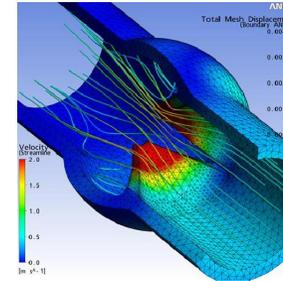


**ACTION NATIONALE DE FORMATION**  
11 au 15 mars 2024  
« Techniques de Base des Détecteurs »

# Mécanique des Détecteurs



**Julien Bettane**

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

# Sommaire

1. Introduction
2. Analyse, Conception et Fabrication
3. Intégration détecteurs
4. Installation sur sites

## Partie théorique

- Mécanique du point
- Les lois de Newton
- Mécanique du solide
- Résistance des matériaux
- Traction et compression
- Cisaillement
- Torsion
- Flexion
- Fluage et flambement
- Moment d'inertie et Moment quadratique
- Mécanique des fluides
- Thermique

## 1. Introduction

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

## Définition et domaines d'études

Il existe trois types de mécanique: quantique (atomes), **classique (tous les jours)** et relativiste (lumière).

Le **génie mécanique** désigne l'ensemble des connaissances liées à la mécanique, au sens **physique** et **technique**. Ce champ de connaissances va de la conception d'un produit mécanique au recyclage de ce dernier en passant par la fabrication, la maintenance.

Quantique

Matériaux

Optique

Thermodynamique

**Mécanique**

Electromagnétisme

Atomique et nucléaire

Particules

Astrophysique

### Science

- Etude du mouvement
- Etude des déformations
- Etude des états d'équilibre

#### Propriétés:

- Cinématique
- Statique
- Dynamique



1<sup>ère</sup> loi: Inertie

2<sup>ème</sup> loi: PFD

3<sup>ème</sup> loi:  $F_1 = F_2$

#### Objets:

- Mécanique du point
- Mécanique du solide
  - ✓ Déformable
  - ✓ Indéformable
- Mécanique des milieux continus
  - ✓ Résistance des matériaux
  - ✓ Mécanique des fluides

### Technique

Conception de produit

Fabrication

Automatisation

Métrologie

Qualité

Maintenance

Recyclage

## Mécanique du point

La mécanique du point est une branche de la physique qui étudie le mouvement des objets sans tenir compte de leur taille ou de leur forme. Elle se concentre sur la description du mouvement en termes de position, vitesse et accélération.

### Concepts Fondamentaux

- ❑ **Position** : La position d'un objet est sa localisation dans l'espace, généralement décrite en termes de coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$ .
- ❑ **Vitesse** : La vitesse d'un objet est le taux de changement de sa position par rapport au temps.
- ❑ **Accélération** : L'accélération d'un objet est le taux de changement de sa vitesse par rapport au temps.

### Lois du Mouvement de Newton

- ❑ Première loi : Un objet en mouvement reste en mouvement et un objet au repos reste au repos, à moins qu'une force nette n'agisse sur lui.
- ❑ Deuxième loi : La force nette agissant sur un objet est égale au produit de sa masse et de son accélération ( $F = ma$ ).
- ❑ Troisième loi : Pour chaque action, il y a une réaction égale et opposée.

### Applications

La mécanique du point est utilisée pour étudier divers phénomènes, tels que le mouvement des planètes, le mouvement des projectiles, les mouvements dans les machines, etc.

La mécanique du point fournit un cadre essentiel pour comprendre le mouvement des objets et est la base de nombreuses autres branches de la physique, telles que la dynamique, la cinématique et la mécanique céleste.

## Les 3 Lois de Newton

### 1. Loi de l'Inertie

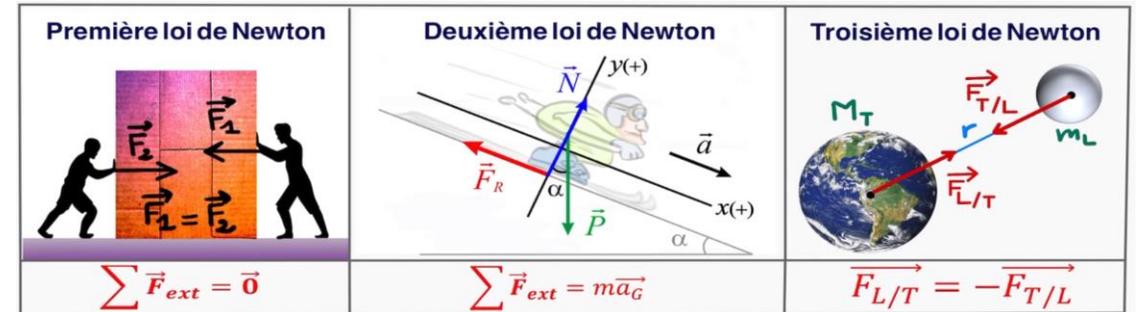
« Un objet en mouvement reste en mouvement et un objet au repos reste au repos, à moins qu'une force extérieure n'agisse sur lui. »

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

### 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.

## Mécanique du solide

La mécanique du solide est une branche de la physique qui étudie le mouvement et le comportement des objets solides sous l'influence des forces externes.

### Concepts Fondamentaux

- ❑ **Déformation** : Les solides peuvent subir des changements de forme ou de taille sous l'effet des forces, ce qui est appelé déformation.
- ❑ **Contrainte** : La contrainte est la force par unité de surface appliquée à un solide, mesurée en pascals (Pa).

### Lois du Comportement des Solides

- ❑ **Loi de Hooke** : Cette loi établit que la déformation d'un solide est proportionnelle à la contrainte qui lui est appliquée, dans la limite élastique du matériau.
- ❑ **Module de Young** : Mesure de la rigidité d'un matériau, décrivant la relation entre la contrainte et la déformation dans un matériau élastique.

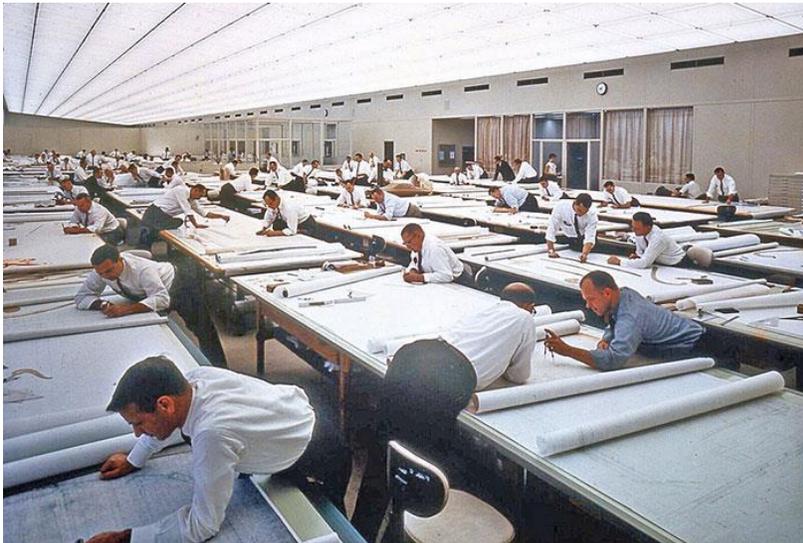
### Applications

La mécanique du solide est utilisée dans de nombreux domaines, tels que la construction, l'ingénierie des matériaux, la conception de structures, etc. Exemples d'applications incluent l'analyse des ponts, des bâtiments, des poutres, des machines, etc.

La mécanique du solide est essentielle pour comprendre le comportement des matériaux et des structures dans diverses situations, et elle est fondamentale dans de nombreux domaines de l'ingénierie et de la physique.

## Organisation des métiers

De l'ingénieur au technicien / BAP C – Science de l'ingénieur et instrumentation scientifique



## Bureau d'études

- CAO, Mécanique/Thermique
- Automatisation/Mécatronique
- Cryogénie/Vide/Fluide
- Matériaux (composites...)



## Ateliers mécaniques

- Fabrication et montage
- Prototypage
- Impression 3D

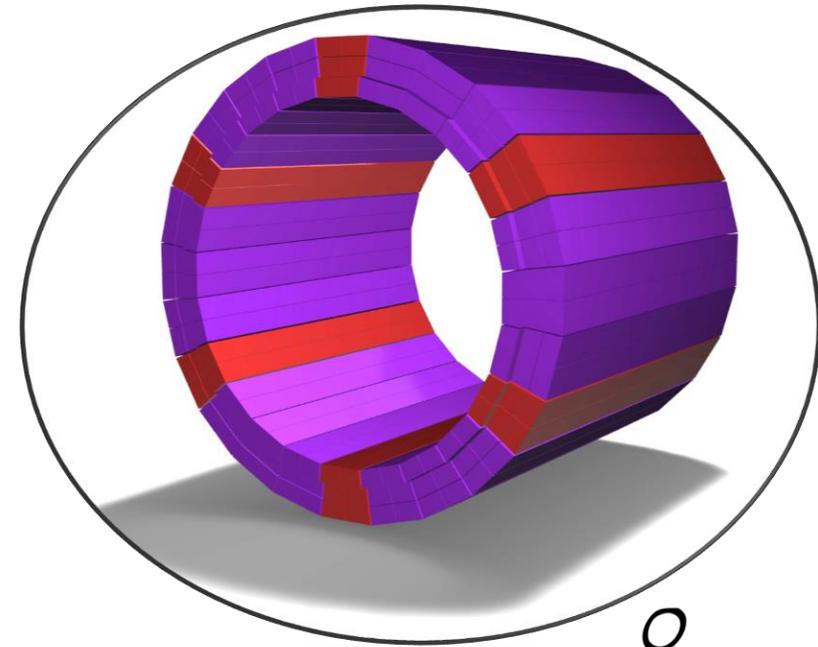
## Des métiers en évolution

- Réduction considérable des effectifs en 50 ans
- Importance croissante des outils numériques
- Recours de plus en plus important à la sous-traitance
- Innovation très forte sur les matériaux
- Nécessité d'optimiser les coûts liés à la fabrication
- Mise en place de démarche qualité
- Collaboration internationales avec multiples interlocuteurs
- Suivi de l'évolution des technologie des détecteurs
- Passage de Catia v5 à 3D Expérience en 2022-2023 à l'IN2P3



## Ce que le chercheur souhaite avant sa première réunion avec le mécanicien:

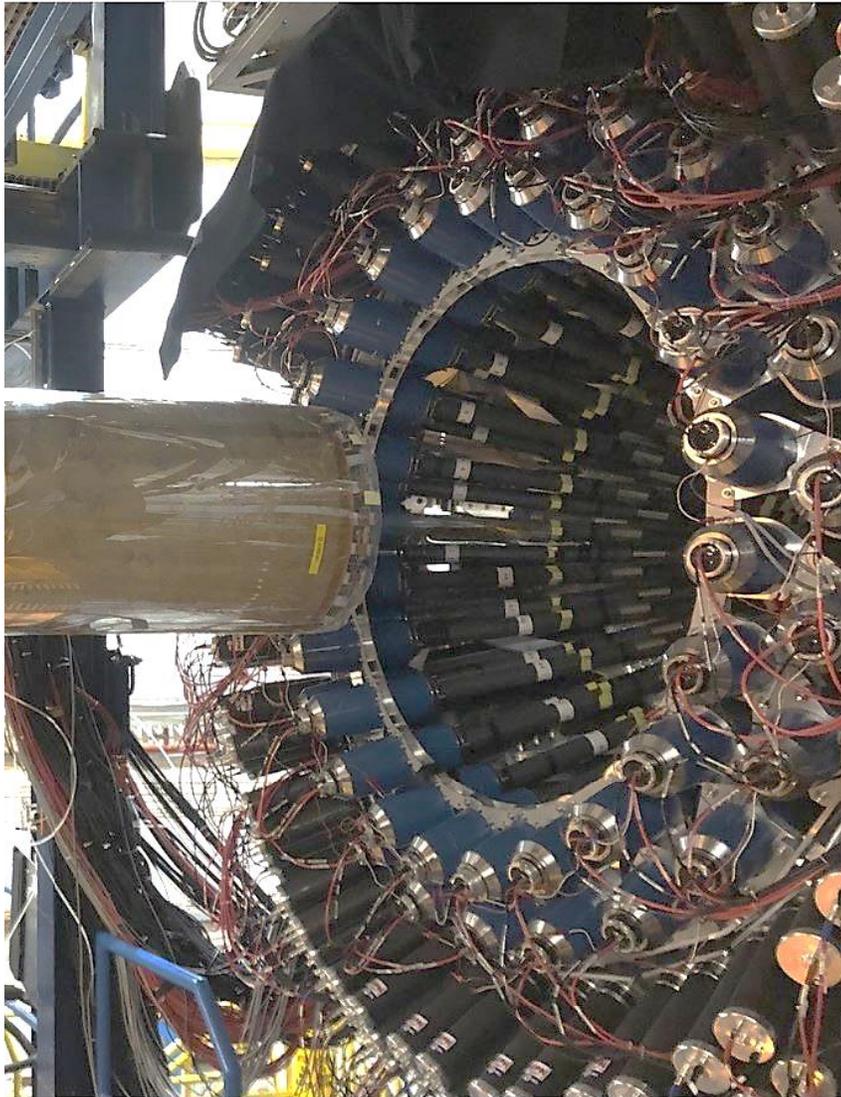
- Pas de matière
- Parties actives du détecteurs en « lévitation »
- Zéro zones mortes
- Pas de câbles
- Formes géométrique parfaites
- Tolérances mécaniques parfois fantaisistes
- Interchangeable rapidement et facilement



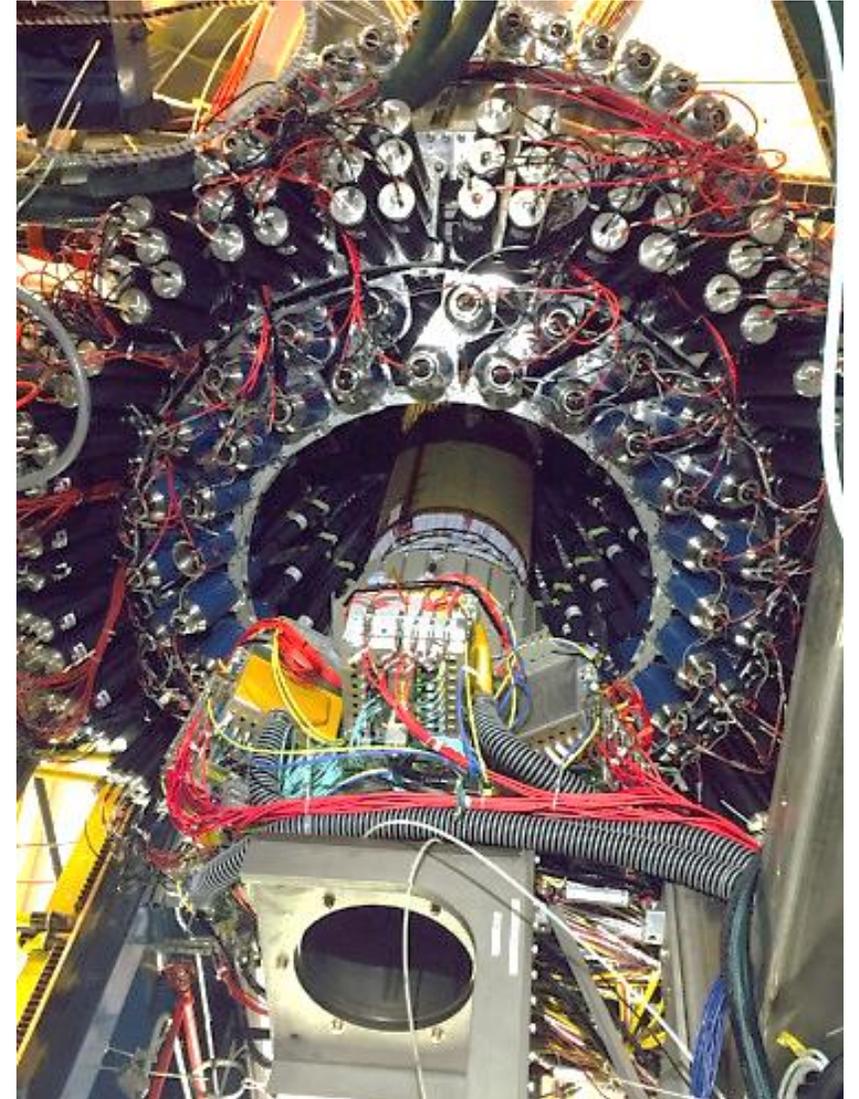
Scintillateurs  
en plastique



# 1. Introduction | La mécanique dans les détecteurs



**Ce qu'il obtient !**



## Dans les détecteurs

### ❑ Fonctions mécaniques:

- **Supporter** : Stabilité, connaissance du comportement mécanique sous charges
- **Positionner** : Précision, connaissance de la position précise des éléments
- **Refroidir** : Stabilité thermique, maîtrise du système de refroidissement

### ❑ Domaines de mécanique:

- CINEMATIQUE Concerne surtout les outillages, les télescopes
- STATIQUE Linéaire et non-linéaire
- DYNAMIQUE Souvent limités aux petits mouvements autour de la position d'équilibre, vibrations libres et forcées
- MMC Mécanique des Milieux Continus (Résistance des Matériaux et Mécanique des Fluides)

### ❑ Domaines physiques connexes:

- THERMIQUE Influence de la température sur le comportement mécanique, régulation thermique
- ELECTROMAGNETISME Influence du champ magnétique sur les matériaux

## Très grande diversité de développements

### □ Dimensionnelle:

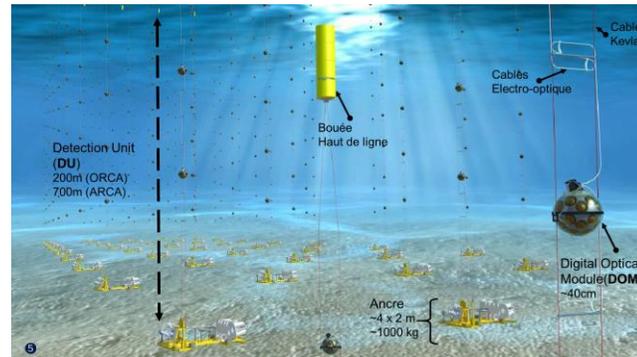
- Masse de quelques kg à plusieurs milliers de tonnes
- **Quelques cm à plusieurs dizaines de mètres**

### □ Technologique:

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

### □ Contexte et environnement:

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



KM3Net, Large de Marseille

## Très grande diversité de développements

### ❑ Dimensionnelle:

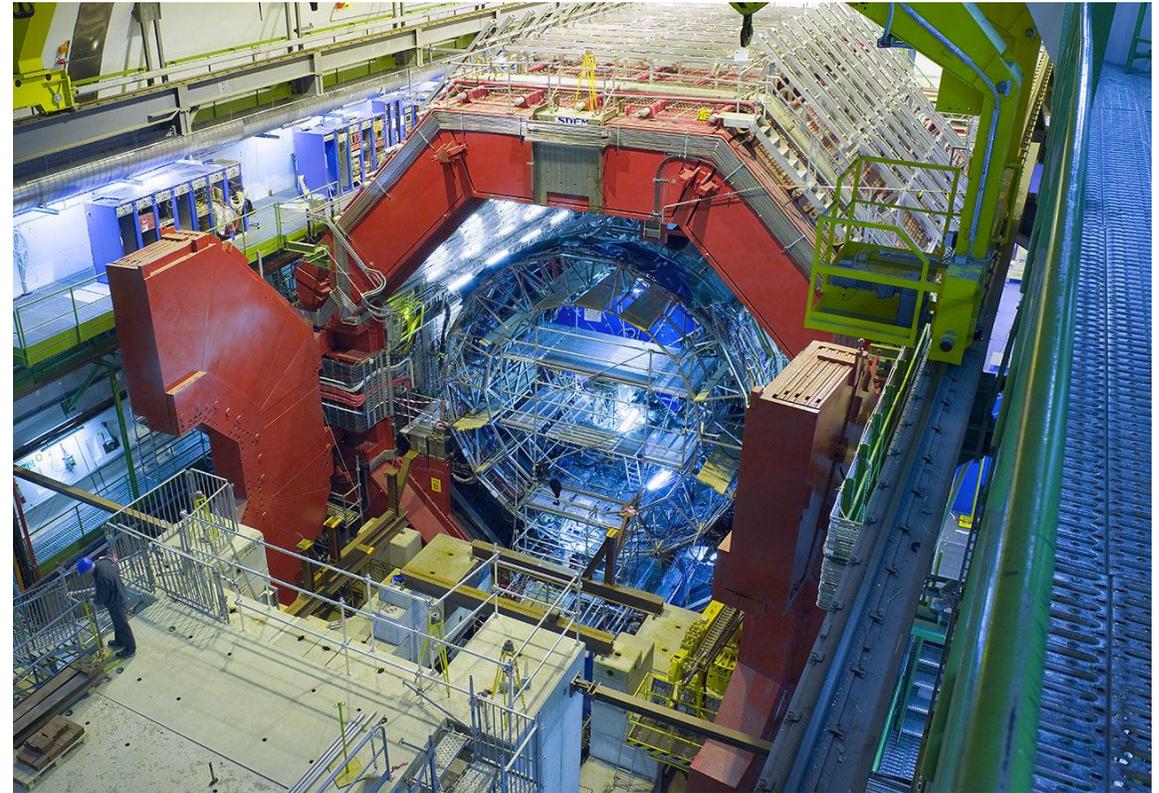
- Masse de quelques kg à **plusieurs milliers de tonnes**
- Quelques cm à **plusieurs dizaines de mètres**

