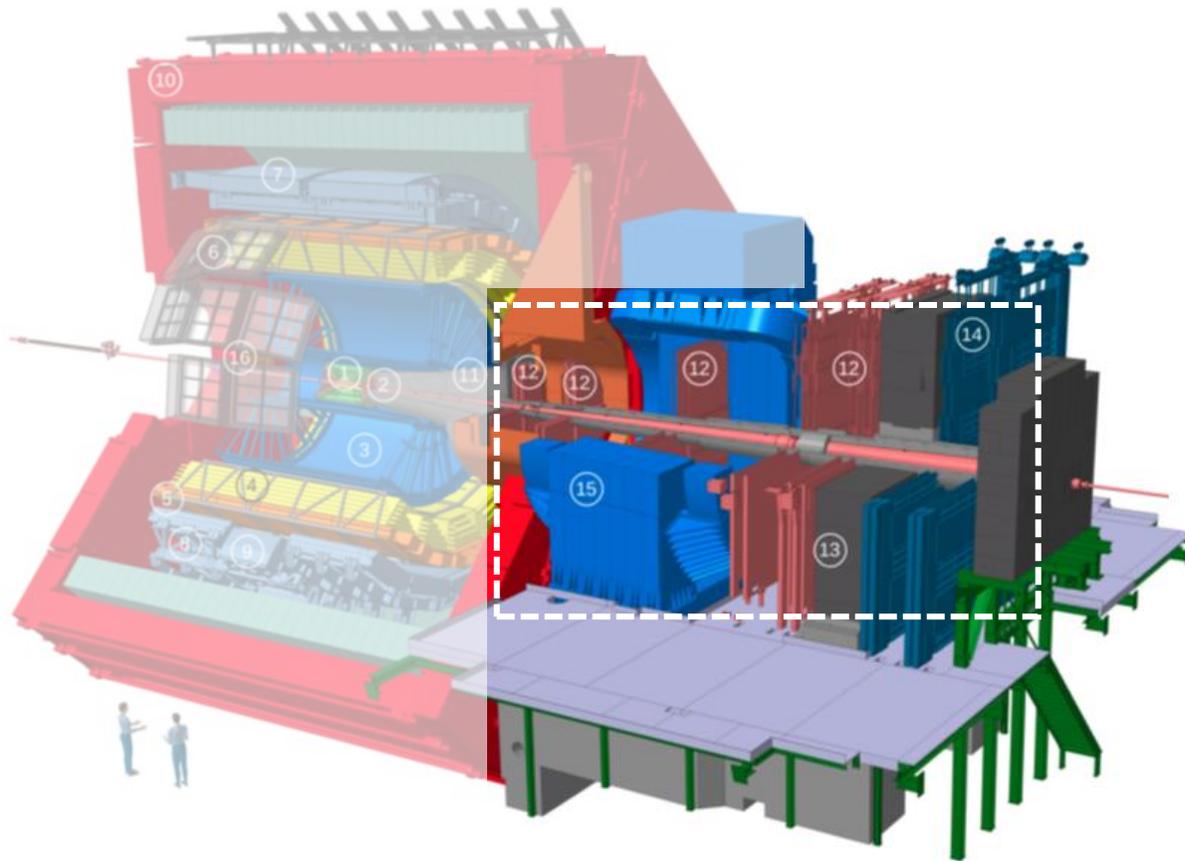
Faisceau laser sur le fil, jet d'argon de 8 Bar



Mesure de la fréquence et conversion en tension mécanique

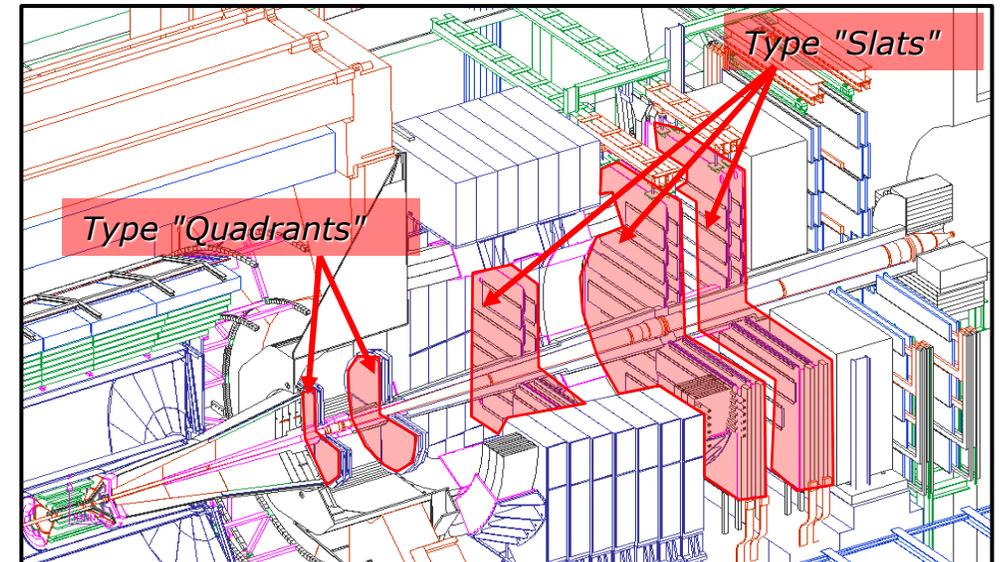
Intégration des détecteurs gazeux d'Alice (CERN)