### ❑ Technologique:

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

### ❑ Contexte et environnement:

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



ALICE

## 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

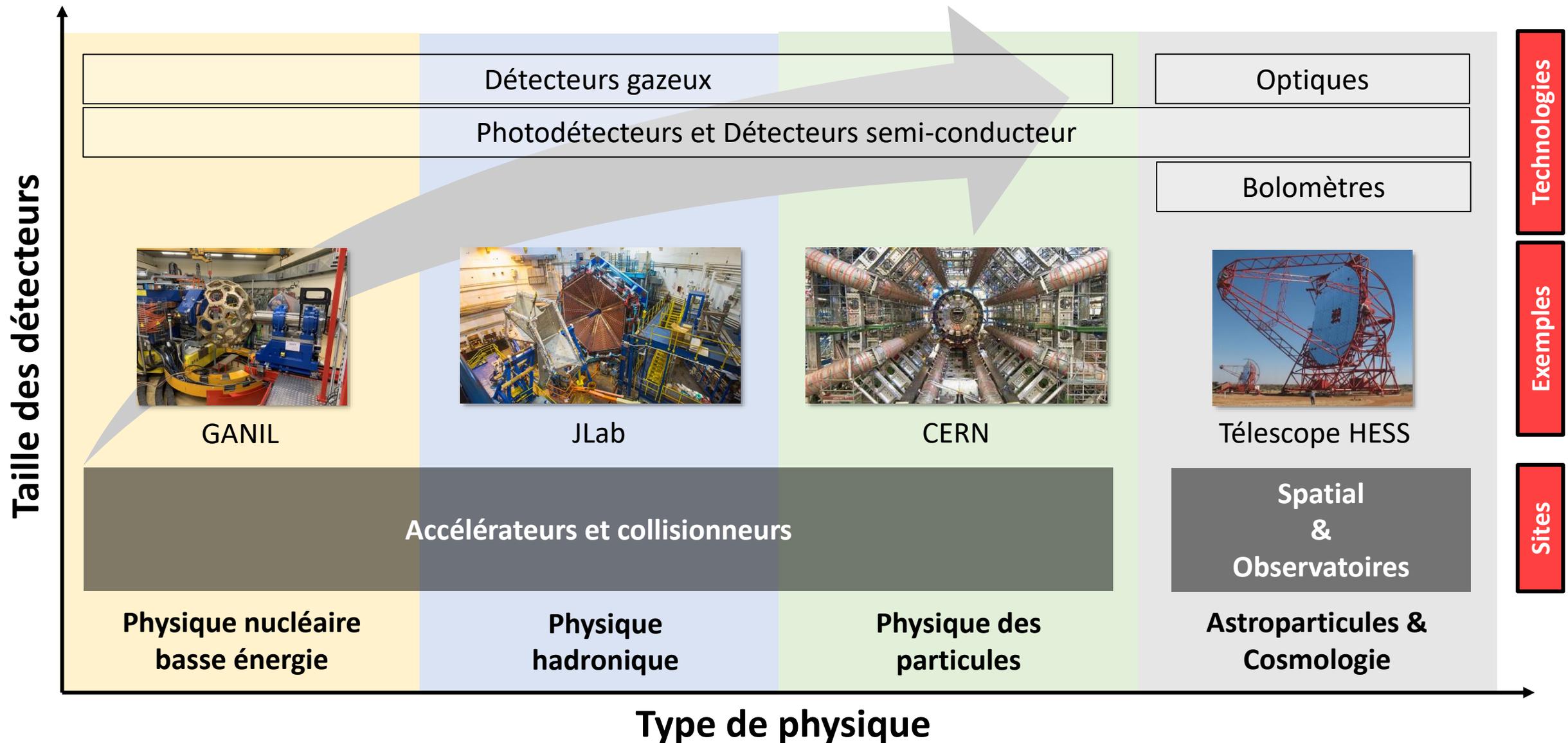
### ❑ Contexte et environnement:

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



Installation de GLAST/FERMI dans la fusée DELTA II

# 1. Introduction | 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

### Analyse fonctionnelle du besoin

- C'est une étape essentielle du projet, souvent la période la plus stimulante et riches en échanges
- Mise en place des collaborations et des groupes de travail technique
- Plus la définition est précise et exhaustive, plus le produit sera optimisé



1<sup>er</sup> « coup de crayon », CAO



#### Phase amont:

- ✓ Idée ou concept du chercheur
- ✓ Proposal physique
- ✓ Cahier des charges succinct

#### Fonctions Principales et de Contraintes:

- ✓ Traduction du besoin (FP)
- ✓ Premières réunions techniques
- ✓ Brainstorming
- ✓ Itération des contraintes et des exigences (FC)

#### Fonctions Techniques:

- ✓ Rédaction du cahier des charges avec le besoin et les contraintes (CCTP, AMDEC)
- ✓ Validation par les responsables scientifiques et techniques
- ✓ Peut évoluer dans le temps...

(Pour aller plus loin: ANF assurance produit INSU-IN2P3 / Formation management projet)

**La conception mécanique, nécessaire à une expérience de physique, englobe 2 activités:**

❑ **La conception du **détecteur** par lui-même:**

- Créativité poussée nécessaire
- Recherche de solutions, de techniques innovantes et de performances optimales
- Possibilité de programme de R&D, de prototypes ...
- Etudes longues, généralement très discutées et analysées (revues, etc...)

❑ **La conception des **outillages** qui entourent le détecteur (intégration et installation):**

- Moindre créativité, appel à l'existant
- Préférence de solutions éprouvées
- Etudes plus courtes, souvent moins prioritaires
- Conception plus grossières, optimisation moins requise
- Budget plus limité (+ logistique)

### La conception doit intégrer très tôt la faisabilité des pièces

#### Nécessité d'un **dialogue fort**:

- Entre le concepteur (BE) et l'atelier de fabrication (il n'existe plus de bureau des méthodes)
- Entre le concepteur (BE) et l'industriel

#### Prise en compte du **procédé de fabrication**:

- Nombre de pièces
- Coût
- Performances attendues

#### Obtention des **tolérances** vis-à-vis du procédé de fabrication:

- Usinage : 0,1 à 0,01 mm/m
- Impression 3D: 0,05 mm à 0,2 mm (dépend du procédé d'impression)
- Soudage: 1 mm/m est déjà très exigeant

#### Objectif de **précision** : 2 axes de conception possibles:

- Pièces très précises donnant une précision intrinsèque
- Ajustement d'assemblage de pièces moins précises

### La conception de forme: La Conception Assistée par Ordinateur (CAO)

#### ❑ Quelques logiciels utilisés à l'IN2P3:

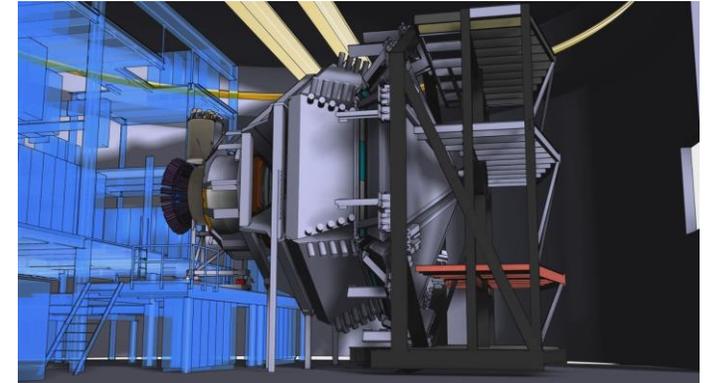
- 3D Expérience (Dassault Systèmes) et Solid Works (plus rare)
- Free CAD (très rare, licence publique)

#### ❑ La CAO 3D:

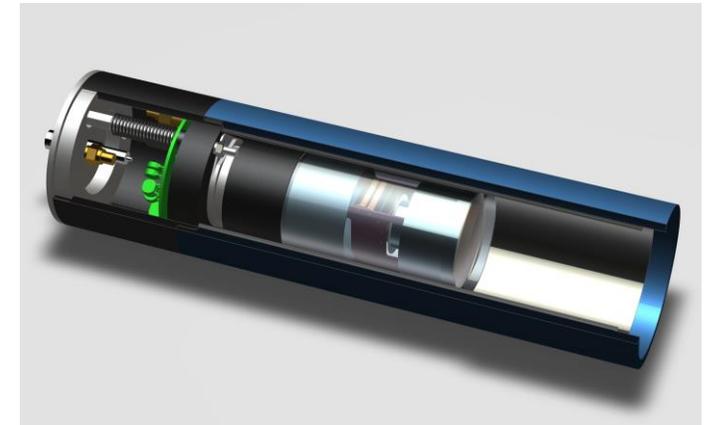
- Permet d'obtenir un modèle réaliste tout au long de la phase de conception
- Dimensionnement réel des éléments
- Prise en compte de toutes sortes d'échelles
- Mise en place de l'objet dans son environnement
- Définition des interfaces (entre détecteurs par exemple)

#### ❑ Périmètre élargi de la conception:

- Prise en compte des composants périphériques (fluide, câblage...)
- Design de l'encombrement des PCB (parfois même des esquisses de routage)



Hall B du Jefferson Laboratory (USA)



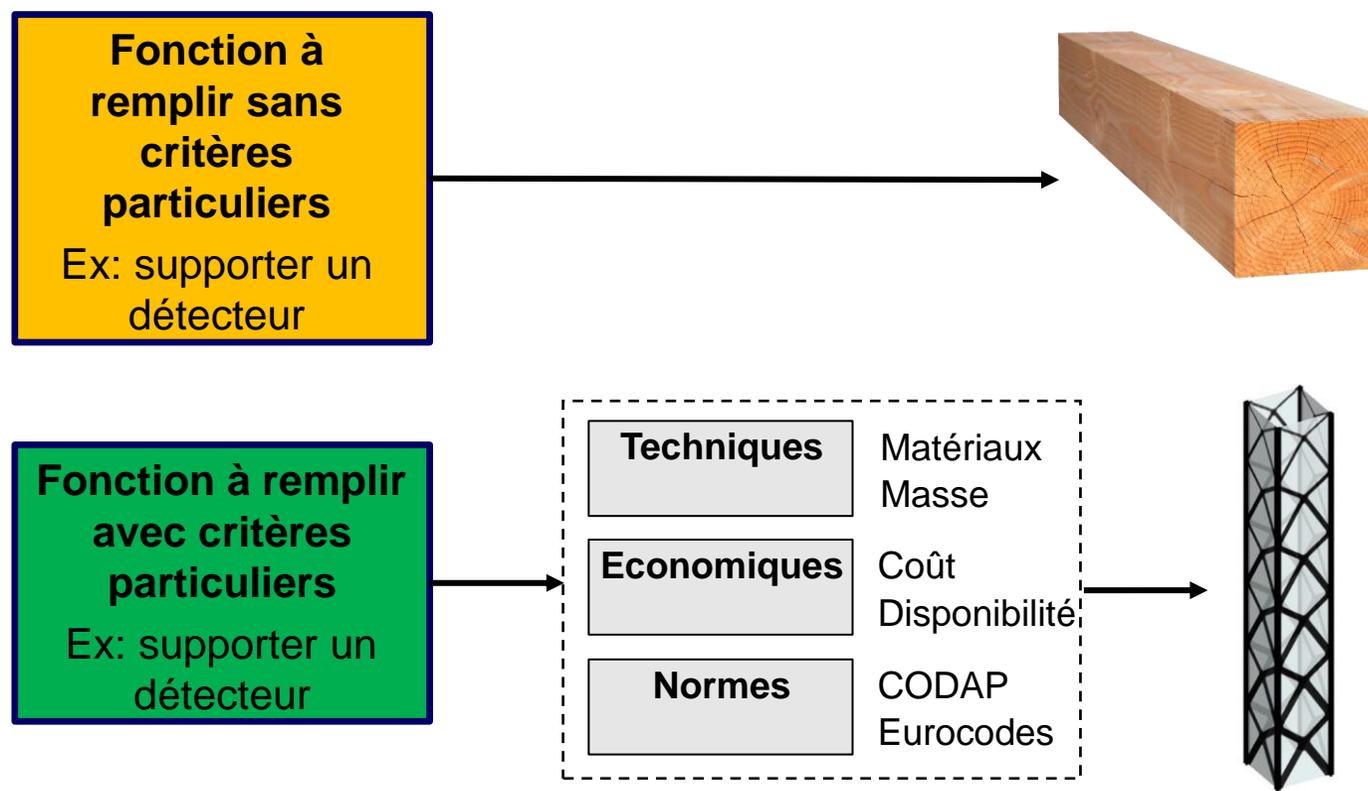
Ensemble PMT (CND, CLAS 12, JLab)

### Le dimensionnement

Donner des dimensions physiques les plus appropriées à un système en considérations d'aspects techniques, économiques ou réglementaires particuliers.

#### Etapes du dimensionnement:

- Se demander ce que l'on cherche à dimensionner
- S'assurer que l'ensemble des contraintes est connu
- Avoir une représentation analytique ou numérique du système à dimensionner
- Définir l'ensemble des hypothèses de travail
- Définir les conditions aux limites
- Mettre en forme le modèle
- Résolution analytique ou numérique en fonction du niveau de complexité

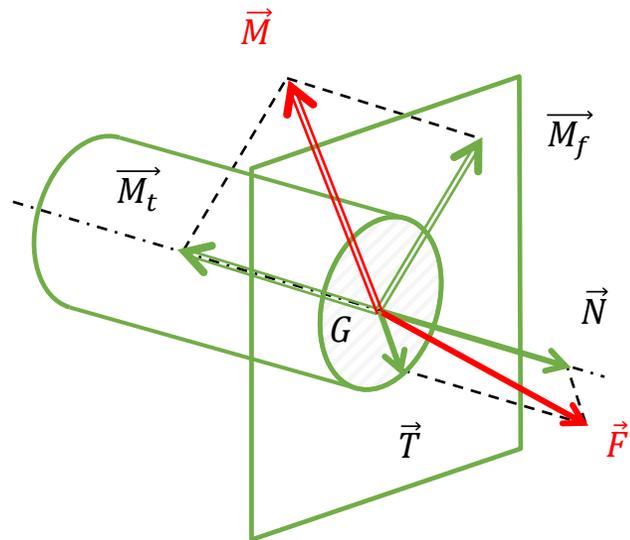


## Résistance des matériaux

La résistance des matériaux en mécanique est une branche de la science qui s'occupe de l'étude des forces et des contraintes dans les matériaux. Elle est très importante pour concevoir des structures solides et fiables, comme des bâtiments, des ponts ou des avions.

**FORCE:**  
 Une force est une grandeur qui représente l'action exercée sur une structure ou un matériau, telle qu'une traction, une compression, une flexion ou une torsion (N). Les forces peuvent être internes ou externes, et peuvent être représentées par des vecteurs qui indiquent leur direction et leur intensité.

**CONTRAINTE:**  
 Une contrainte, quant à elle, représente la force exercée sur une unité de surface d'un matériau ou d'une structure (Pa).



Eléments du torseur		Sollicitations simples	Notation de la contrainte
$\vec{F}$	$\vec{N}$ : normal à la section	Effort normal	Extension ou compression
	$\vec{T}$ : dans le plan de la section	Effort tranchant	Cisaillement
$\vec{M}$	$\vec{M}_t$ : normal à la section	Moment de torsion	Torsion
	$\vec{M}_f$ : dans le plan de la section	Moment de flexion	Flexion

### Critère de l'épaisseur matière pour les détecteurs

La matière joue un rôle particuliers dans la réalisation des détecteurs de particules. Les interactions particules/matière sont à la base de la détection. Dans un détecteur il y a de la matière « active », utile à la détection et de la matière « passive », qui nuit à la détection.

#### ❑ Objectifs :

- Réduire la matière passive, les zones mortes
- Maintenir et positionner au mieux la matière active (Scintillateurs, cristaux, fils, plans de détection, Si, Ge...)

#### ❑ Longueur de radiation $X_0$ :

- Les électrons de haute de énergie perdent l'essentiel de leur énergie dans le matière par rayonnement de Bremsstrahlung
- La particule d'énergie  $E_0$  traverse une pièce de longueur  $x$  et ressort avec une énergie  $E$   $-dE / dx = E / X_0$
- La quantité de matière traversée lors de ces interactions est la longueur de radiation, noté  $X_0$  ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
- C'est une grandeur propre à la physique. Les fournisseurs de matériaux n'en font pas état
- Basée sur les propriétés physiques de la matière (Nb atomique  $Z$ , Nb de masse  $A$ )

$$X_0 = \frac{716 \cdot A}{Z(Z+1)\ln(287/\sqrt{Z})} \text{ [g}\cdot\text{cm}^{-2}\text{]}$$

Dépend du Nb atomique  $Z$  et du Nb de masse  $A$

	Air	Eau	Al	LAr	Fe	Pb	W
Z	-	-	13	18	26	82	74
$X_0$ (cm)	30420	36	8,9	14	1,76	0.56	0.35

### Dimensionnement analytique, formulaire et codes de calculs

#### ❑ Utilisation:

- Elle est basée sur des formulaires ou des codes de calculs applicables à des domaines définis
- En complément aux dimensionnements numériques car ils traitent souvent d'aspects difficiles à modéliser (cordons de soudure ou boulons ou visserie)

#### ❑ Exemples de codes:

- Codap : Calcul des appareils à pression
- Eurocode 3 : Calcul des structures en acier, assemblages précontraints
- Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes
- Eurocode 9 : Calcul des structures en alliages d'aluminium

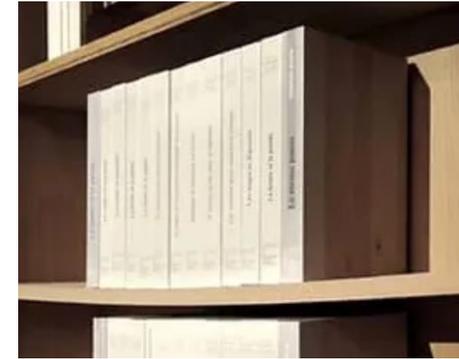
#### ❑ Principaux avantages:

- La formulation est largement validée, elle s'inspire et respecte les règles de l'art du domaine d'application
- Approbation plus facile au sein d'une collaboration : un modèle est toujours plus discutable et fait moins « autorité »
- Peut s'avérer indispensable dans les domaines réglementés : levage, transport,...

## Résistance des matériaux / Fluage et Flambement

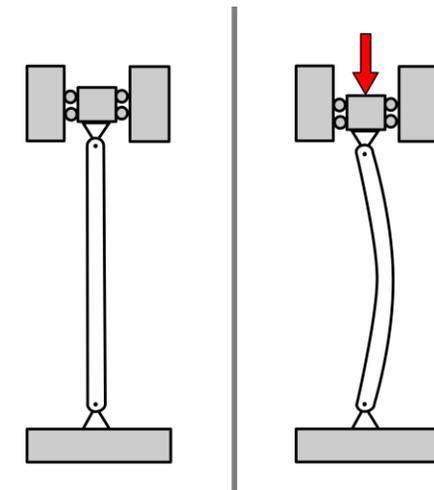
### Fluage

- ❑ 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

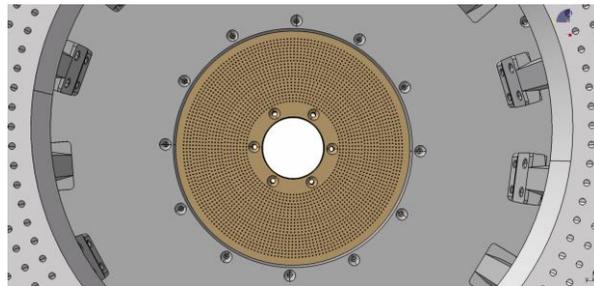
- ❑ Le flambement est l'instabilité structurelle qui se produit lorsqu'une colonne ou un élément mince est soumis à une compression axiale critique.
- ❑ Sous une certaine charge critique, la colonne perd sa capacité à supporter la charge et fléchit latéralement, généralement dans un mode de déformation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



## Quelques exemples de dimensionnement

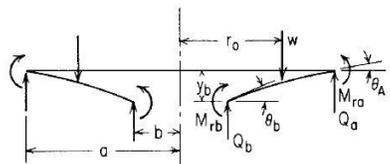
Donner des dimensions physiques les plus appropriées à un système en considérations d'aspects techniques, économiques ou réglementaires particuliers.