Bras dimuon



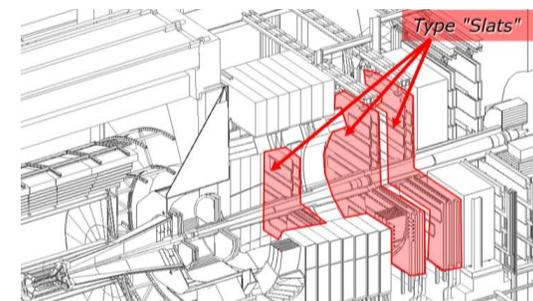
Expérience ALICE

Chambres de trajectographie
Stations 1,2,3,4 & 5



Intégration des détecteurs gazeux d'Alice (CERN)

Types Slats



Assemblage en atelier



Collage des fils



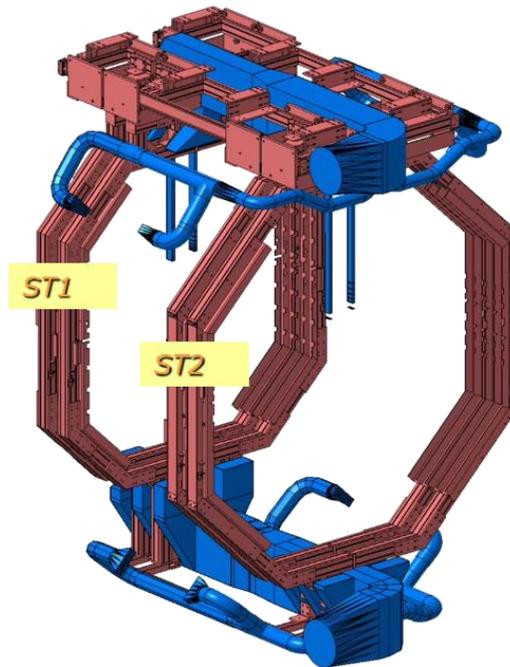
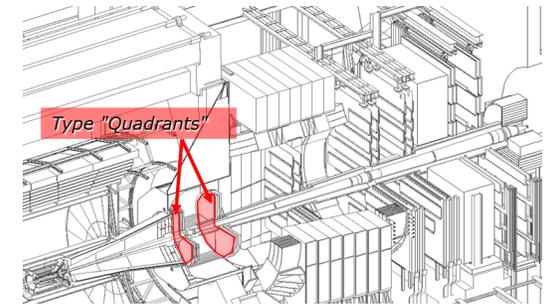
Assemblage de la cathode



Outillage de tissage de fils sur les cadres de transfert

Intégration de détecteurs d'Alice (CERN)

Type quadrants



Outillage de tissage de fils sur les cadres de transfert



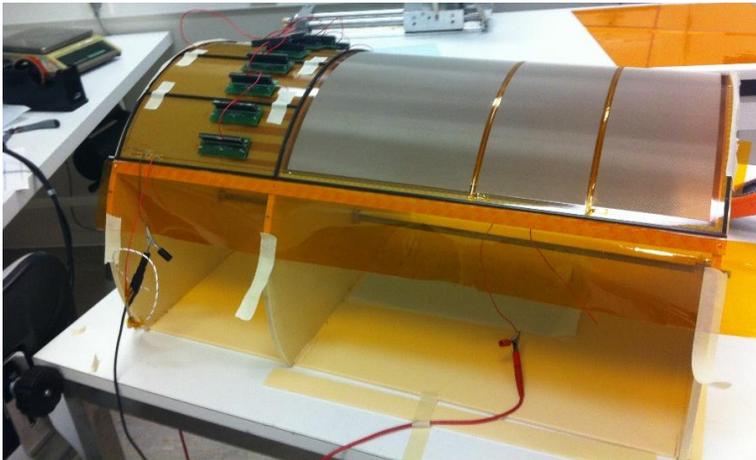
Assemblage mécanique sur maquette à l'échelle en atelier



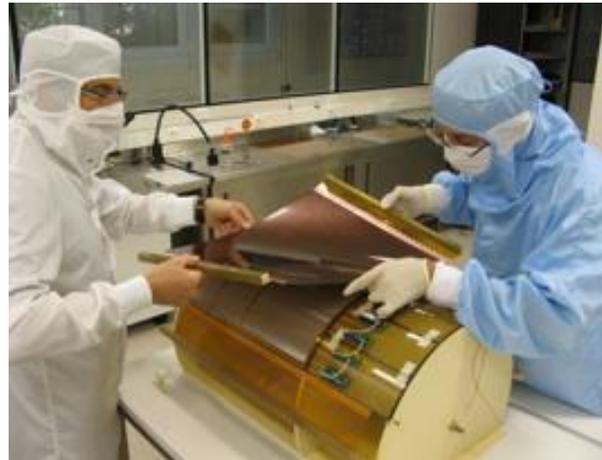
Tissage manuel des fils

Également de fortes contraintes d'intégration dans les Micromégas

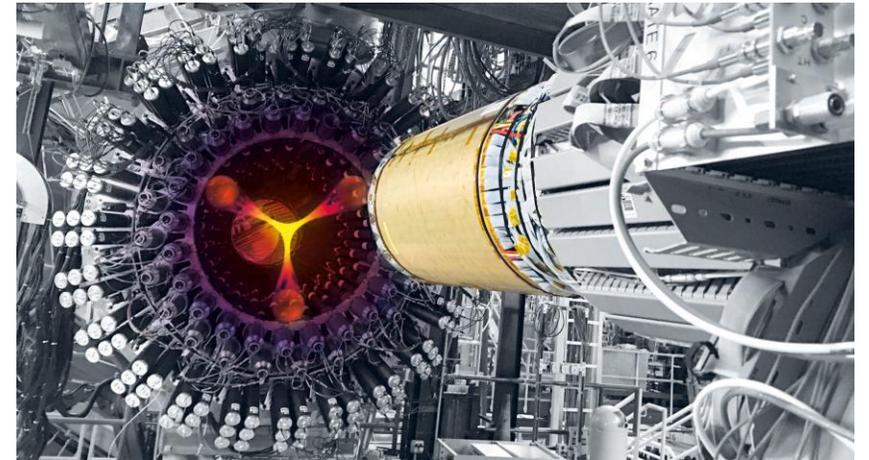
Détecteur gazeux (CEA)



Outillage pour la courbure du détecteur



Assemblage des différentes couches



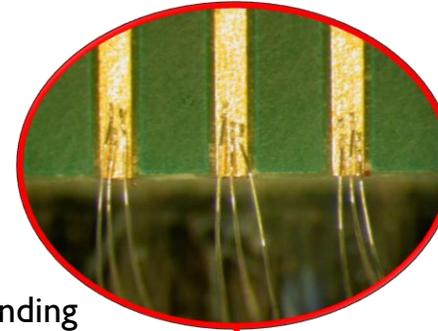
Détecteur Micromégas avant son insertion dans
CLAS 12 (JLab)

A la frontière de la mécanique et de l'électronique...