### ANALYTIQUE



Plaque macor soumise à une pression

Case 1. Annular plate with a uniform annular line load  $w$  at a radius  $r_o$



Analytic model (Roak's formula)

General expressions for deformations, moments, and shears:

$$y = y_b + \theta_b r F_1 + M_{rb} \frac{r^2}{D} F_2 + Q_b \frac{r^3}{D} F_3 - w \frac{r^3}{D} G_3$$

$$\theta = \theta_b F_4 + M_{rb} \frac{r}{D} F_5 + Q_b \frac{r^2}{D} F_6 - w \frac{r^2}{D} G_6$$

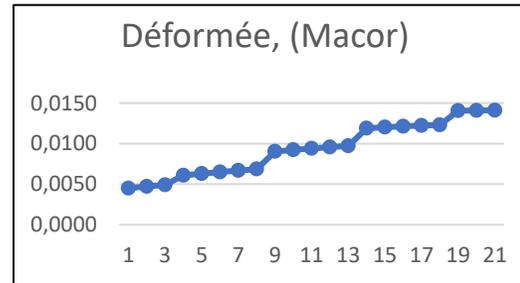
$$M_r = \theta_b \frac{D}{r} F_7 + M_{rb} F_8 + Q_b r F_9 - w r G_9$$

$$M_t = \frac{\theta D (1 - \nu^2)}{r} + \nu M_r$$

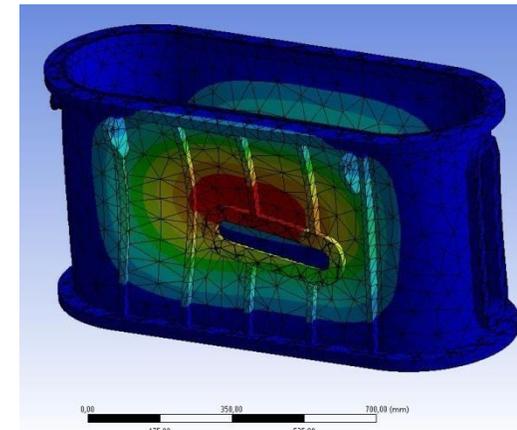
$$Q = Q_b \frac{b}{r} - w \frac{r_o}{r} (r - r_o)^0$$

For the numerical data given below,  $\nu = 0.3$

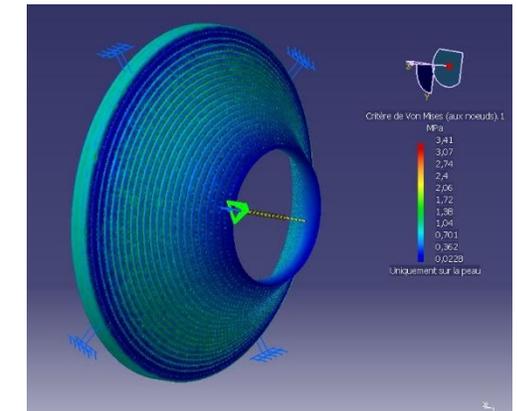
$$y = K_y \frac{w a^3}{D}, \quad \theta = K_\theta \frac{w a^2}{D}, \quad M = K_M w a, \quad Q = K_Q w$$



### NUMERIQUE



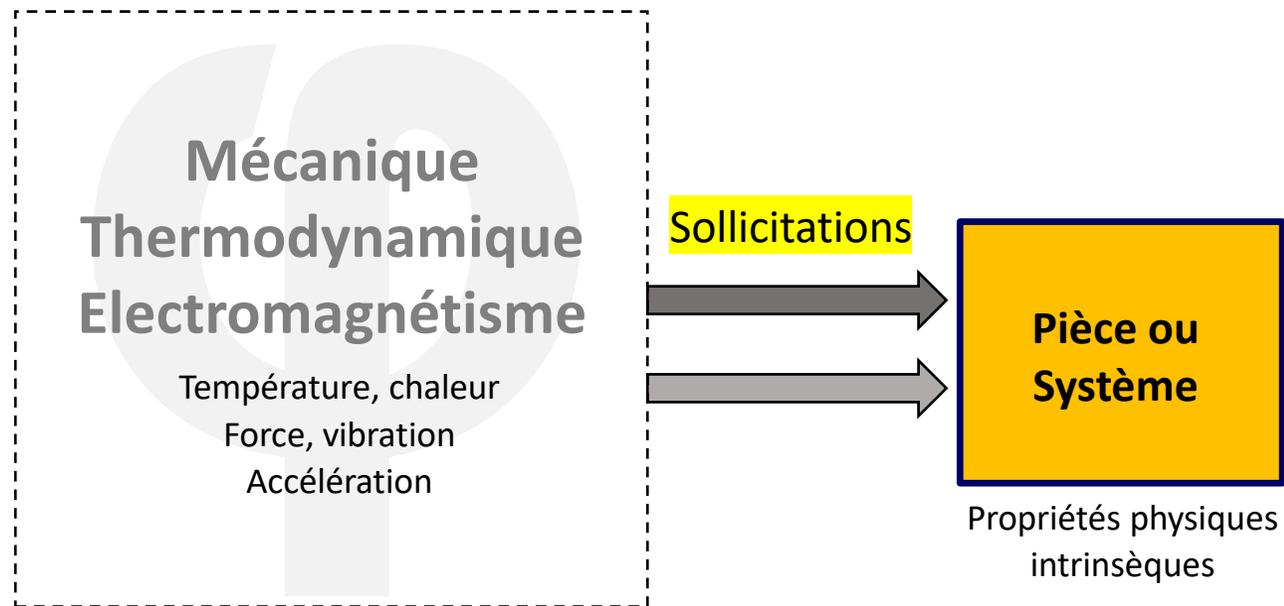
Déformation d'une enceinte sous vide (GALOP)



Prototype structure fils ALERT (contrainte)

### La simulation numérique

A pour but de représenter des phénomènes physiques réels complexes dont la description repose sur un modèle mathématique. C'est un outil précieux permettant de dimensionner et d'anticiper le comportement d'un système.



#### Objectifs:

- Dimensionner une pièce ou un système
- Connaître la réponse d'un système soumis à des sollicitations
- Disposer d'une image du fonctionnement du système

### Equations et lois

#### Équations d'équilibre :

- Elles sont dérivées des lois de conservation de la quantité de mouvement et du moment angulaire.
- Elles sont basées sur les principes fondamentaux de la statique ( $\sum F = 0$ ).

#### Lois de comportement :

- Elles décrivent la réponse des matériaux à des sollicitations mécaniques. Elles établissent une relation entre les contraintes et les déformations dans le matériau.
- Ces lois peuvent être linéaires, comme la loi de Hooke pour les matériaux élastiques, ou non linéaires, pour des matériaux présentant un comportement plastique, viscoélastique, etc.

#### Équations de compatibilité :

- Ces équations expriment la continuité des déformations.
- Elles assurent que les déformations dans un matériau ou une structure sont cohérentes et s'assemblent correctement.
- Elles garantissent que les déformations calculées respectent les conditions imposées par les lois de comportement et les équations d'équilibre.

## Lois de conservation

**Quantité totale avant le processus = Quantité totale après le processus**

La somme totale de la quantité d'une grandeur physique spécifique avant un processus est égale à la somme totale de cette même grandeur après le processus.

En d'autres termes, cette loi exprime le principe fondamental selon lequel une certaine quantité spécifique est constamment conservée dans un système isolé, et ne peut ni être créée ni détruite, mais peut seulement changer de forme ou être transférée d'une partie du système à une autre.

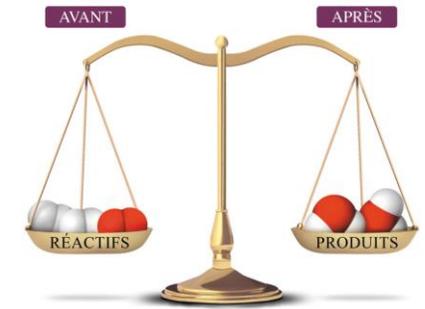
### Grandeur physique spécifique:

- Masse
- Energie
- Quantité de mouvement

## Lois de conservation

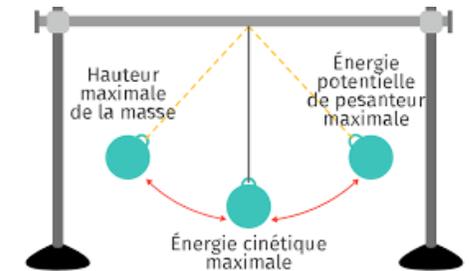
### Loi de conservation de la masse (Loi de Lavoisier):

- ❑ La loi de conservation de la masse stipule que la masse totale d'un système isolé reste constante au cours du temps, c'est-à-dire que la quantité de matière ne peut ni être créée ni détruite.
- ❑ Cette loi est utilisée pour modéliser les phénomènes impliquant des flux de matière, tels que la dynamique des fluides, la diffusion, la réaction chimique, etc.



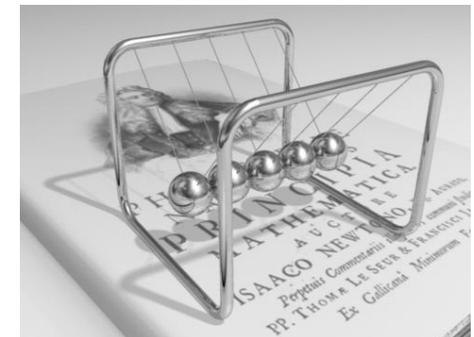
### Loi de conservation de l'énergie (1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique):

- ❑ L'énergie totale dans un système isolé reste constante au cours du temps
- ❑ L'énergie ne peut ni être créée ni détruite, mais seulement transformée d'une forme à une autre.
- ❑ Cette loi est utilisée pour modéliser les transferts et les transformations d'énergie dans divers systèmes, tels que les systèmes thermiques, électriques, mécaniques, etc.



### Lois de conservation de la quantité de mouvement (2<sup>ième</sup> loi de Newton, PFD):

- ❑ La quantité totale de mouvement d'un système isolé reste constante au cours du temps
- ❑ La quantité de mouvement ne peut être créée ni détruite.
- ❑ Cette loi est utilisée pour modéliser les mouvements et les interactions entre les corps, tels que les problèmes de collision, de propulsion, de fluides en mouvement, etc.

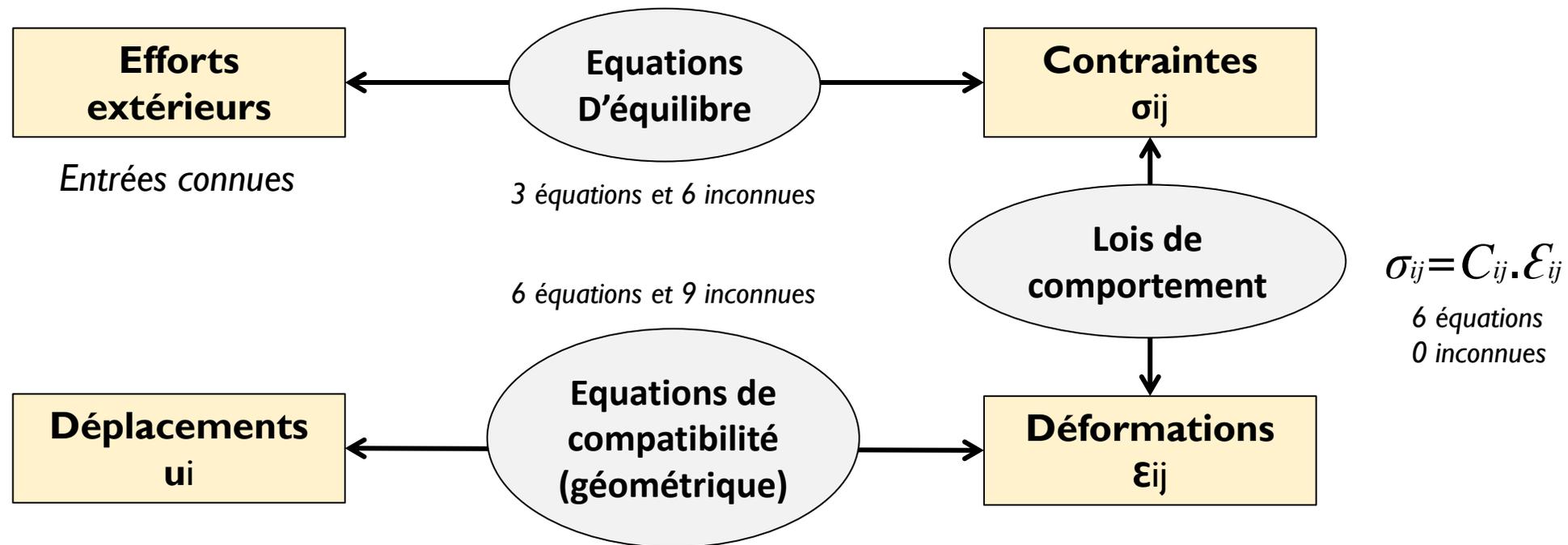


### Comment résoudre un problème numérique?

- 1- GEOMETRIE**  
Définir une géométrie adaptée à la simulation (nettoyage CAO et plan de symétrie)  
Conditions aux limites
- 2- LOIS PHYSIQUES**  
Lois de conservation et d'équilibre (masse, de quantité de mouvement et énergie)  
Lois de comportement
- 3- MATHEMATIQUE**  
Equations de conservation, représentation matricielle et Equations aux Dérivées Partielles
- 4- DISCRETISATION**  
Maillage de la géométrie par des éléments simples (espace)
- 5- RESOLUTION**  
Méthode des différences finies, volumes finis et éléments finis  
Inversion de matrices
- 6- ANALYSE**  
Analyse et interprétation, variations des paramètres d'entrées

### Problème d'élasticité

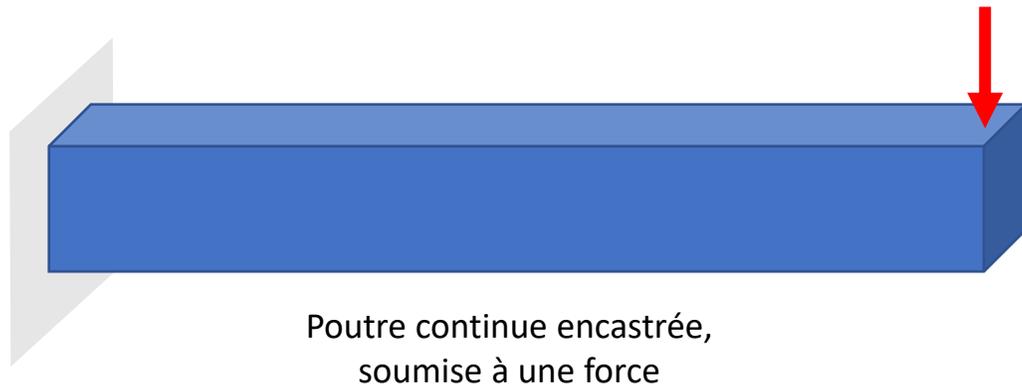
L'objectif est de déterminer en chaque point du solide le vecteur déplacement  $u$  (trois composantes), le tenseur des déformations  $\epsilon$  (six composantes indépendantes) et le tenseur des contraintes  $\sigma$  (six composantes indépendantes).



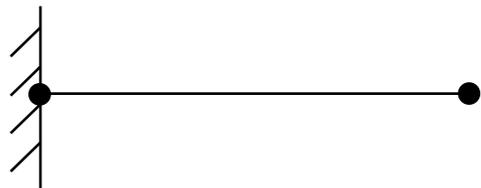
Représentation tensorielle et matricielle, 15 équation à 15 inconnues

### La discrétisation

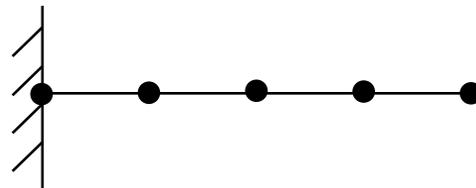
Méthode pour simplifier la modélisation et la résolution des problèmes complexes. Elle consiste à diviser un système continu en petits éléments ou volumes discrets, permettant ainsi d'approximer les équations qui régissent le comportement du système.



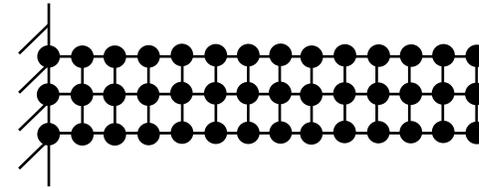
- Nécessité de passer d'un état continu (indénombrable) à un état discret (dénombrable)
- Précision de la discrétisation en fonction du type d'éléments
- Propriétés mécaniques sont transférées aux éléments
- Les résultats vont dépendre du types d'éléments



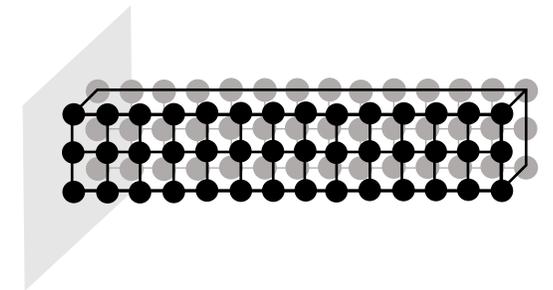
1 élément 1D



4 éléments 1D



Eléments 2D



Eléments 3D

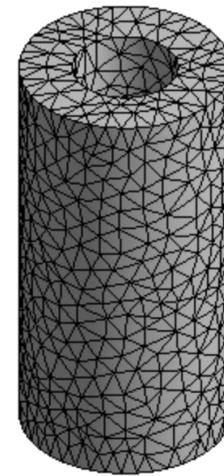
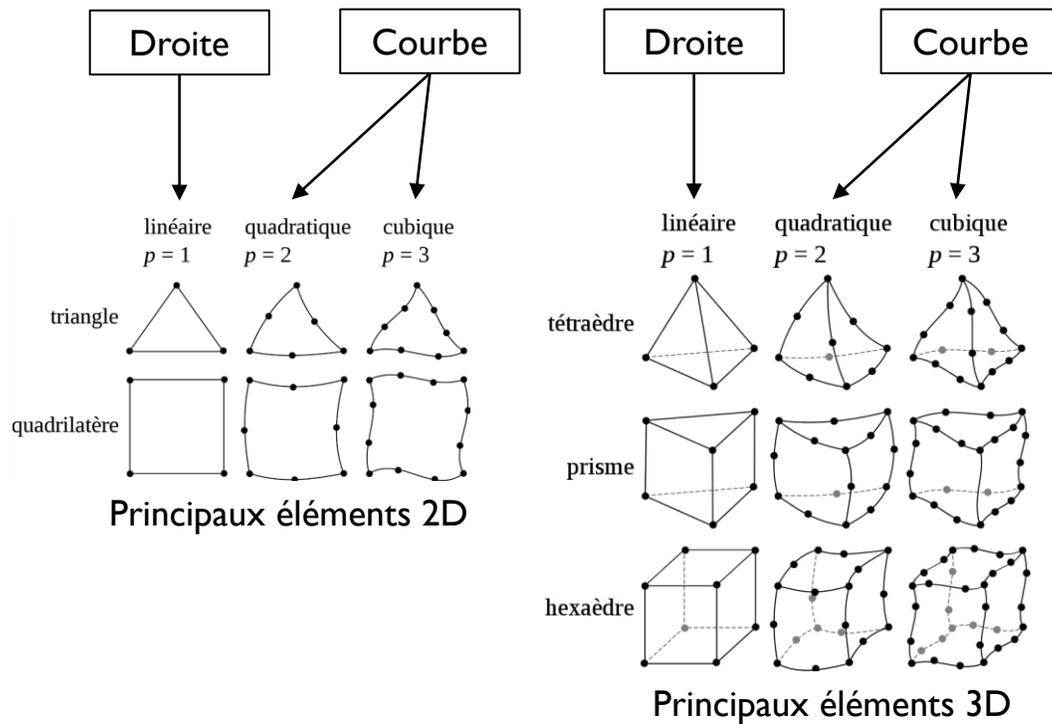
**Nœuds (dll)**

3 trans :  $U_x, U_y, U_z$

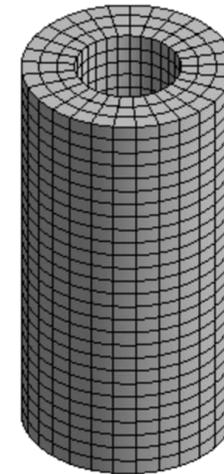
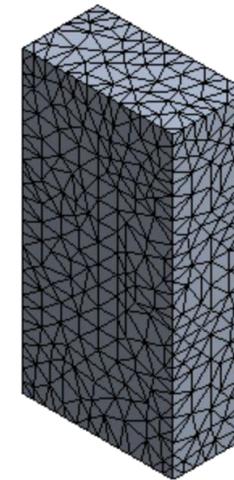
3 rot :  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$

## La discrétisation

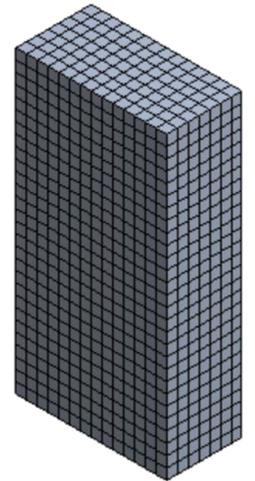
Méthode pour simplifier la modélisation et la résolution des problèmes complexes. Elle consiste à diviser un système continu en petits éléments ou volumes discrets, permettant ainsi d'approximer les équations qui régissent le comportement du système.



Maillage tétraédrique  
(non structuré)



Maillage hexaédrique  
(structuré)  
*Surtout pour les formes simples*



## Mécanique des fluides

La mécanique des fluides est une branche de la physique qui étudie le comportement des fluides (liquides et gaz) en mouvement et au repos.

### Concepts Fondamentaux

- ❑ **Fluide** : Substance qui peut s'écouler et prendre la forme de son contenant, caractérisée par sa masse volumique et sa viscosité.
- ❑ **Écoulement** : Mouvement d'un fluide à travers un espace, défini par la vitesse et le profil de vitesse.
- ❑ **Équations de conservation** : Ensemble d'équations qui expriment la conservation de la masse, de la quantité de mouvement (momentum) et de l'énergie dans un fluide.

### Classification des Écoulements

- ❑ **Écoulement laminaire** : Mouvement fluide caractérisé par des lignes de courant régulières et ordonnées.
- ❑ **Écoulement turbulent** : Mouvement fluide caractérisé par des tourbillons et des fluctuations aléatoires de la vitesse.