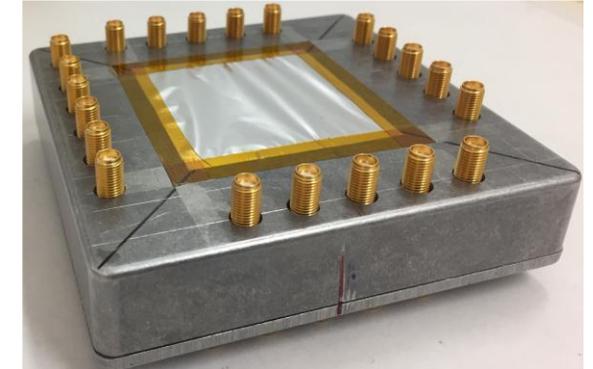
Détecteurs Diamants



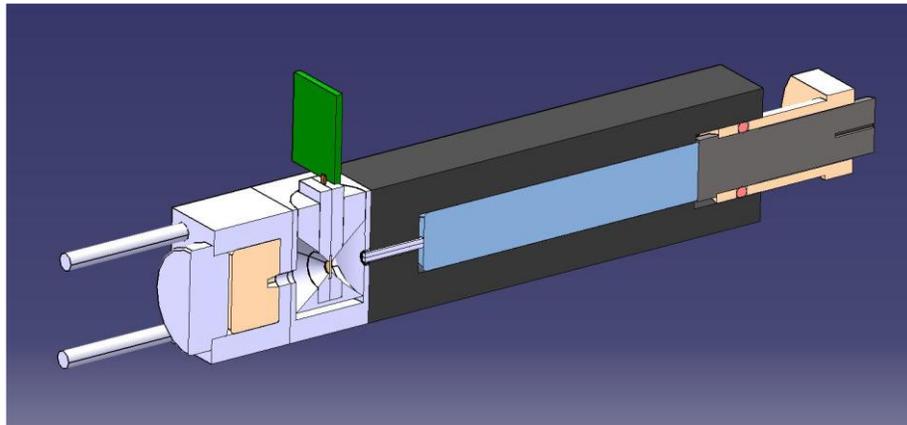
Diamant synthétique CVD



Wire bonding



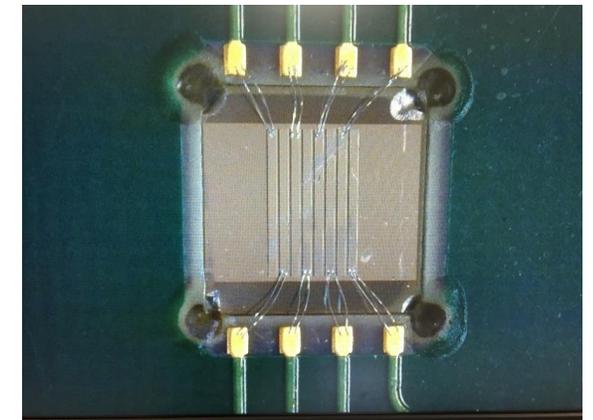
Boitier aluminium intégré



Montage mécanique – banc de test

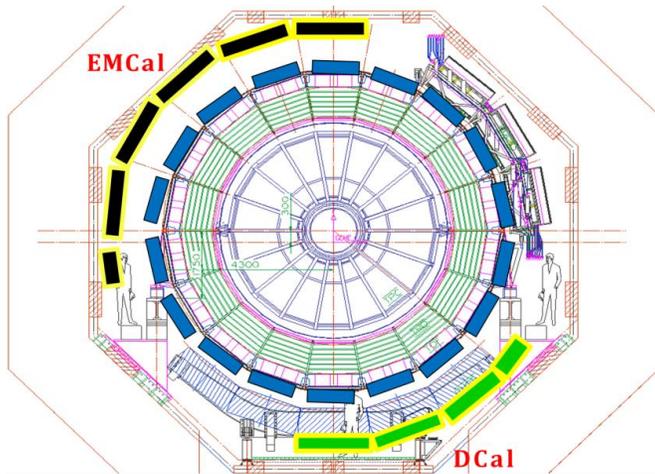


Opération manuelle sous binoculaire



Maintient du diamant par collage UV

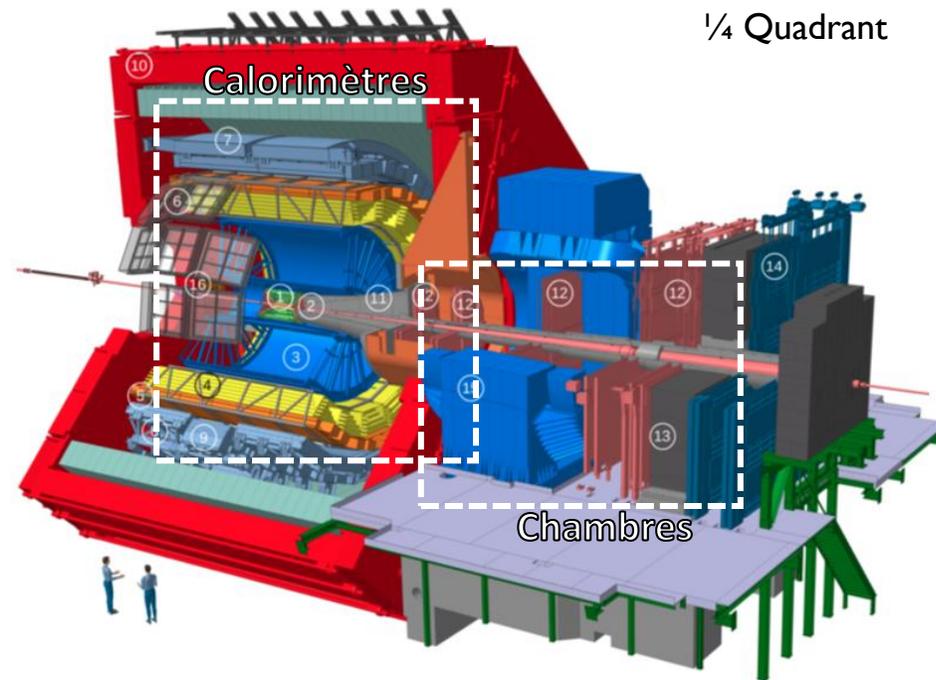
DéTECTEURS d'ALICE (CERN)