### Applications

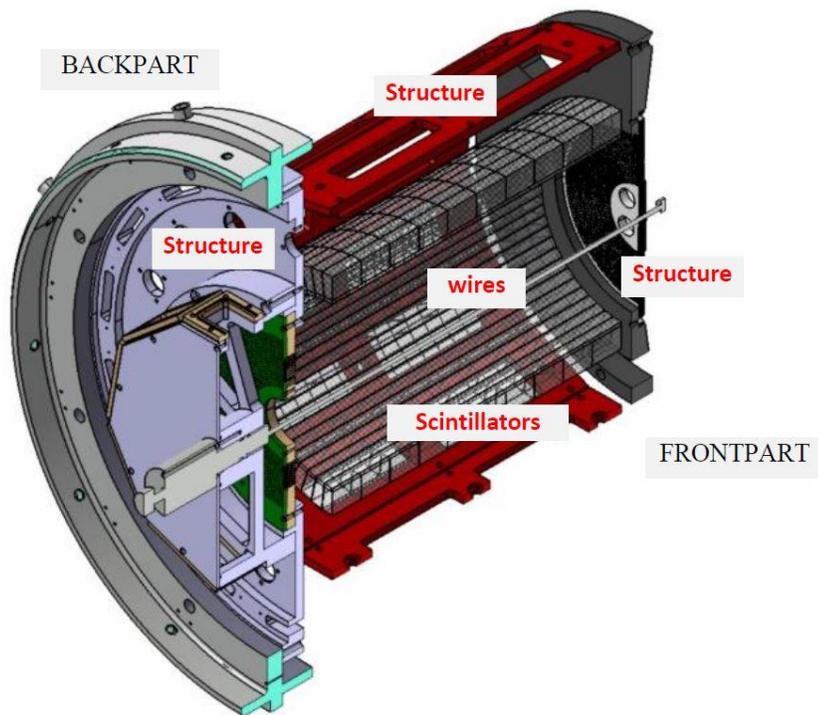
Utilisée dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, l'ingénierie des fluides, la météorologie, la climatologie, etc.

Applications pratiques incluent la conception d'aéronefs, la dynamique des fluides dans les tuyaux et canalisations, la modélisation des océans et de l'atmosphère, etc.

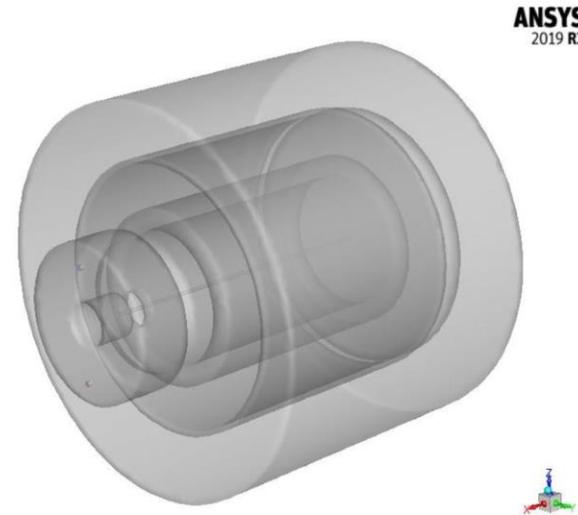
La mécanique des fluides est essentielle pour comprendre et prédire le comportement des fluides dans une grande variété de situations, et elle joue un rôle crucial dans de nombreux aspects de la technologie moderne.

### Simulation numérique, Analyse fluide

Projet ALERT: Détecteur gazeux (chambre à fils cylindrique) qui sera installé au Jefferson Laboratory (USA)



*Cut view, location of the wires and the scintillators (without the gas enclosure)*



**GEOMETRIE**

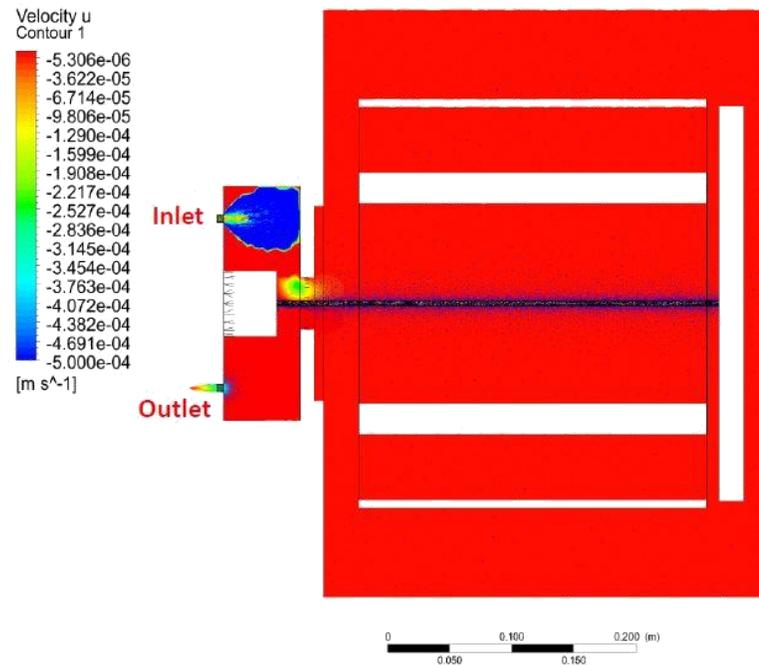


**DISCRETISATION**

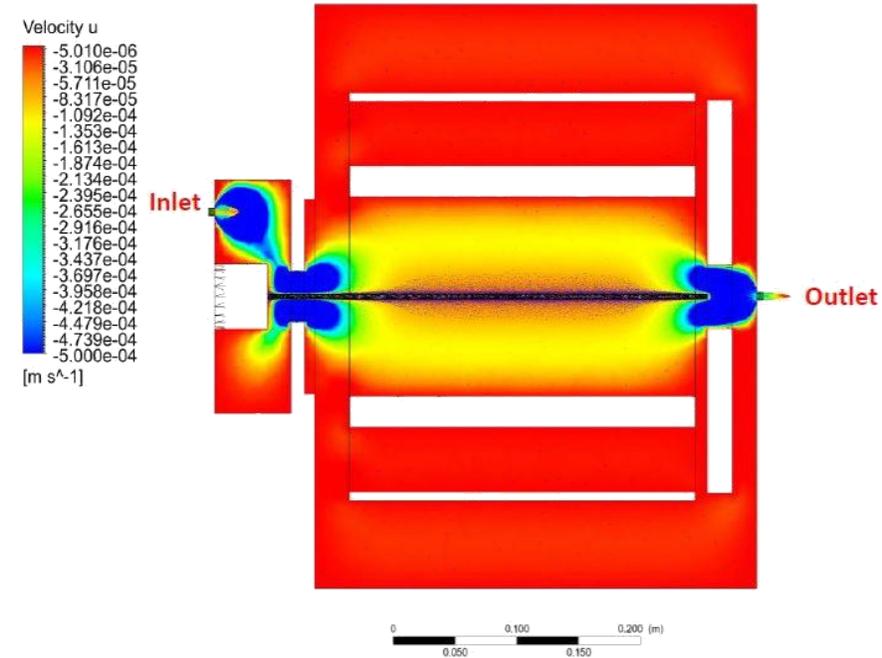
### Simulation numérique, Analyse fluide

Projet ALERT: **ANALYSE**, Comparaison des vitesses du gaz dans la chambre avec deux positions de sorties différentes

La position de la sortie doit être sur l'avant afin d'assurer le renouvellement du gaz dans la partie active.



Case 1

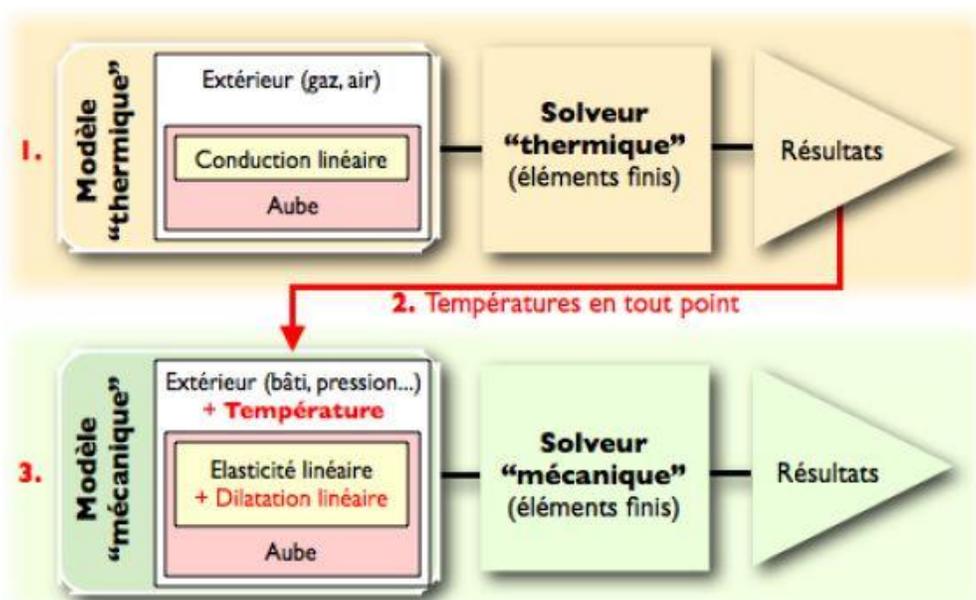


Case 2

### Simulation numérique, les couplages physiques

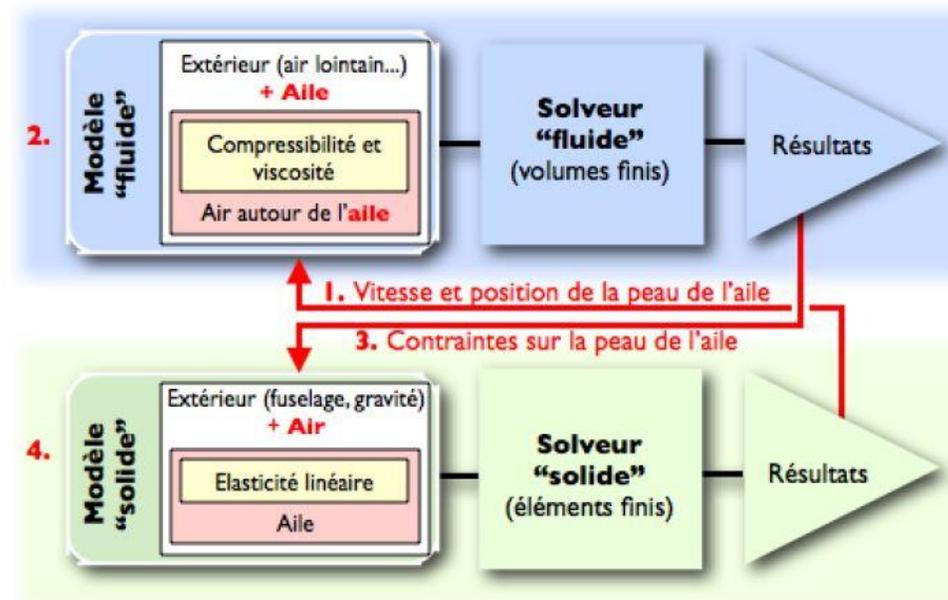
Analyse du comportement d'un modèle dépendant de plusieurs domaines de physique : calculs couplés nécessaires.

Le domaine du multiphysique est une branche de la physique dont l'objet est de coupler au moins deux systèmes physiques, chacun étant gouverné par ses propres principes d'évolution ou d'équilibre, comme des lois de bilan ou des lois constitutives.



#### Couplage faible

Un des deux modèles ne dépend pas de l'autre  
Résolution séquentielle

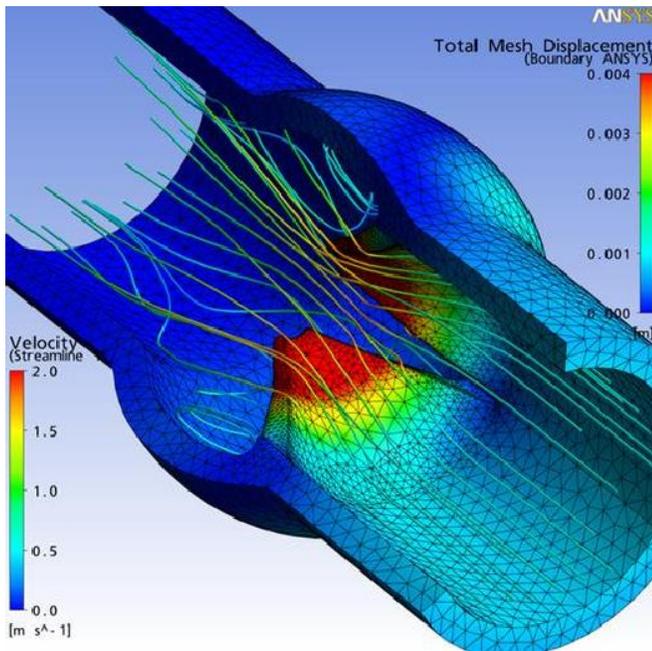


#### Couplage fort

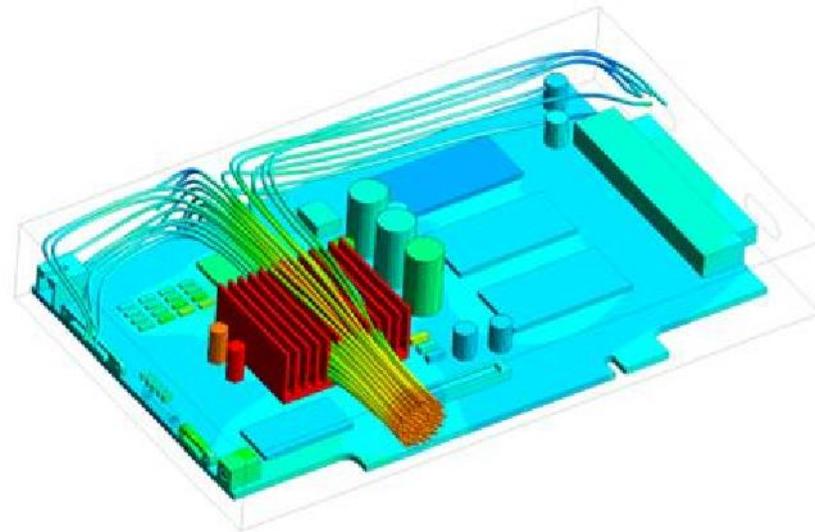
Chacune des deux physiques dépend de l'autre.  
Echange des résultats entre les solveurs

## Simulation numérique, les couplages

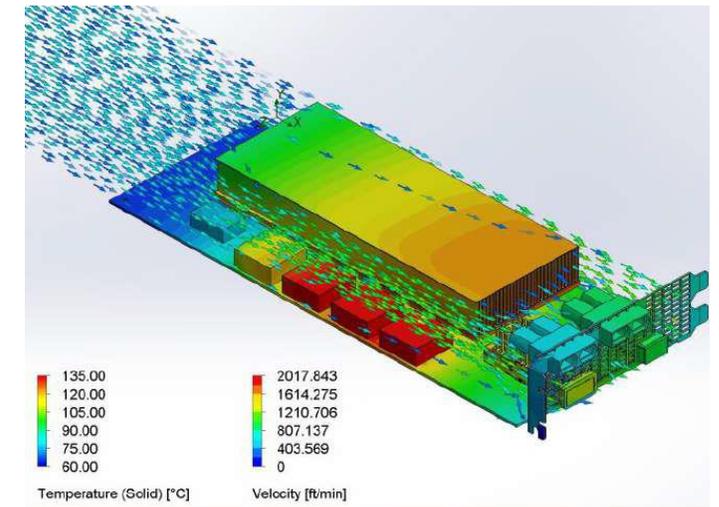
Quelques exemples



Structure  
+ Fluide



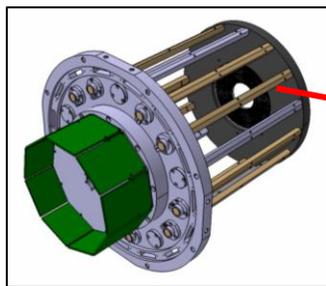
Refroidissement de carte électronique par convection forcée



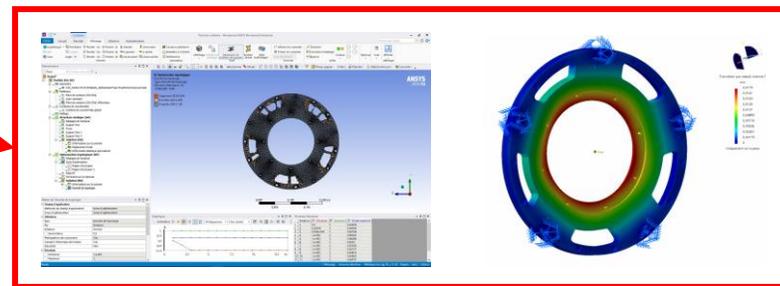
Thermique  
+ Fluide

### Optimisation topologique

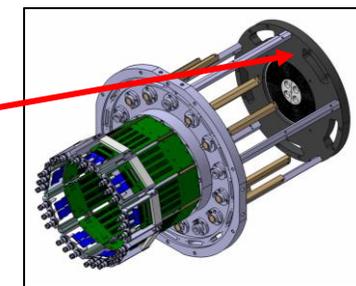
Méthode qui permet de trouver la répartition de matière optimale dans un volume donné soumis à des contraintes.



Plaque carbone (pleine) soumise à la force exercée par les fils (36Kg)



Optimisation topologique sur le logiciel ANSYS



Plaque carbone (évidée)

### Facteur de sécurité

La simulation numérique n'est qu'une approximation de la réalité. Nécessité de prendre en compte des facteurs de sécurité liés au modèle :

- Simplifications géométriques + type de modèle : poutre, coque, solide...
- Type, finesse et singularités du maillage
- Hypothèse sur les conditions limites, idéalisation
- Post-traitement : valeurs calculées (ponctuelles, intégrées, moyennes ...)

Marge de sécurité :  $MoS = \frac{\text{valeur limite}}{\text{valeur calculée} \times K \times Cs} - 1 \geq 0$       avec : -  $K$  : Facteur de sécurité propre au modèle E.F.  
 -  $Cs$  : coefficient de sécurité général de conception

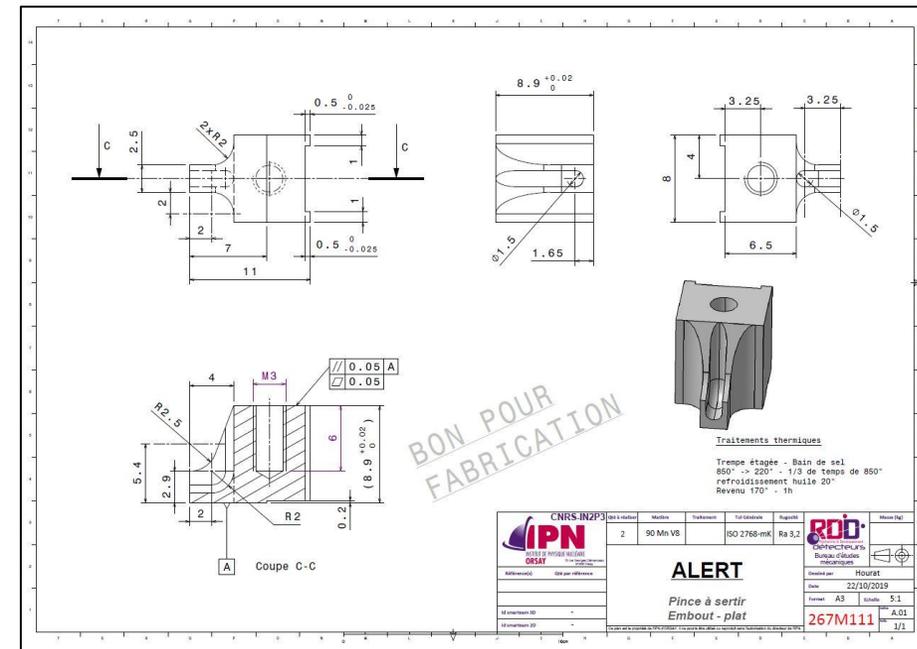
Coefficient de sécurité $Cs$	Charges exercées sur la structure	Contraintes dans la structure	Comportement du matériau
$1 \leq Cs \leq 2$	régulières et connues	connues	testé et connu
$2 \leq Cs \leq 3$	régulières et assez bien connues	assez bien connues	testé et connu moyennement
$3 \leq Cs \leq 4$	moyennement connues	moyennement connues	non testé
	mal connues ou incertaines	mal connues ou incertaines	connu

## La mise en plan

La mise en plan intervient avant le processus d'usinage. Elle consiste en l'établissement d'un dessin destiné à énumérer toutes les spécificités techniques d'une pièce à réaliser. Elle intervient lors de la phase de conception, afin de définir aux mieux les attentes du concepteur. Toute l'équipe de techniciens peut échanger en ayant les mêmes informations et communique à l'aide d'un même langage technique.

### Plan:

- Plusieurs vues 2D
- Vue 3D
- Données métriques et tolérances
- Matières
- Finitions choisies
- Quantité



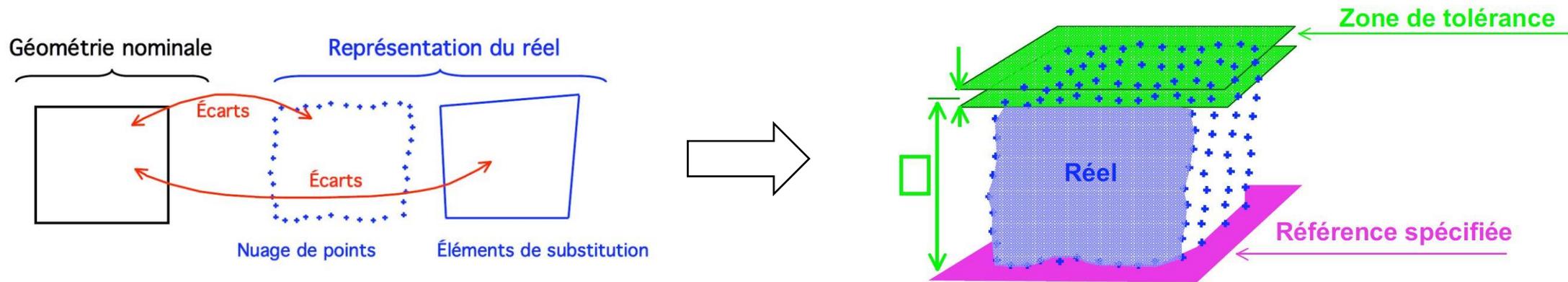
Ensemble de plan 2D

## Tolérancement dimensionnel et géométrique

Spécifier les limites de variation des écarts entre la géométrie nominale et une représentation du réel.

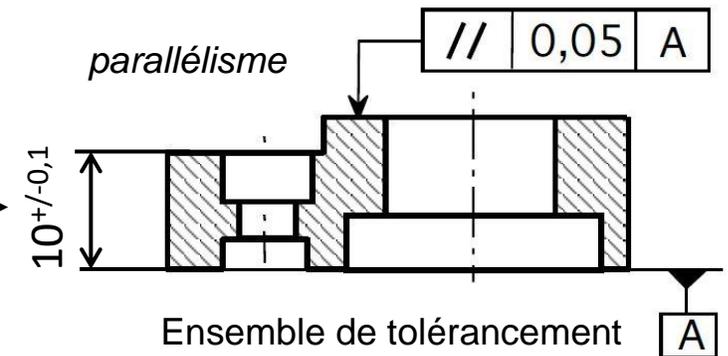
Normes: 8015 – 5459 – 2692 – 1460-2 et tolérance générale ISO 2768

### □ Représentation visuelle:



### □ Tolérances:

- Dimensionnelles: Longueurs et Angles
- Géométriques: Forme (rectitude, circularité, planéité, cylindricité)  
Orientation (parallélisme, perpendicularité, inclinaison)  
Positon (localisation, concentricité, coaxialité, symétrie)  
Battement (circulaire, total)



## Ajustement

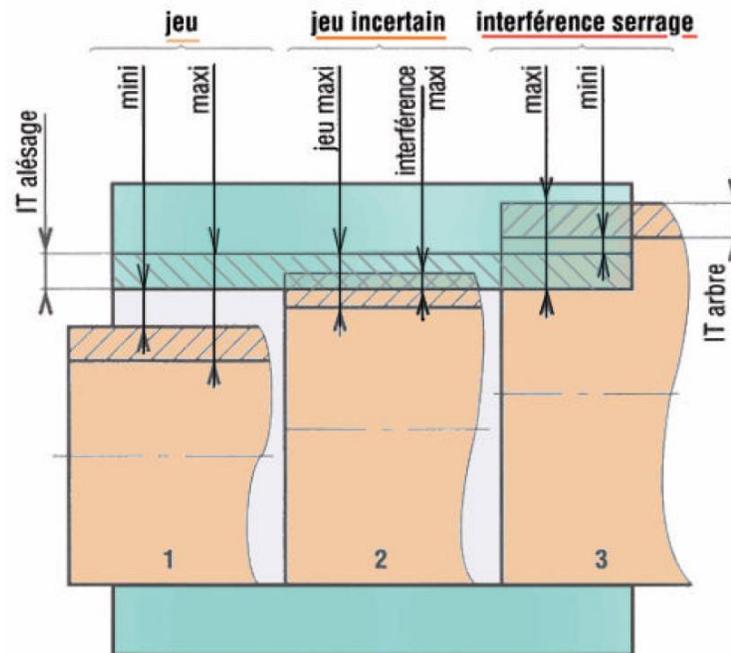
Un ajustement est constitué par l'assemblage de deux pièces de même dimension nominale.

### ☐ Différents types:

- Avec jeu
- Incertain
- Avec serrage

### ☐ Exemple:

- $\Phi 16$  H7/g6
- $\Phi 16$  diamètre nominal
- H7 tolérance sur l'alésage
- g6 tolérance sur l'arbre



Types d'ajustements entre un arbre et un alésage

		Ajustements Usuels (Système de l'alésage H)								
Type	arbre	Alésages						Observations		
		H6	H7	H8	H9	H10	H11			
Pièces mobiles	jeu élevé	c11								Cas usuels de longues portées, mauvais alignement, dilatations...
		c10								
		c9								
	jeu moyen	d9								Cas usuels pour guidages tournants ou glissant avec jeu (bon graissage assuré)
		d8								
		e9								
		e8								
		e7								
	jeu faible	f8								pour guidages précis
		f7								
Pièces immobiles	ajusté	f6								assemblage possible à la main
		g6								
		g5								
	jeu incertain	h9								assemblage possible à la main
		h7								
		h6								
	peu serré	h5								assemblage possible au "maillet" (Presse recommandée)
		js7								
		js6								
		js5								
serré (interférence)	serré	k6							assemblage à la presse	
		k5								
	serré fort	m7							assemblage à la presse lourde ou par dilatation (frettage)	
		m6								
		n6								
		p6								
		r6								
serré fort	s7							Pour transmission des efforts		
	s6									
		t6						détérioration des pièces au démontage		
		u6								
		x7								

■ cas les plus utilisés ■ cas les plus utilisés (à connaître)

Principaux ajustements

### La fabrication ou réalisation mécanique

Ensemble de techniques visant l'obtention d'une pièce par transformation de matière brute. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication.

#### ❑ Obtention par enlèvement de matière:

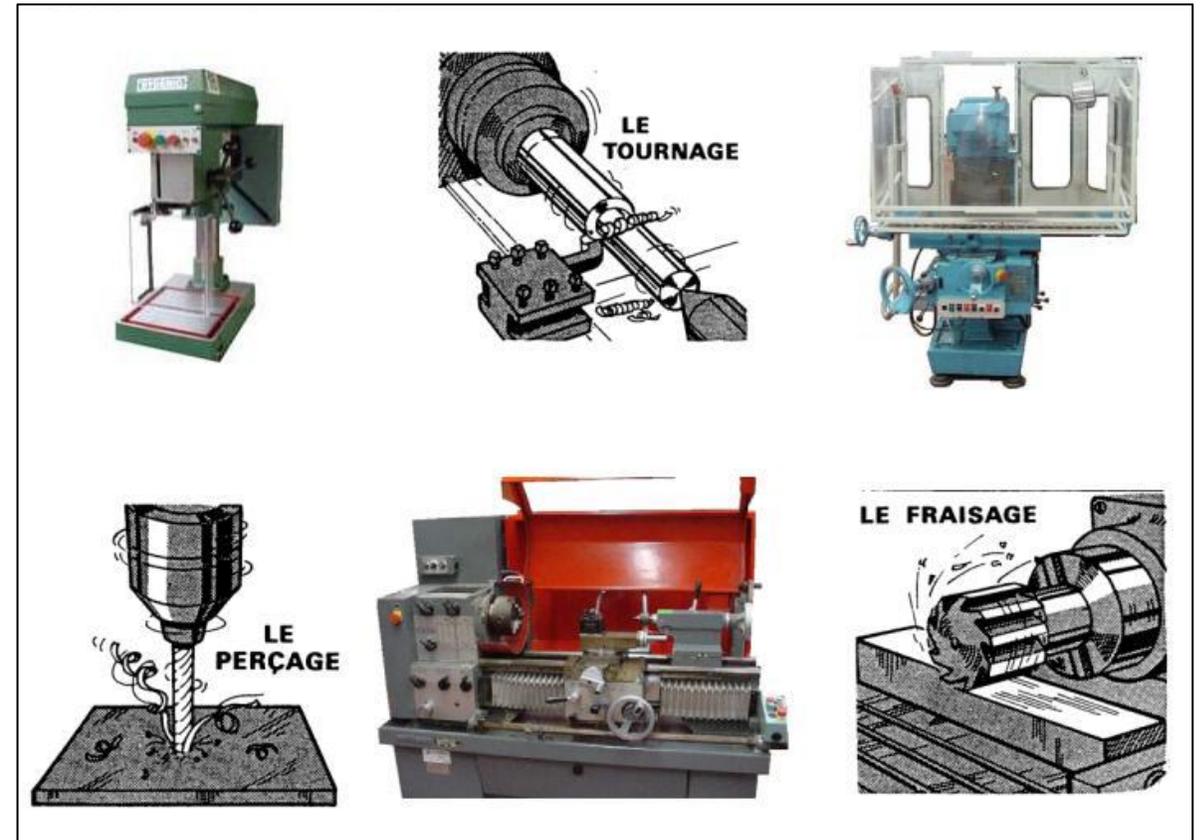
- Perçage, tournage, fraisage
- Rectification ( $\mu\text{m}$ )
- Electroérosion
- Découpage (oxycoupage, jet d'eau, laser, plasma)

#### ❑ Obtention par déformation:

- Emboutissage
- Forgeage

#### ❑ Obtention par fusion:

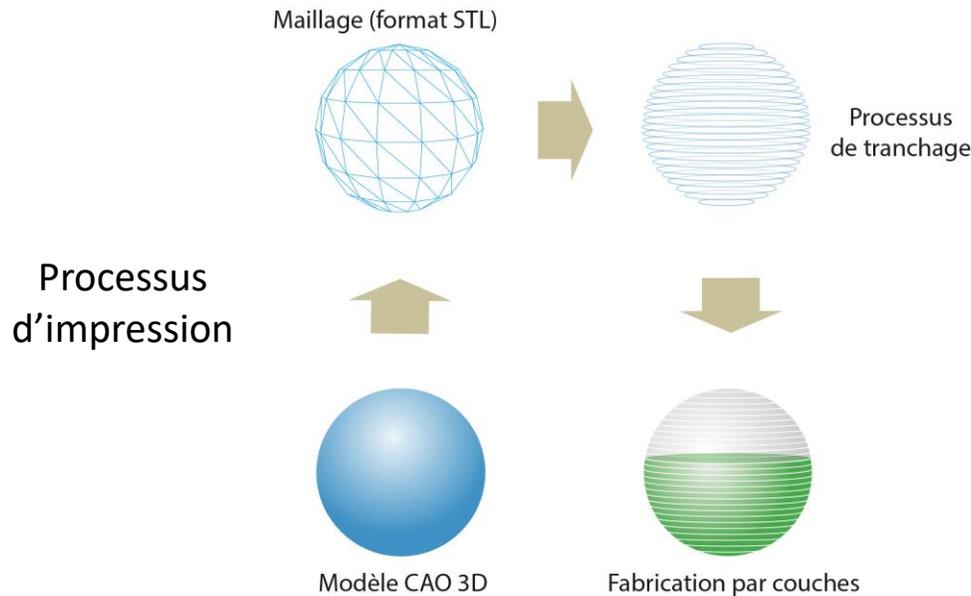
- Frittage (pièce formée par soudure des grains obtenue en chauffant une poudre)
- Moulage



## La fabrication additive (impression 3D)

La fabrication additive désigne l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique.

- Matériaux: métal, polymères, céramique
- Formes: liquides (résine photosensible), poudres, rubans, fils

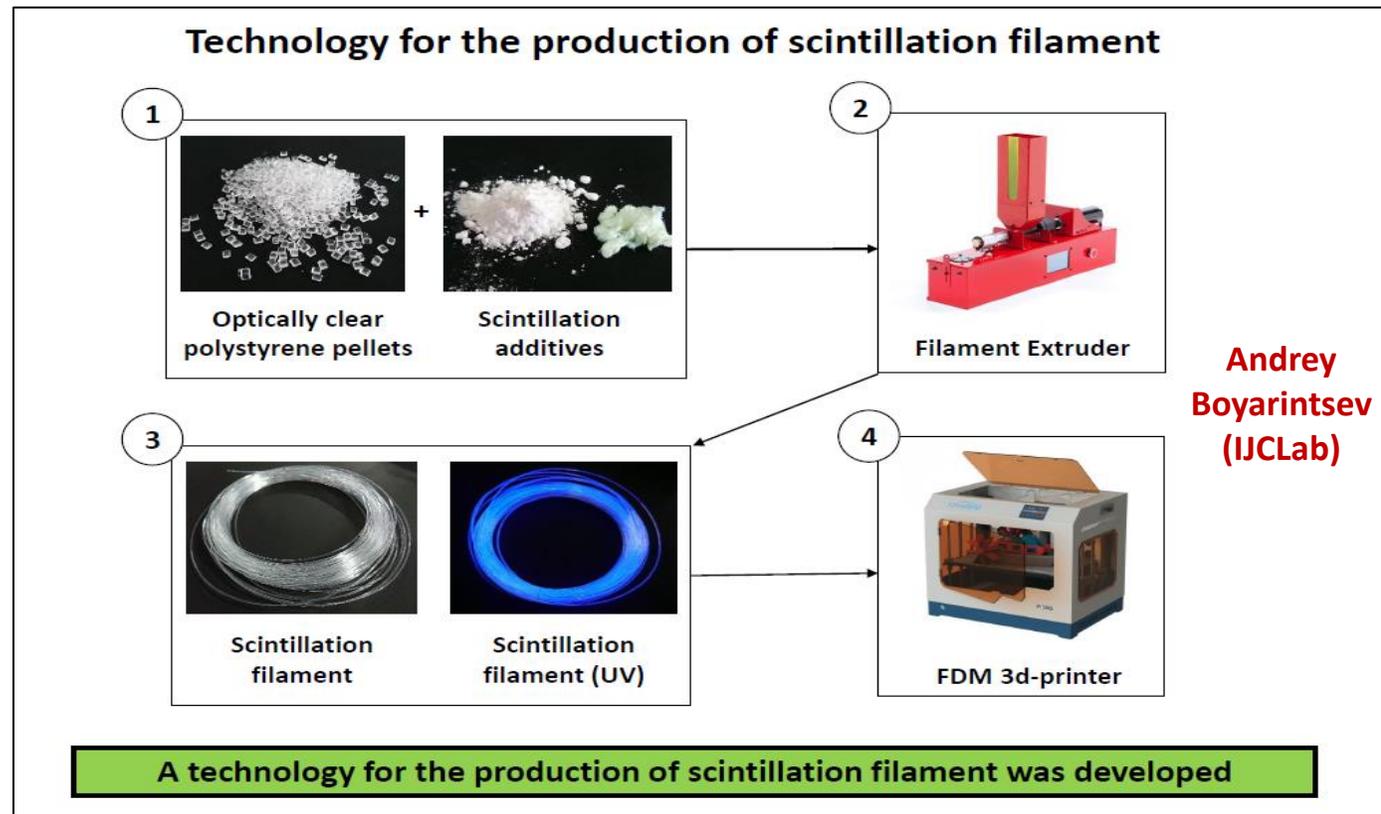


Nom et description succincte du procédé		Matières utilisées *
<b>Extrusion de matière (FDM – Fused Deposition Modeling)</b> Le matériau est distribué de manière sélective par une buse en couches successives. Généralement la buse est dotée d'un système pour chauffer et faire fondre la matière.	<p>Fil plastique Tête extrudeuse Table</p>	Fils plastiques : ABS, PLA, PET, PC, PEEK...
<b>Photopolymérisation en cuve (stéréolithographie – SLA)</b> Un photopolymère liquide est durci de manière sélective par un rayonnement spécifique (LED ou laser généralement).	<p>Rayonnement Table mobile Résine liquide</p>	Photopolymères liquides : acryliques, polyuréthanes, résines epoxy, polyéthylène glycol, glycérol...
<b>Fusion sur lit de poudre (Laser Bed Melting)</b> L'énergie thermique (rayon laser, faisceau d'électrons...) fait fondre de manière sélective le matériau présent sous forme de poudre.	<p>Raclette Laser Couche de poudre ajoutée à chaque passage</p>	Poudres plastiques : polyamides (PA11, PA12, PA6), TPU... Poudres métalliques : titane, nickel, aluminium, inox...
<b>Projection de liant</b> Un produit liquide (une colle) est déposé de manière sélective pour lier le matériau qui est sous forme de poudre. Cette technologie nécessite généralement une deuxième étape, de cuisson pour stabiliser la forme finale de l'objet.	<p>Raclette Liant Couche de poudre ajoutée à chaque passage</p>	Poly(acide acrylique), polyuréthanes, copolymères styrène acrylate, cyanoacrylate de méthyle, polyamides... Poudres métalliques : titane, nickel, aluminium, inox...
<b>Stratification en couches</b> Les couches de matériau sont découpées de manière sélective puis liées pour former l'objet à fabriquer.	<p>Couteau Liant</p>	Feuilles papier ou plastique
<b>Projection de matière</b> Des gouttelettes de matériau sont déposées de manière sélective et solidifiées sous l'action d'une lumière UV.	<p>Multi-jet Lumière UV</p>	Photopolymères liquides : acryliques, polyuréthanes, résines epoxy, polyéthylène glycol, glycérol, silicones, élastomères, cires...
<b>Dépôt de matière sous énergie concentrée</b> La matière est déposée de manière sélective puis est fondue progressivement par un apport d'énergie thermique (rayon laser, faisceau d'électrons...).	<p>Jet de poudre Laser</p>	Poudres plastiques : polyamides (PA11, PA12, PA6), TPU... Poudres ou fils métalliques : titane, nickel, aluminium, inox...

© Illustrations : A. Vilcoq pour l'INRS

### La fabrication additive pour la détection

Des études sont actuellement en cours pour l'utilisation de la fabrication additive pour les matériaux scintillants

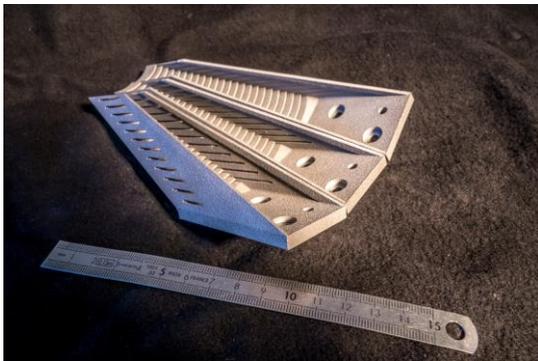


<https://reseaufabricationadditive.wordpress.com/thematiques/scintillateur-par-impression-3d/>

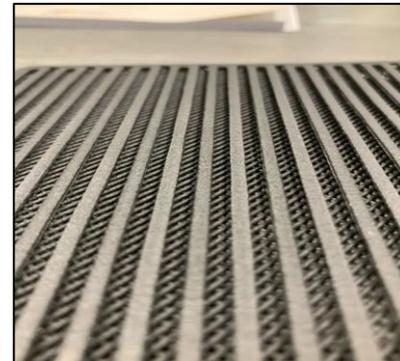
### La fabrication additive dans les laboratoires

- Technologie d'avenir
- La plupart des laboratoires IN2P3 sont équipés en imprimantes 3D plastique
- Permet des conceptions mécaniques jusqu'alors inenvisageables
- Equipement récent d'une imprimante 3D métal à l'IPHC (Strasbourg) par un financement IN2P3
- Le coût pour la fabrication additive métal reste cependant très onéreux, lourd en infrastructure et nécessite de la formation
- Très utilisé pour le prototypage
- Attention cependant à ne pas délaisser les méthodes de fabrication traditionnelle (état de surface, précision)

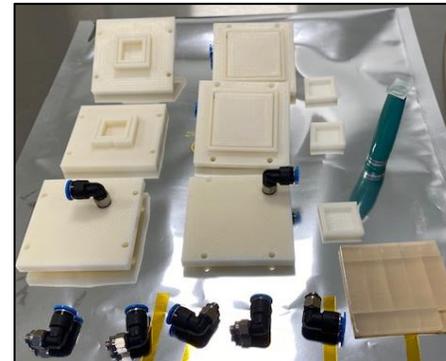
Réseau Fabrication Additive du CNRS:  
<https://reseaufabricationadditive.wordpress.com/>



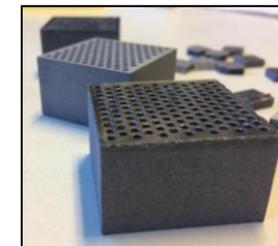
Prototype pour ALERT -  
Aluminium



Cathode pour Dune –  
Peek/Carbone



ATLAS-ITk (pixels)  
Pièces ABS

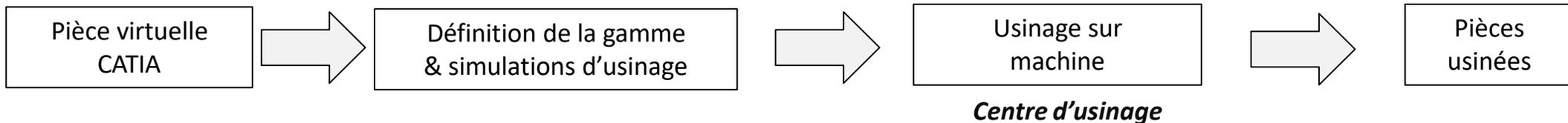
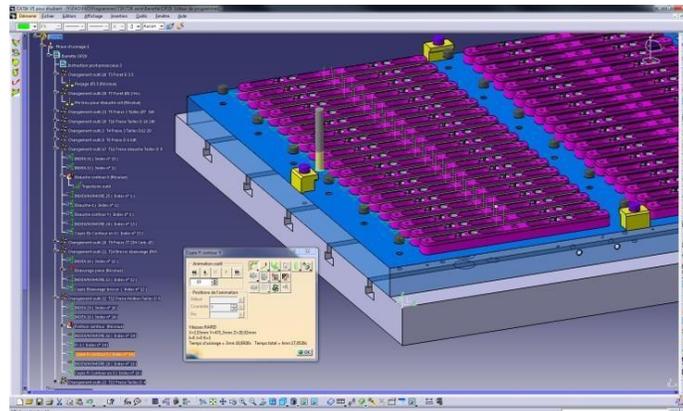
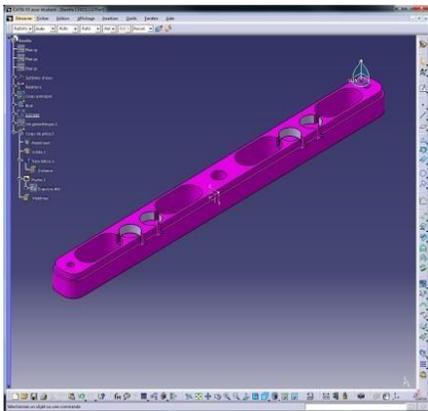


THIDOS (application médicale) W et ABS

### La Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO)

La Fabrication Assistée par Ordinateur est un ensemble d'outils informatiques permettant de coder le processus de fabrication. Elle est utilisée pour créer des instructions précises à destination des machines-outils à commandes numériques afin d'optimiser la fabrication de pièces. Le fichier créé va permettre à la machine-outil d'exécuter avec précision les contours de la pièce à fabriquer.