Les deux calorimètres EMCal et DCal



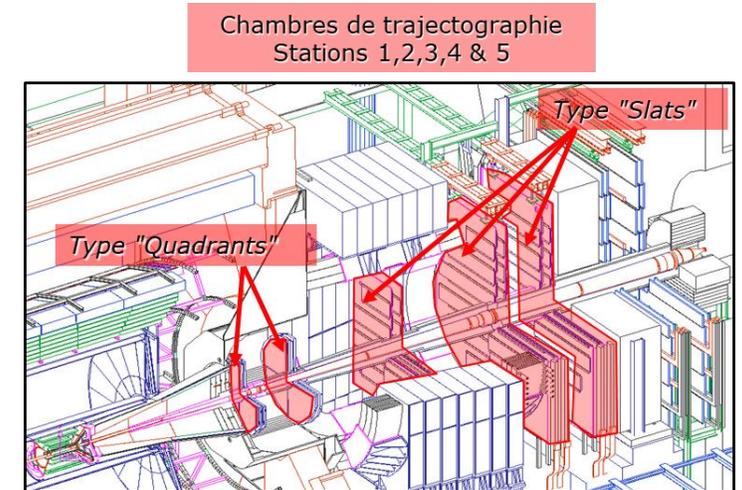
Supermodule



Expérience ALICE



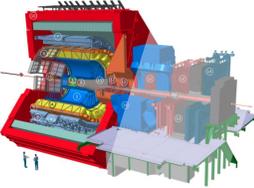
1/4 Quadrant



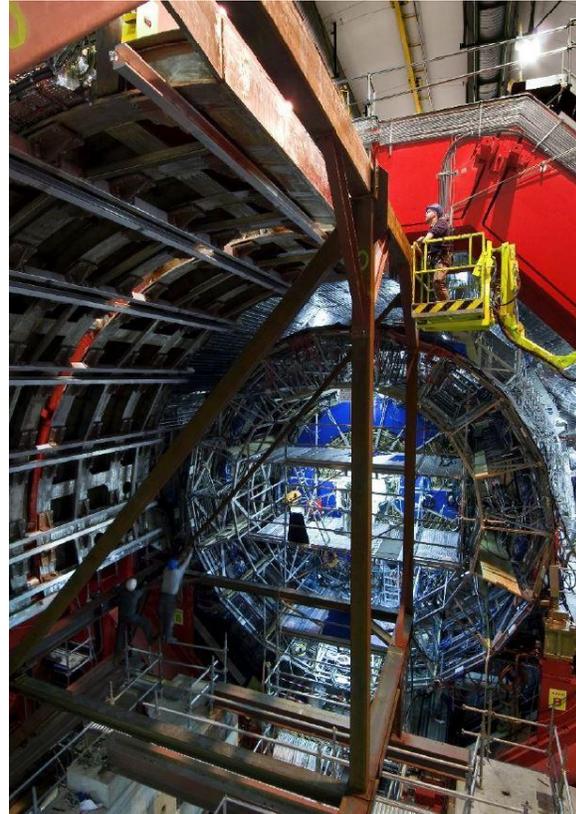
1/2 Slats

DéTECTEURS d'Alice (CERN)

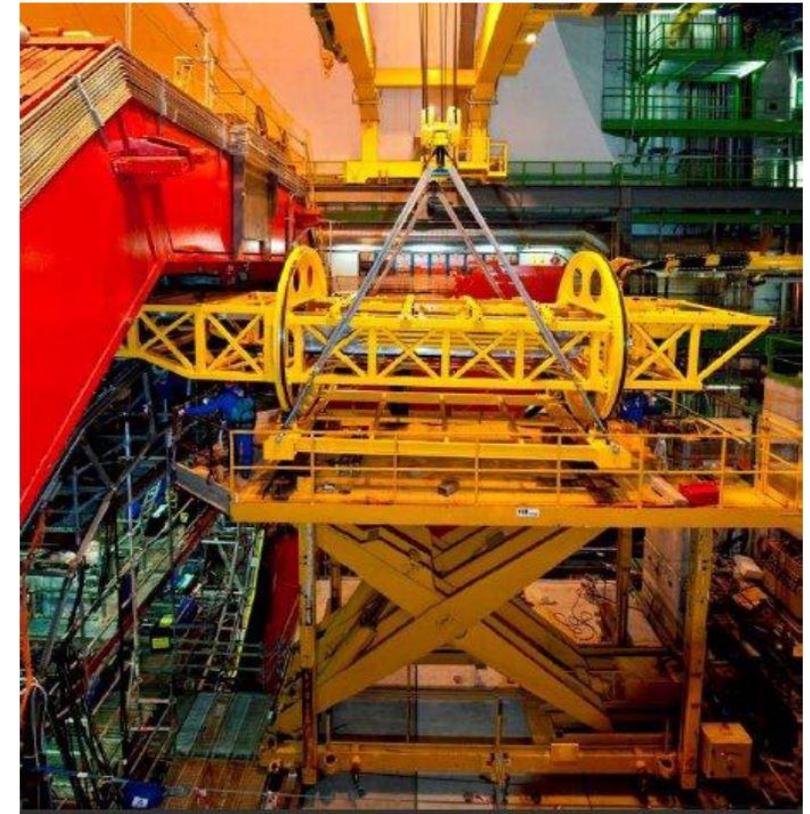
Calorimètre EMCal



Descente de la structure par un pont roulant



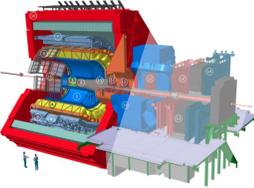
Insertion dans l'aimant



Insertion des supermodules à l'aide d'un outillage tous les 2 jours

DéTECTEURS d'Alice (CERN)