Fabrication possible en interne dans les laboratoires IN2P3 (en fonction des moyens technique et humains) et en sous-traitance.



### La Fabrication mécanique dans les laboratoires

Quelques exemples de réalisation



Usinage cube aluminium



Ensemble dérouleur de bande



Enceinte plastique



Plaque de refroidissement cuivre

### La Fabrication mécanique dans les laboratoires

Quelques exemples de réalisation



Usinage sur centre d'usinage 3 (+1) axes pour l'expérience BEDO (atelier d'Orsay)

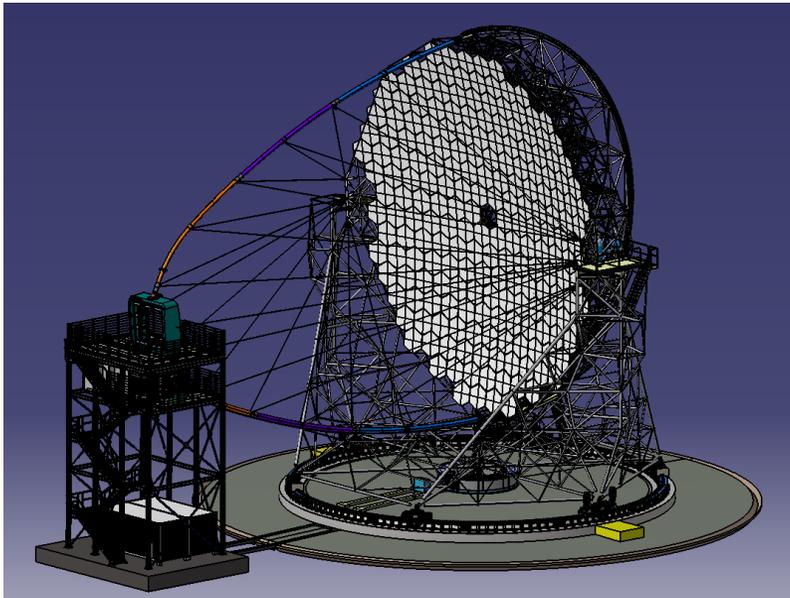


Châssis en aluminium soudé pour le chargeur de filtre de LSST

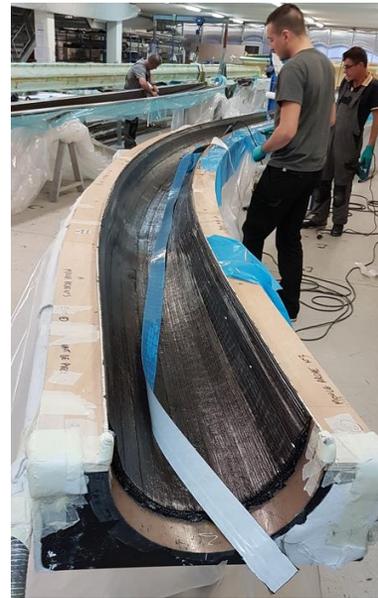
### Exemple de fabrication dans l'industrie

Pièces dépassant les capacités techniques des laboratoires

Nécessite un travail de suivi de fabrication



Structure support caméra de CTA



Drapage des plis de carbone



Montage à blanc de l'arche

### La métrologie (en lien avec le tolérancement)

#### □ Définition:

La métrologie est la science de la mesure. Le terme désigne également l'ensemble des technologies de mesure.

La mesure correspond à l'évaluation d'une grandeur par rapport à une référence (étalon) ainsi que la détermination de l'incertitude liée à cette mesure

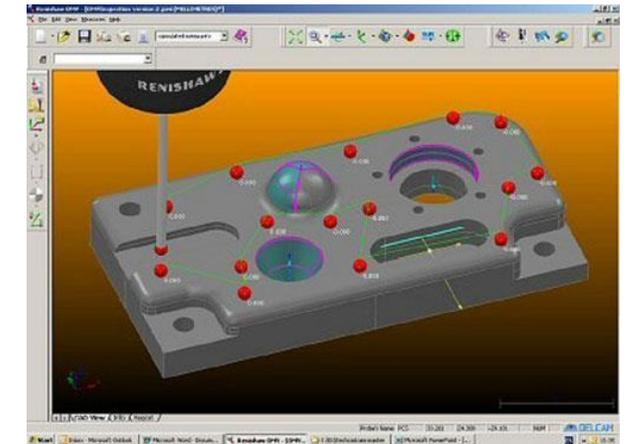
#### □ Métrologie dimensionnelle et géométrique:

- **Spécifications dimensionnelles et angulaires** (longueurs, angles)
- **Spécifications géométriques** (formes, orientation, position...)

#### □ Choix de l'instrument de mesure:

- Règlet : Précision de mesure entre  $\pm 1$  et  $\pm 0,5$  mm
- Pied à coulisse : Précision de mesure  $\pm 0,02$  mm
- Micromètre: Précision de mesure de l'ordre  $\pm 0,01$  mm
- Tridimensionnelle: Précision de mesure de l'ordre  $< 10 \mu\text{m}$  (dépend du nb de pts de mesure)

- **Exemple:** Longueur de 10mm (+/-0,1 en tolérance), on mesure une côte de 10,07mm à l'instrument (pièce bonne)

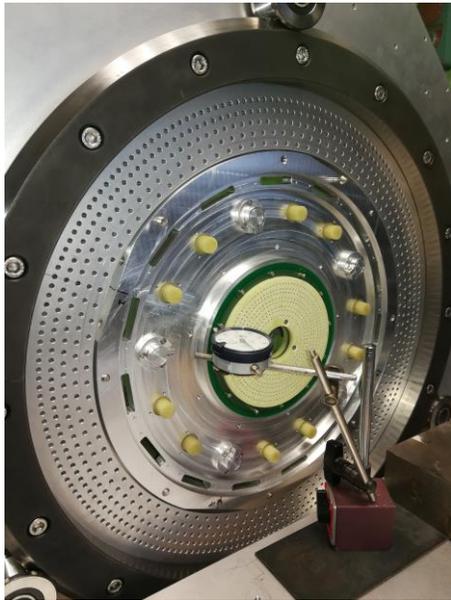


Points de mesure sur une pièce

### La mesure d'ensemble de détection

La mesure se réalise sur des éléments mécaniques assemblés.

On utilise des instruments de mesures portatifs (réglet, pied à coulisse, jauge de profondeur ...), sur marbre (colonne de mesure, comparateur...) et des machines de mesure tridimensionnelle.



Mesure coaxialité (diamètre)  
structure détecteur gazeux ALERT



Mesure de la géométrie  
(longueur) des cristaux CMS



Mesure de la géométrie d'une structure  
composite sur machine tridimensionnelle

### Exemple de contrôle de pièces sur le projet Xenon

- Usinage d'électrodes
- Contrôle après réception à l'aide d'un bras Romer
- Création d'un modèle CAO issu des valeurs réelle mesurée
- Remodélisation de l'électrode avec prise en compte des erreurs liées à la fabrication



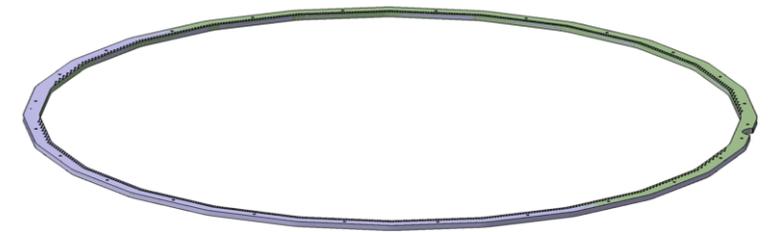
Electrode usinée



Bras de mesure



Mesure bras Romer

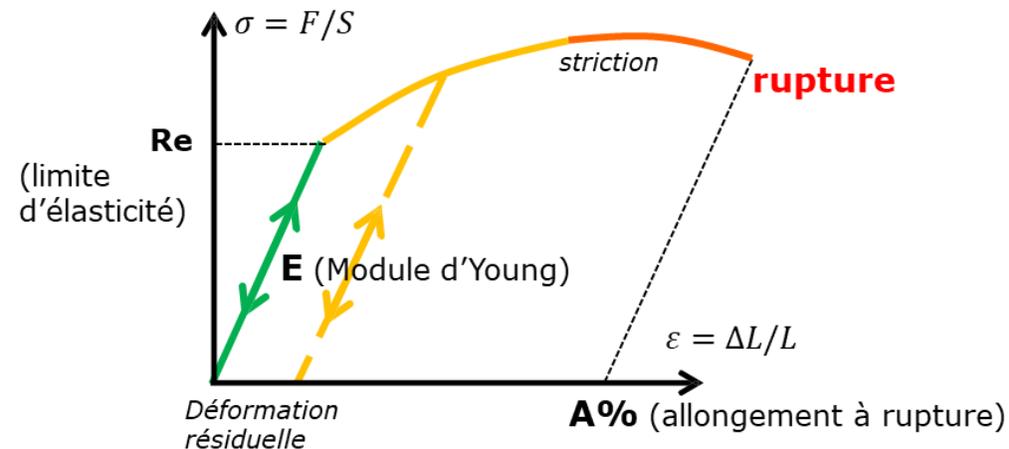
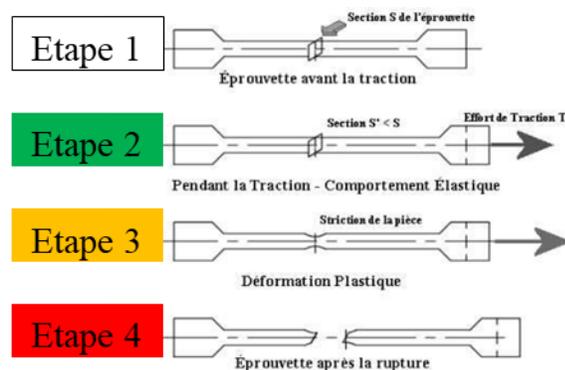


Export fichier CAO

### Les essais mécaniques

C'est une partie intégrante de la réalisation mécanique, ces essais interviennent à différentes étapes. Ils peuvent être longs, complexes et coûteux car ils nécessitent du matériel particulier (mesure de traction) que les laboratoires ne peuvent pas toujours financer.

- ❑ **AMONT**: Détermination ou confirmation des caractéristiques mécaniques ou thermiques des matériaux utilisés (module d'Young  $E$ , limite élastique  $Re$ , coef de poisson, conductivité,...). Ces essais sont utiles pour obtenir des valeurs plus réalistes à incorporer dans les modèles numériques E.F.



*La loi de comportement établit une relation entre les contraintes (pression=force/surface) et les déformations (allongement unitaire adimensionnel).*

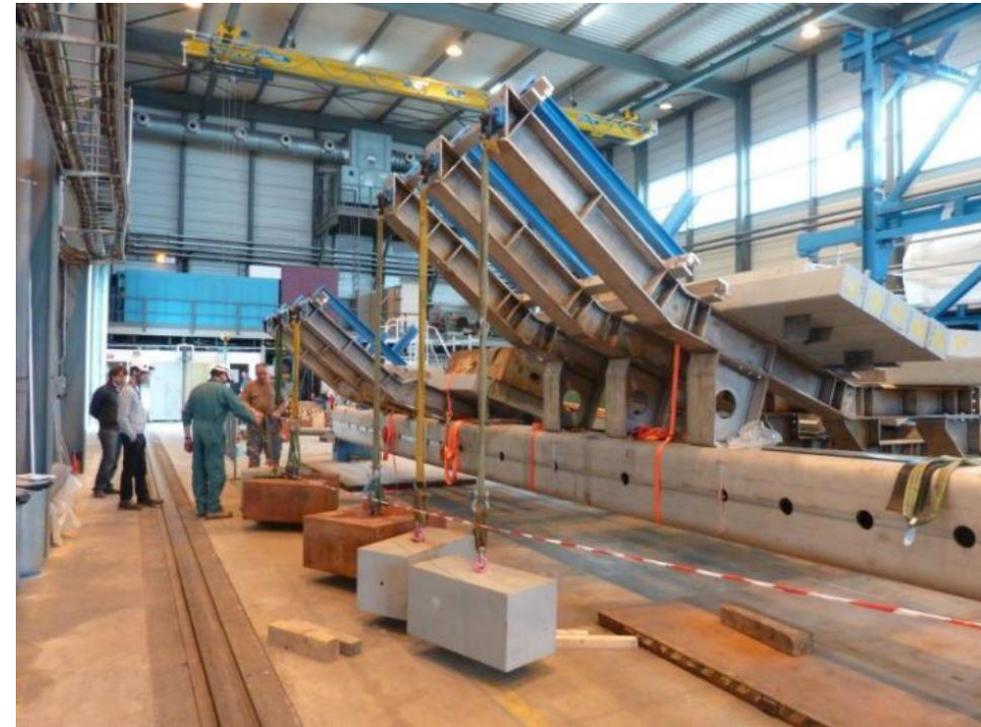
- ❑ **AVAL**: Validation ou qualification du comportement d'un modèle de test sous certaines sollicitations (statiques, thermiques, vibrations, fatigues). Essais de qualification en dynamique, thermomécanique et en vibration

### Essai de qualification sous charge

- Vérification des deux rails, charges de test de 136 Tonnes, déformation verticale de 46 mm
- Test de la structure porteuse, 12 m, charge de test de 85 Tonnes, déformation verticale de 73,5 mm



Rails calorimètre ALICE



Structure porteuse calorimètre ALICE

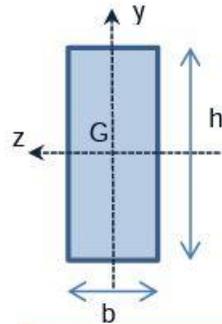
## Résistance des matériaux / Moment quadratique (m<sup>4</sup>)

Le moment quadratique est une grandeur qui mesure la capacité d'une section transversale de poutre à résister à la flexion

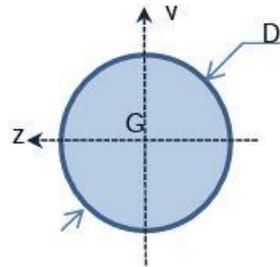
Le moment quadratique est une mesure de la répartition de la matière de la poutre autour de son axe de flexion  
Plus cette matière est éloignée de l'axe de flexion, plus le moment quadratique est grand.

Le moment quadratique est souvent utilisé dans les calculs de contraintes et de déformations dans les poutres soumises à la flexion, car il permet de déterminer la résistance de la section transversale de la poutre à la flexion en fonction de sa géométrie.

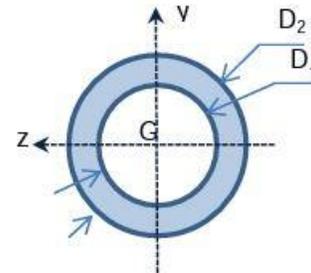
Plus le moment quadratique est grand, plus la section transversale de la poutre est capable de résister à la flexion.



$$I_{Gz} = \frac{b \cdot h^3}{12}$$



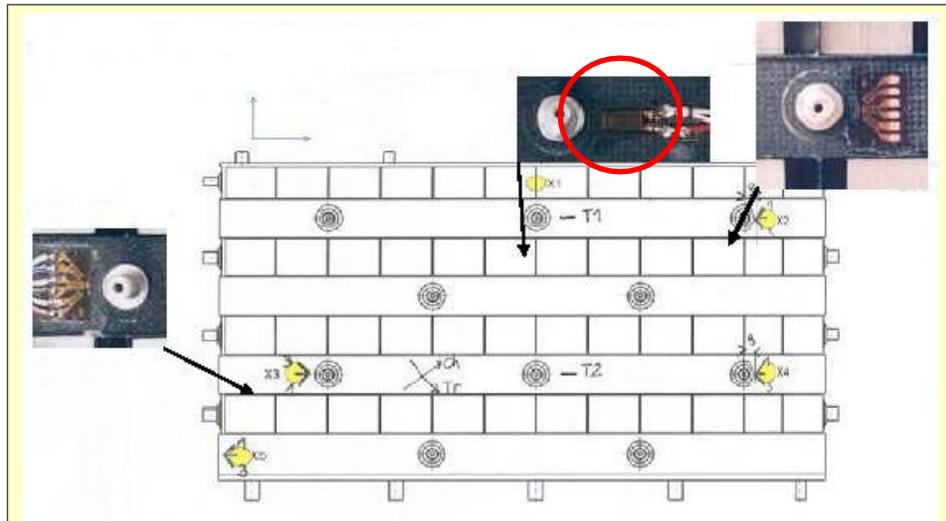
$$I_{Gz} = \frac{\pi \cdot D^4}{64}$$



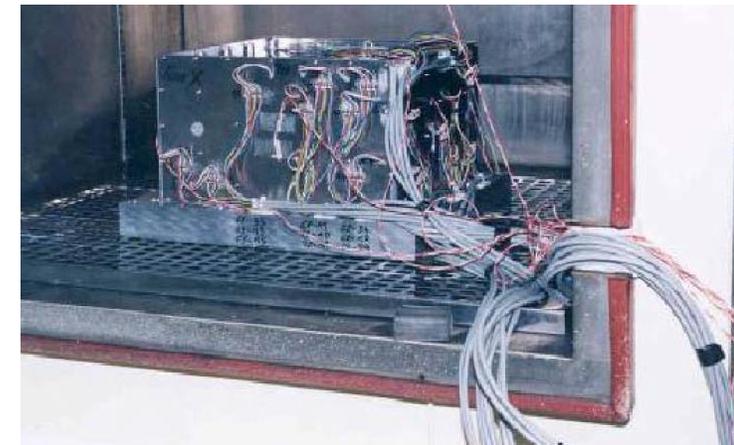
$$I_{Gz} = \frac{\pi \cdot (D_2^4 - D_1^4)}{64}$$

## Essai de qualification thermomécanique

- 43 Cycles thermiques entre  $-45^{\circ}\text{C}$  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	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\pm 2xS_{\sigma}$ (MPa)
Top Face	50	2
Cells wall	20	8
Inserts face X	33	5
Inserts face Y	34	4

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

## 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.

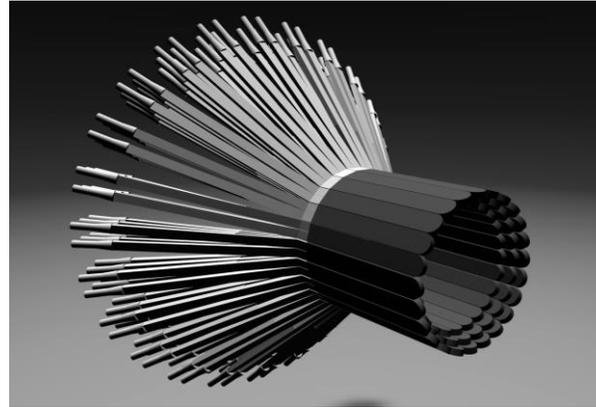
Le montage mécanique requiert très souvent des reprises d'usinages et des ajustements particuliers.

## 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



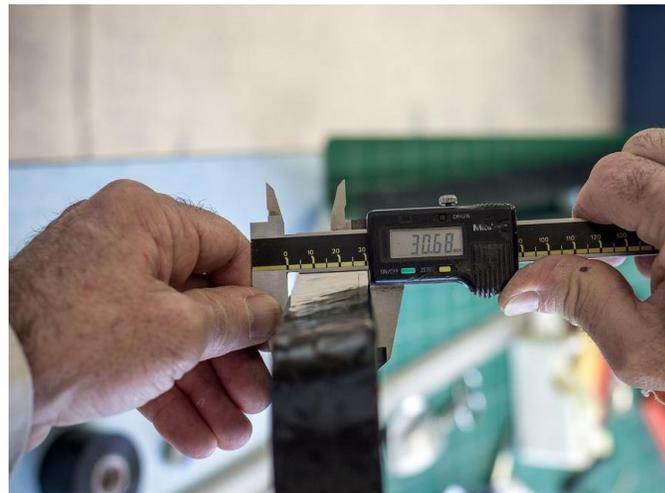
Collage manuel et avec outil

### 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

## Thermodynamique

### Introduction

La thermodynamique est une branche de la physique qui étudie les transferts d'énergie et les transformations des systèmes physiques.