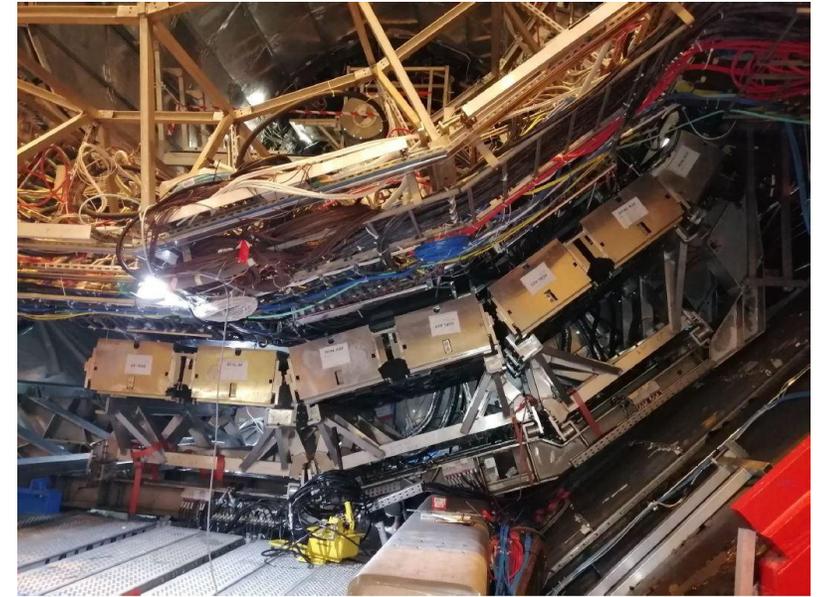
Calorimètre DCal



Mise en place des supermodules dans l'outillage



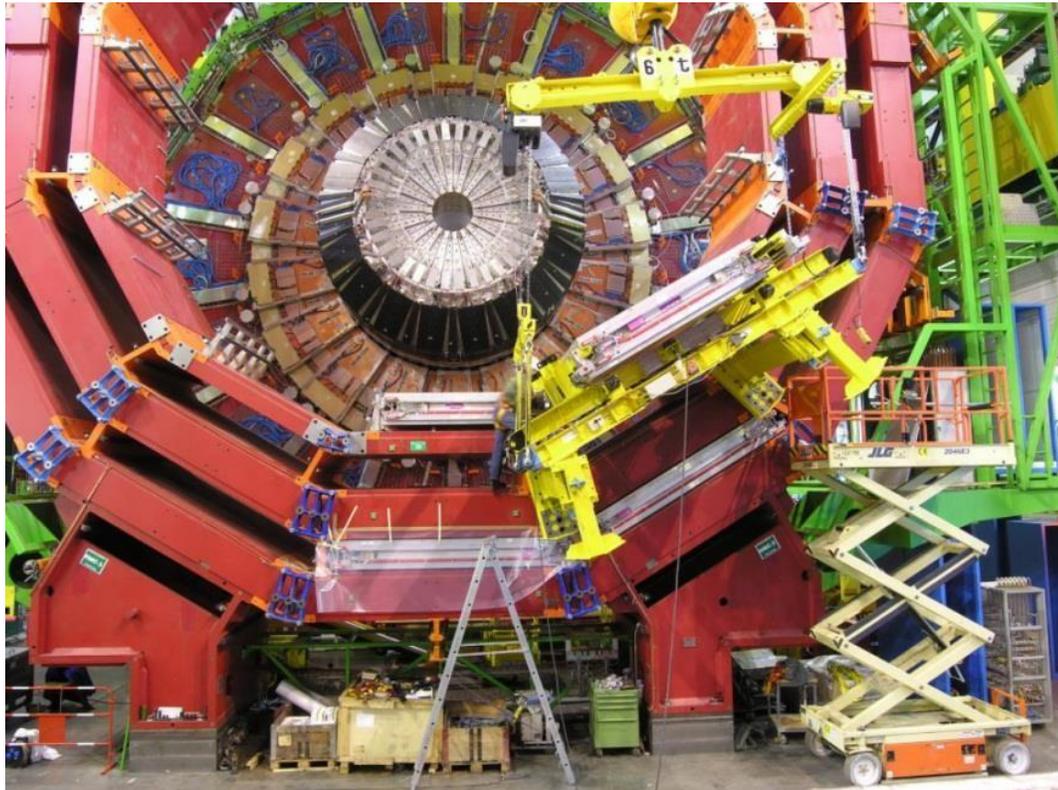
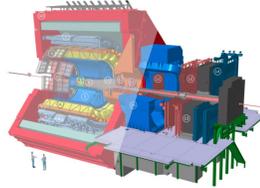
Positionnement de l'outil et insertion des supermodules



Mise en place supermodule par supermule

DéTECTEURS d'Alice (CERN)

Slats



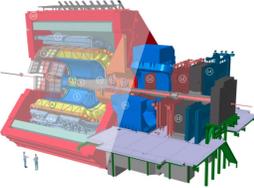
Mise en place de chambres par pont roulant



Installation des stations une par une

DéTECTEURS d'Alice (CERN)