### Concepts Fondamentaux

- ❑ Énergie : Capacité d'un système à effectuer un travail, se manifestant sous différentes formes telles que thermique, cinétique, potentielle, etc.
- ❑ Système : Partie de l'univers étudiée, entourée par ses frontières, avec le reste de l'univers considéré comme son environnement.
- ❑ Lois de la thermodynamique : Ensemble de principes fondamentaux régissant les processus thermodynamiques.

### Lois de la Thermodynamique

- ❑ Première loi : Conservation de l'énergie L'énergie totale d'un système isolé reste constante.
- ❑ Deuxième loi : Entropie  $\Delta S \geq 0$ . L'entropie d'un système isolé tend à augmenter avec le temps.
- ❑ Troisième loi : Zéro absolu Il est impossible d'atteindre la  $T^\circ$  de zéro absolu par un processus fini en un nombre fini d'étapes.

Entropie  $\rightarrow$  Vision macro/thermodynamique ( $\Delta S = Q/T$ ) et vision micro/statistique ( $S = k_B \ln \Omega$ )

### Applications

Utilisée dans divers domaines, tels que la thermodynamique chimique, l'ingénierie des procédés, la climatologie, etc.

Applications pratiques incluent les moteurs thermiques, les réfrigérateurs, les turbines à vapeur, etc.

### Conclusion

La thermodynamique fournit un cadre essentiel pour comprendre les processus énergétiques dans la nature et dans les systèmes artificiels, et elle est fondamentale dans de nombreux domaines de la science et de l'ingénierie.

## Thermique

La thermique est une application directe de la thermodynamique. La thermique se concentre spécifiquement sur les processus thermiques et la manière dont la chaleur est transférée, stockée, et utilisée dans divers systèmes.

### **Energie thermique : interne au système et lié à la température (unité J)**

L'énergie thermique est une forme d'énergie qui correspond à l'énergie cinétique de l'agitation des particules dans un système. Plus précisément, elle représente l'énergie de mouvement et de vibration des atomes, des molécules et des ions dans un matériau ou un système.

L'énergie thermique est transférée entre les systèmes en raison d'une différence de température, et elle peut être convertie en d'autres formes d'énergie, telles que l'énergie mécanique, électrique ou chimique.

En outre, l'énergie thermique peut être mesurée en utilisant la chaleur spécifique, qui est la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter d'une unité la température d'une certaine quantité de matériau. Par exemple, pour augmenter la température de l'eau de 1 degré Celsius, il faut lui fournir une certaine quantité d'énergie thermique, qui dépend de sa masse et de sa chaleur spécifique.

### **Température : mesure (unités °C ou K)**

La température est une mesure de l'agitation thermique des molécules dans un corps ou un système. Plus les molécules sont agitées, plus la température est élevée. Par exemple, l'eau bouillante a une température de 100°C, ce qui signifie que les molécules d'eau sont très agitées.

## Thermique (Fourier)

*Équation de la chaleur*

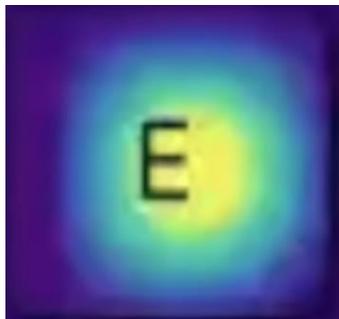
$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$



La vitesse d'évolution  
de la chaleur du  
système dans le temps

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \alpha \nabla^2 u = 0$$

La moyenne de la chaleur  
autour du système



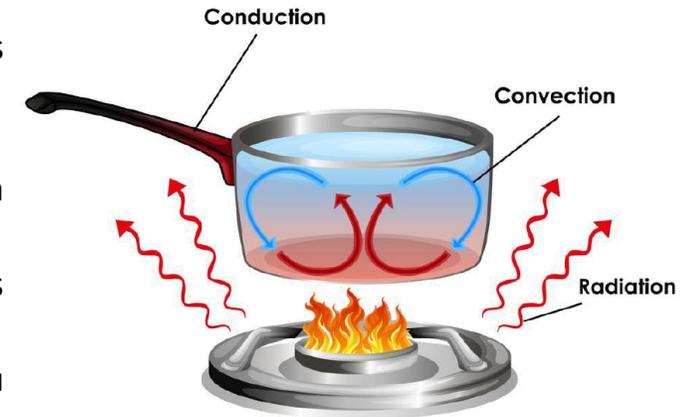
Si le point jaune n'est entouré que de bleu  
Alors la température va rapidement diminuer, le transfert va se faire plus vite

Un point très éloigné de la moyenne va refroidir très vite

## Thermique

### **Modes de transfert d'énergie thermique : permet le transfert de l'énergie (unité W)**

- La conduction thermique : transfert d'énergie thermique entre deux corps en contact physique direct, sans mouvement macroscopique de matière
- La convection thermique : transfert d'énergie thermique par le mouvement de fluides, comme l'air ou l'eau
- Le rayonnement thermique : transfert d'énergie thermique par les ondes électromagnétiques, comme la lumière, les infrarouges ou les ultraviolets.
- La diffusion thermique : transfert d'énergie thermique par les mouvements aléatoires des particules dans un milieu, comme les gaz ou les liquides.
- L'effet Joule : dissipation d'énergie électrique en chaleur lorsqu'un courant électrique traverse un matériau conducteur.



### **Chaleur : énergie transférée entre deux systèmes (unité J ou cal)**

La chaleur est l'énergie qui est transférée d'un système à un autre en raison d'une différence de température. Lorsqu'un corps chaud est en contact avec un corps froid, de la chaleur est transférée du corps chaud vers le corps froid, jusqu'à ce que les deux corps atteignent une température égale. La chaleur peut être transférée par conduction, convection et rayonnement.

### **Thermalisation :**

La thermalisation est le processus par lequel un système évolue vers un état thermodynamique d'équilibre, elle conduit à l'égalisation des températures. Ce processus peut se produire par la conduction, la convection, le rayonnement ou d'autres mécanismes de transfert d'énergie.

## Collage de sondes thermiques, assemblage de cristaux et montage mécanique

Calorimètre NPS (Jefferson Laboratory)  
1000 modules avec cristaux PbWO



Collage des sondes de température



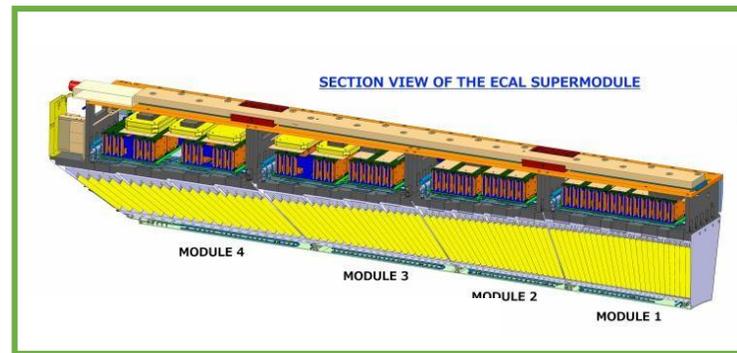
Mise en place des cristaux un par un



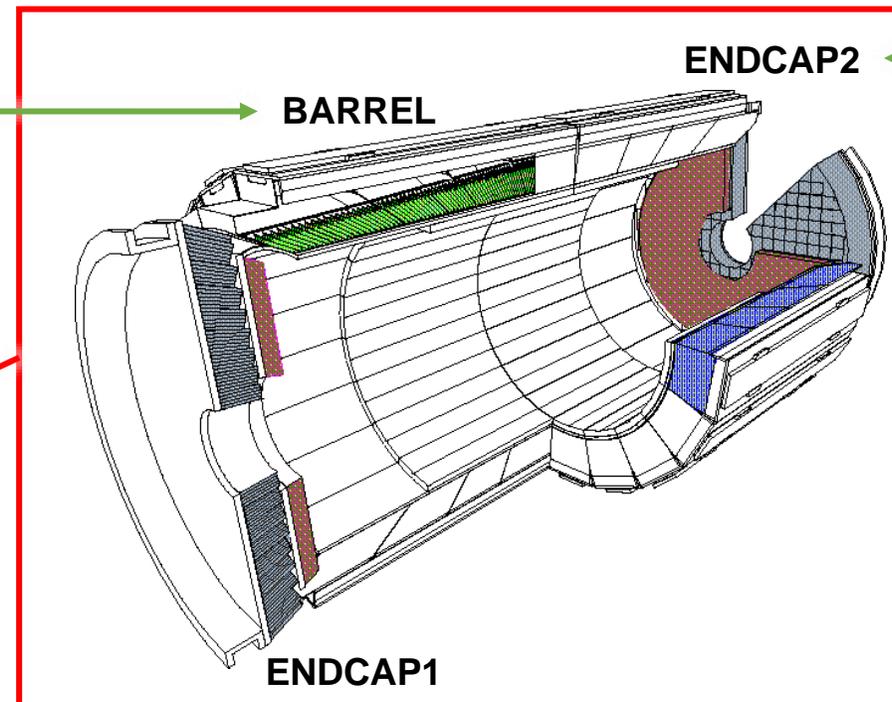
Intégration mécanique complète en atelier

## Intégration du calorimètre électromagnétique de CMS au CERN

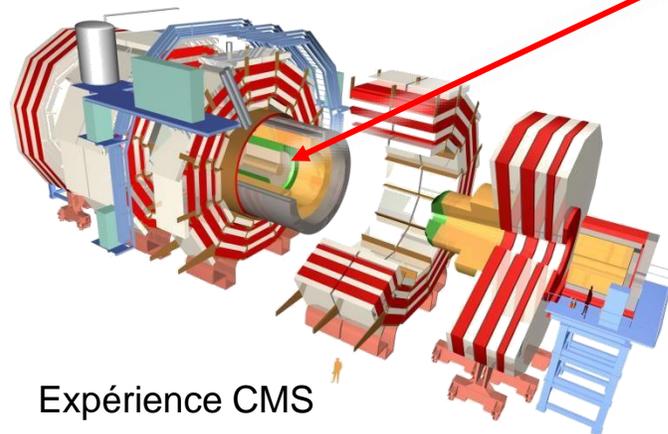
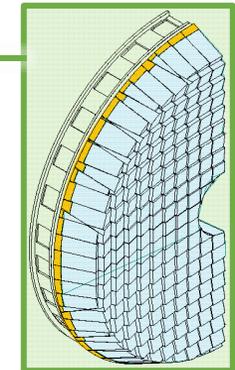
76000 cristaux scintillateurs de PbWO<sub>4</sub>, 100 Tonnes, 6 m de long x 60 cm de large



Un supermodule du BARREL

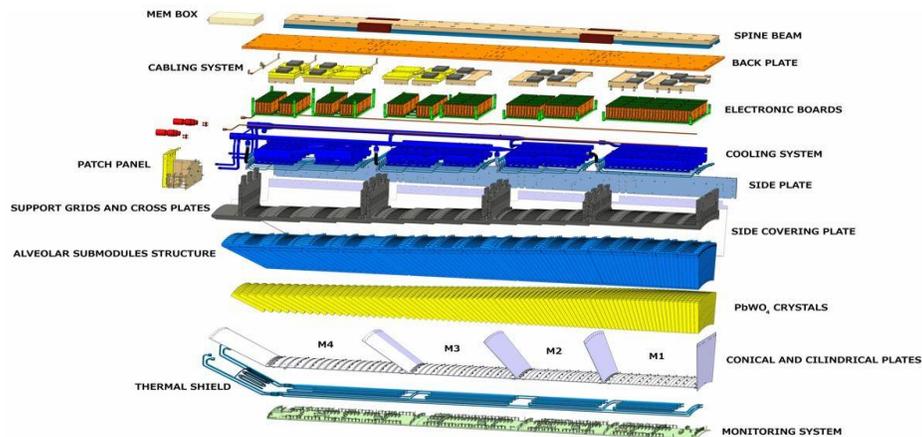
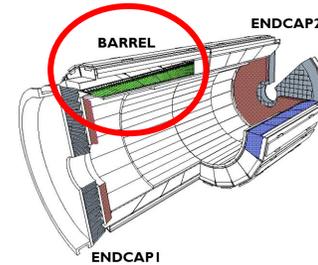


Composition du calorimètre



## Intégration du calorimètre électromagnétique de CMS au CERN

BARREL, Supermodule ECAL (1700 cristaux)

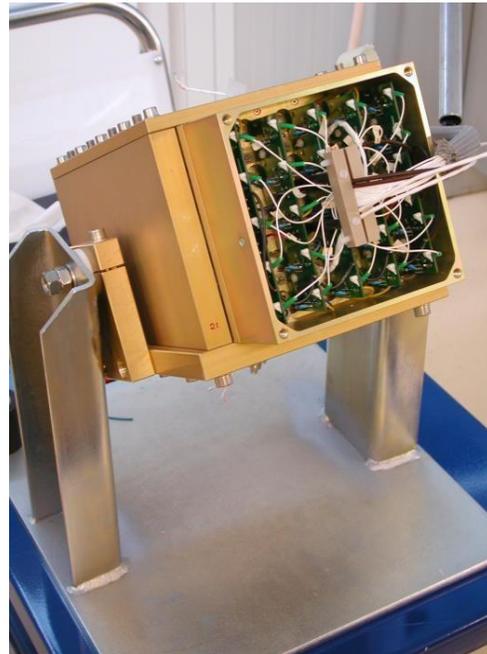
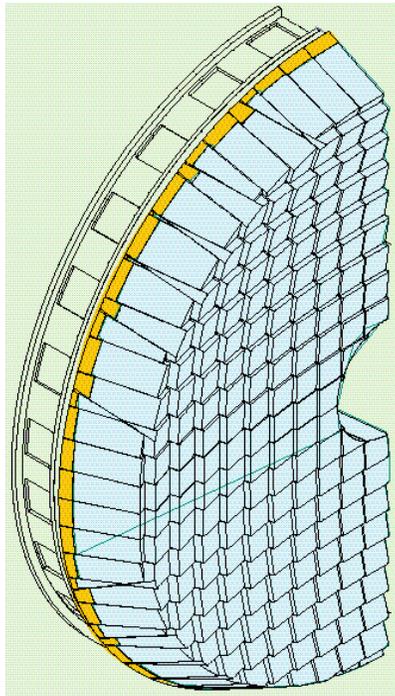
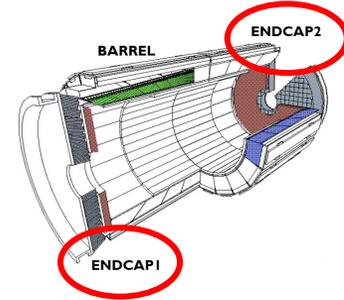


**Cristaux**  
**Mécanique**  
**Composite**  
**Electronique**  
**Refroidissement**  
**Thermique**  
**Monitoring**



## Intégration du calorimètre électromagnétique de CMS au CERN

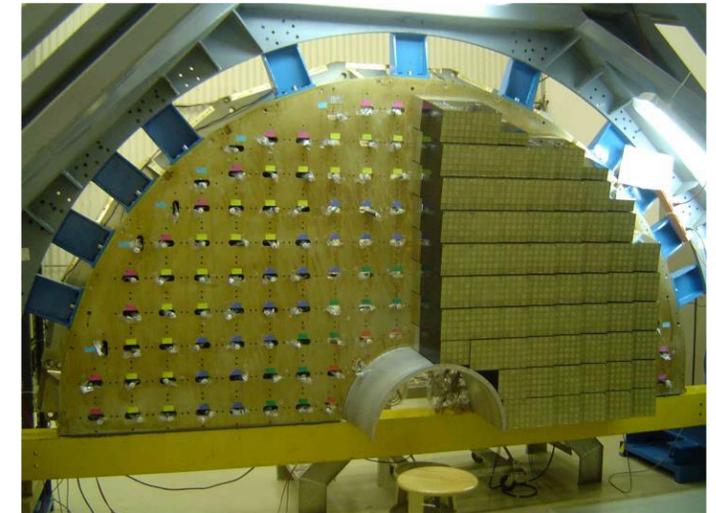
ENDCAP, bouchon (3662 cristaux)