Quadrants

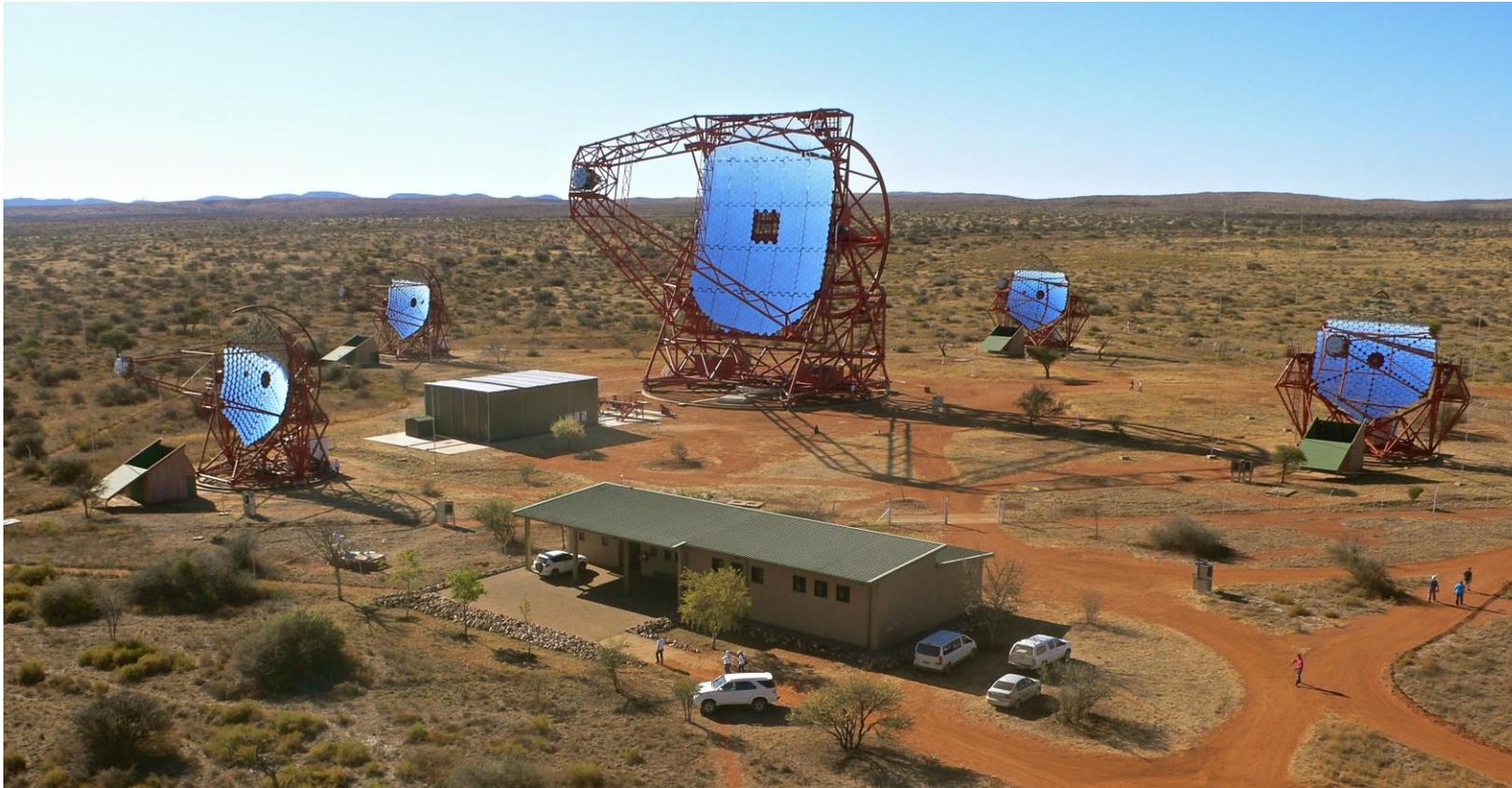


Mise en place des structures portantes

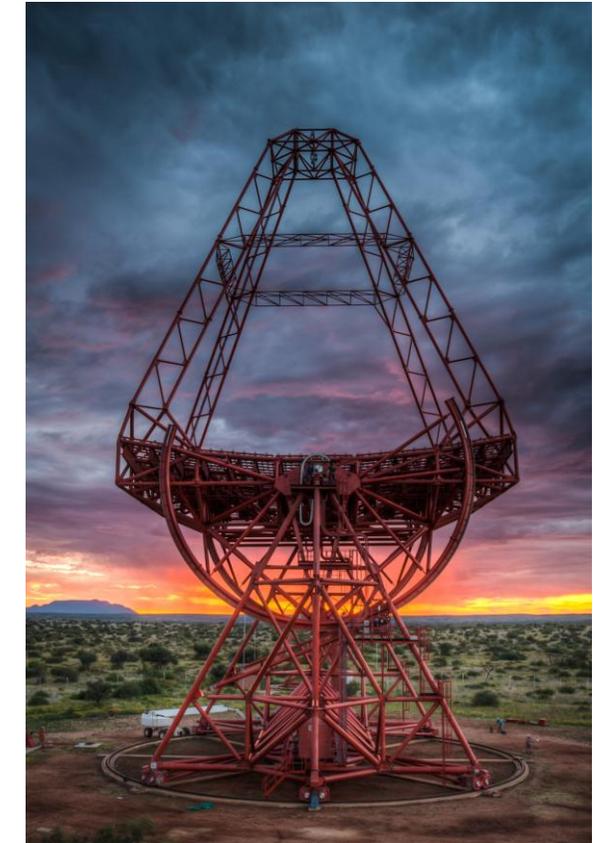


Installation des quadrants et du refroidissement

Installation de la caméra du télescope HESS (Namibie)

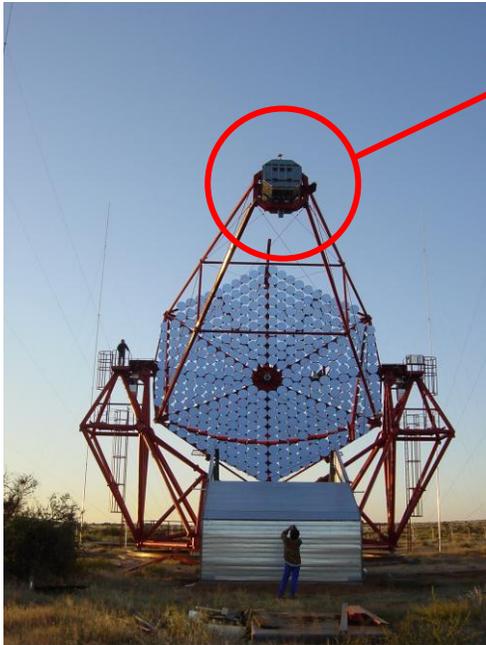


Expérience HESS

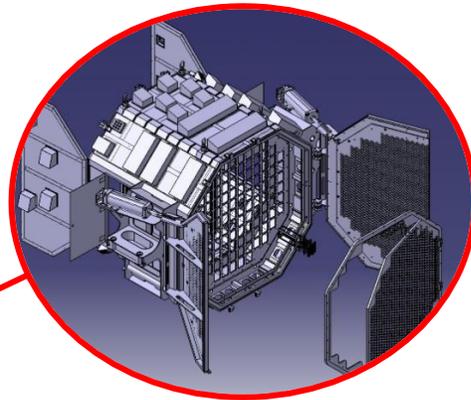


Structure de la caméra

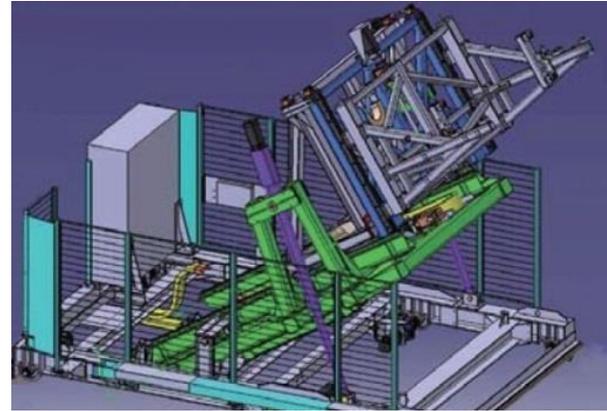
Installation de la caméra du télescope HESS (Namibie)



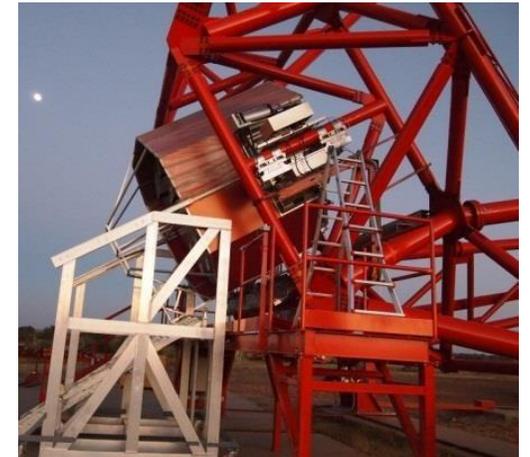
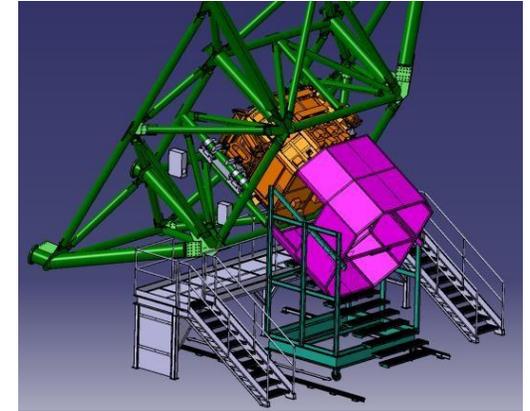
Télescope



Caméra



Chariot de chargement de la caméra



Mise en place de la protection
de la caméra