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



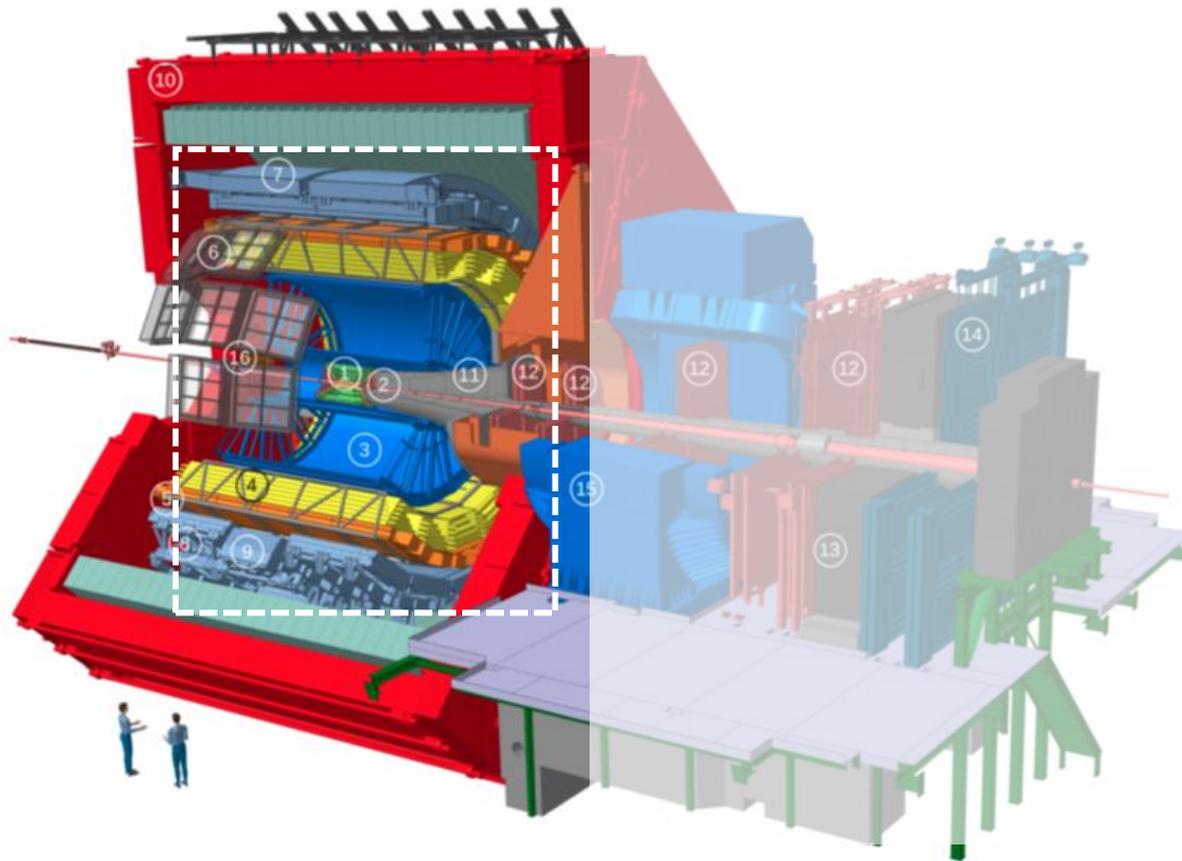
Ajustement mécanique des alvéoles



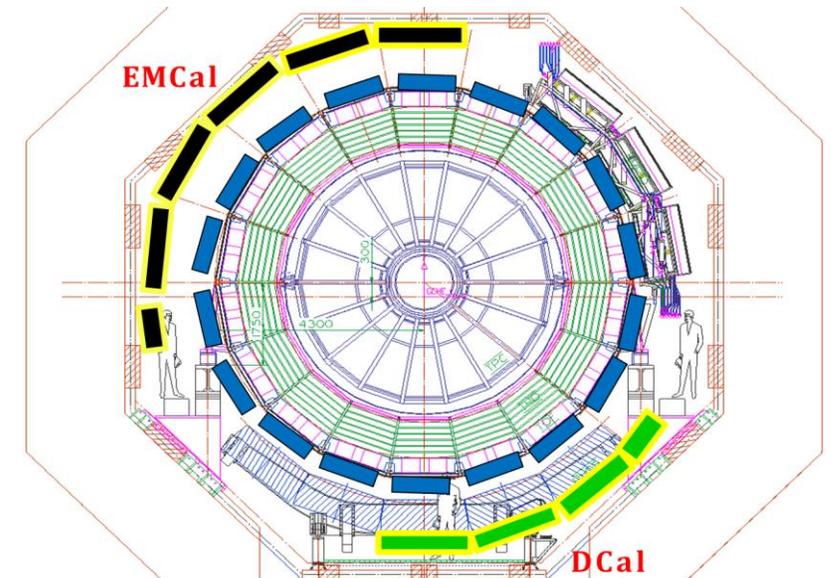
Assemblage un par des alvéoles

## Intégration des calorimètres EMCal et DCal d'Alice (CERN)

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



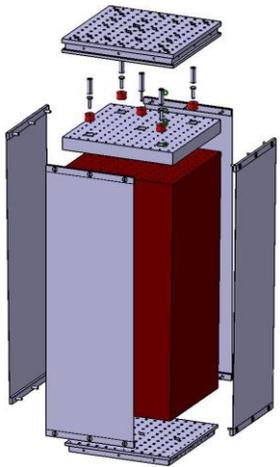
Expérience ALICE



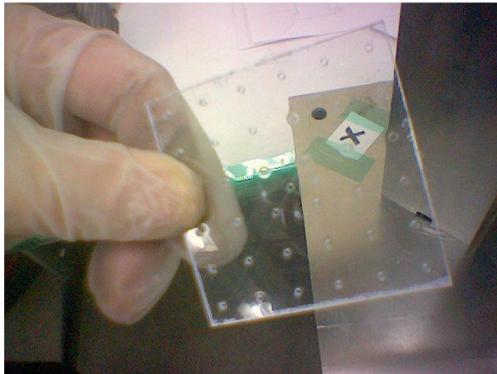
Les deux calorimètres  
EMCal et DCal

## Intégration des calorimètres EMCal et DCal d'Alice (CERN)

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



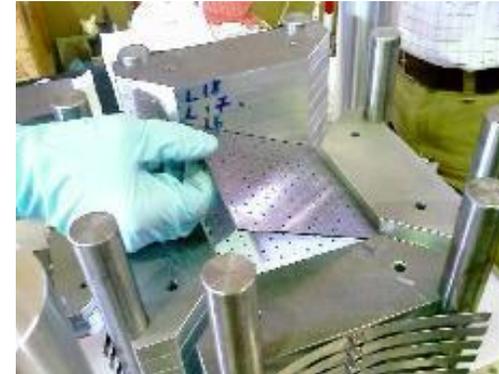
Modèle CAO



Plaque scintillateur



Plaque de Plomb



Assemblage une par une  
alternativement



Module assemblé



Assemblage des modules en  
Stripmodule

## Intégration des calorimètres EMCal et DCal 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

## Plans de détection d'une chambre à fils

Chambre à fils

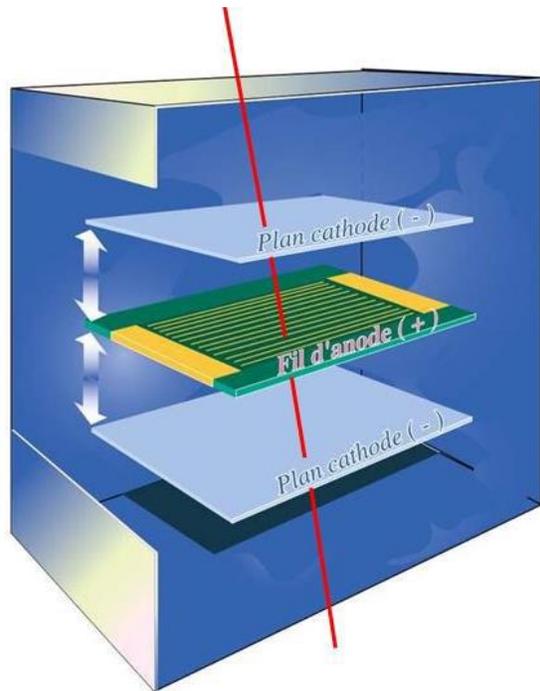
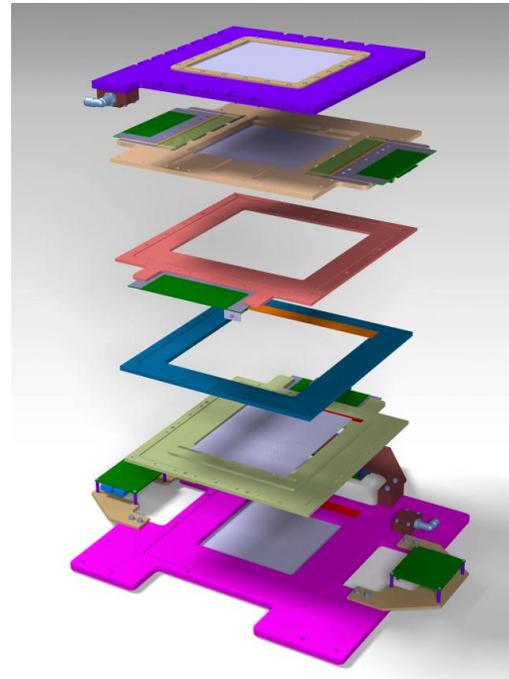
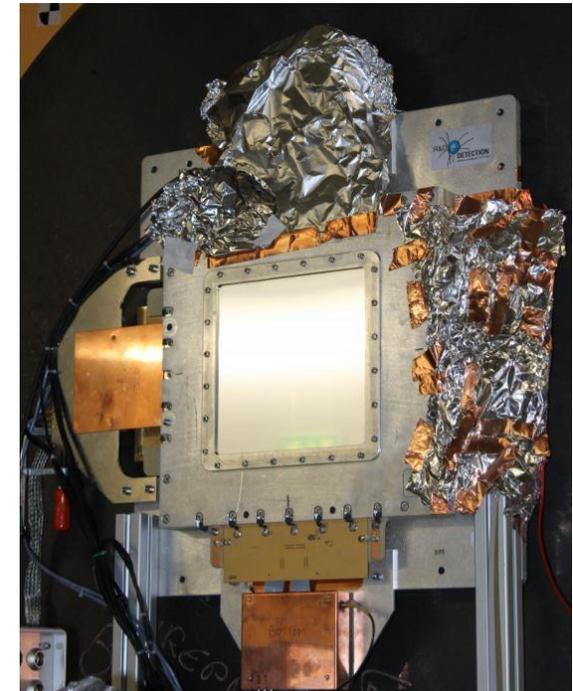


Schéma de principe



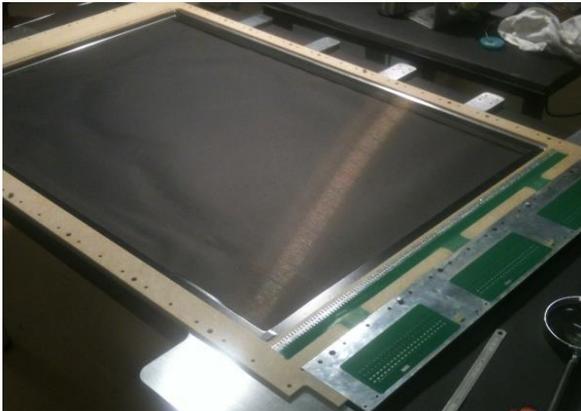
Vue éclatée des différents plans



Chambre SOFIA (GSI)

## Réalisation des différents plans de détection

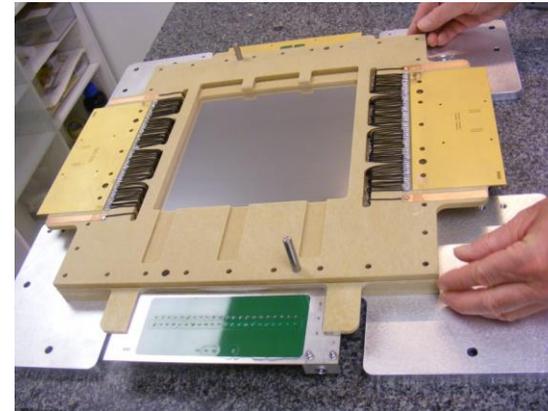
Plans de fils, plan d'anode et de cathode, plan de pads



Plan de fils



Plan de cathode



Assemblage des plans avec des pions de centrage



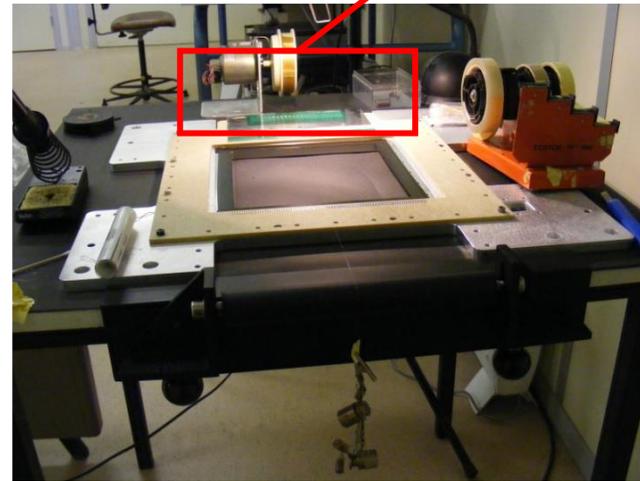
Connection des pistes à la pate à l'argent (ou autre)

## Mise en tension mécanique des fils

Soudure, sertissage, collage



Tenue mécanique des fils par un procédé de sertissage



Mise en place par soudure

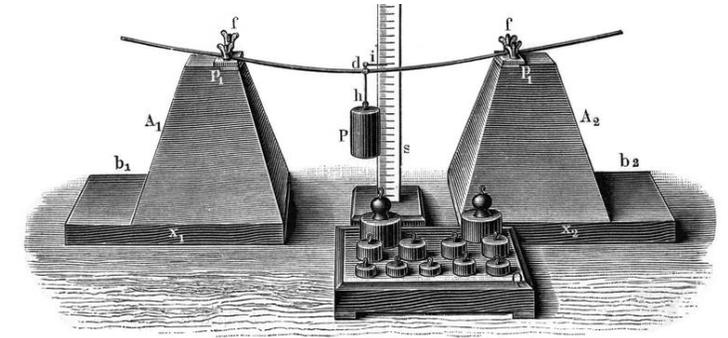


Machine à bobiner automatique

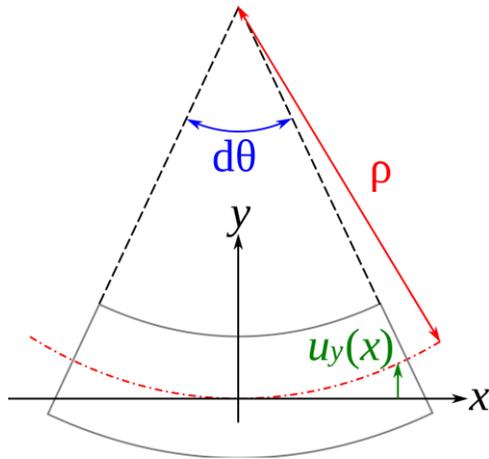
## Résistance des matériaux / Flexion

Elle se produit lorsqu'une force est appliquée sur une poutre ou une structure, ce qui 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



Le graphique  $u_y(x)$  correspond à la « déformée de la poutre »

Avec  $u_y(x)$  la flèche, on a d'après la définition générale du rayon de courbure :  $\gamma = \frac{1}{\rho} \simeq \frac{d^2 u_y}{dx^2}$

Avec les relations suivantes:  $\sigma_{xx} = -\frac{M_{fz}}{I_{Gz}} \cdot y$  et  $\sigma = E \cdot \varepsilon$

On obtient:

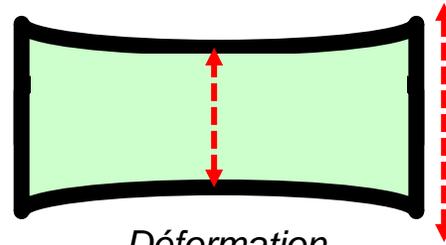
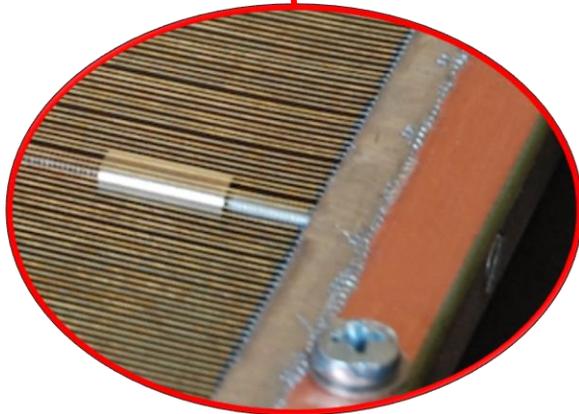
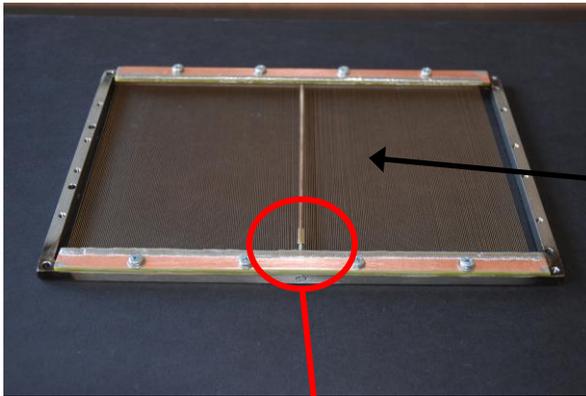
$$\gamma = \frac{d^2 u_y}{dx^2} = \frac{M_{fz}}{EI_{Gz}}$$

Souvent notée:

$$EI_{Gz} y'' = M_f$$

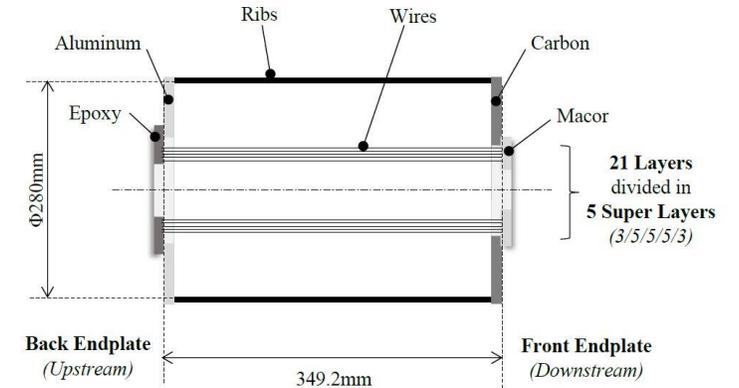
## Précontrainte pour assurer une tension optimale

Sur les cadres supports mécaniques ou directement sur les fils



Déformation mécanique

Tissage sur un cadre précontraint

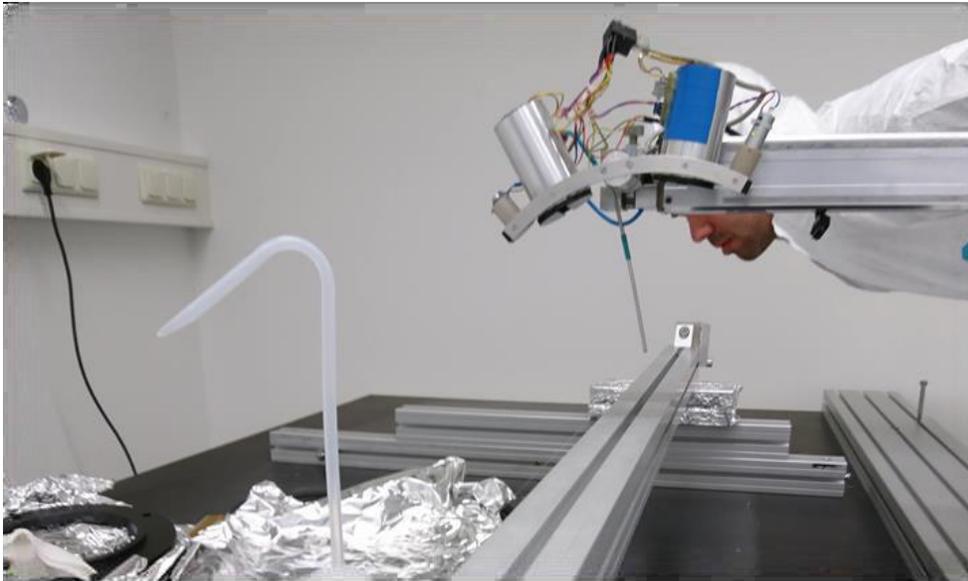


Layer	Radius (mm)	Over-tension (g)	Force on Endplates (g)	y <sub>up</sub> (r) Back Endplate (µm)	y <sub>down</sub> (r) Front Endplate (µm)	c(r) (µm)	Initial elongation Δl (mm)	Final elongation Δl' (mm)	Difference (12g desired) (%)
1	30	12	9.94	-73.05	-98.69	171.74	1.00	0.83	17.17
2	32	12	10.02	-70.24	-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	-11.03	-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)									

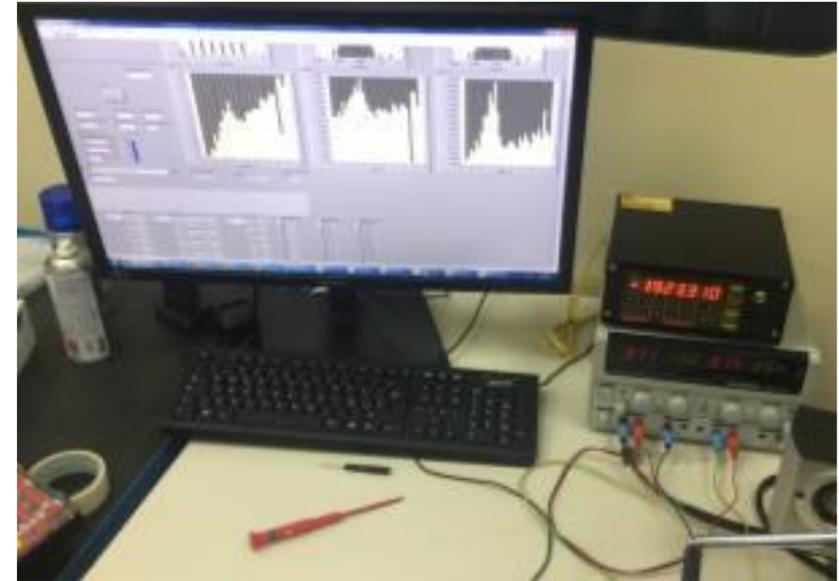
Tissage avec valeur de tensions mécaniques initiales requises

### Contrôle de la tension mécanique des fils

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



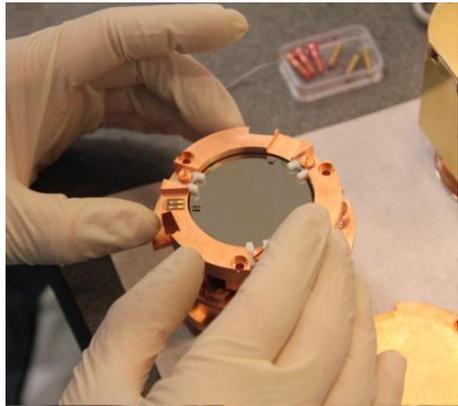
Faisceau laser sur le fil, jet d'argon de 8 Bar



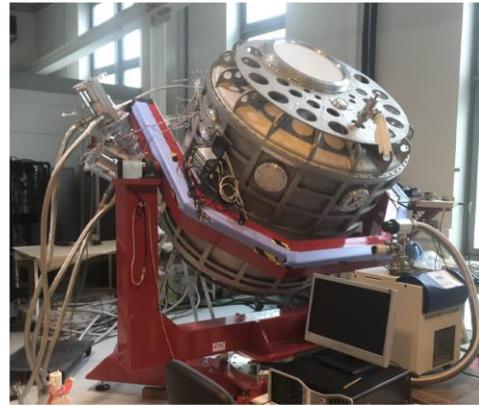
Mesure de la fréquence et conversion en tension mécanique

## De la mécanique aussi dans les bolomètres

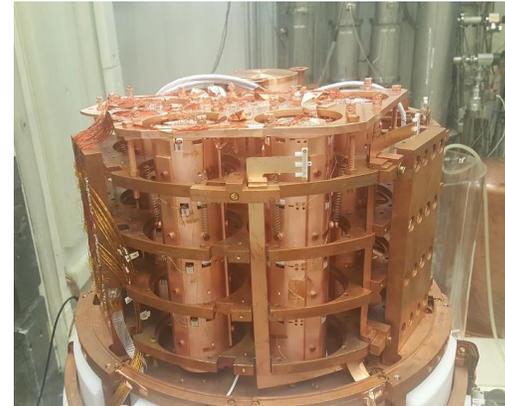
Polissage, conception cryo-mécanique



Bolomètre scintillant



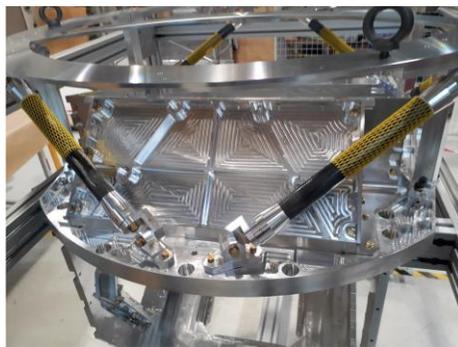
Interféromètre bolométrique



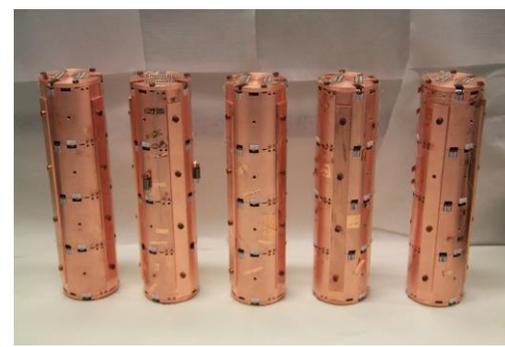
Montage complet CUPID



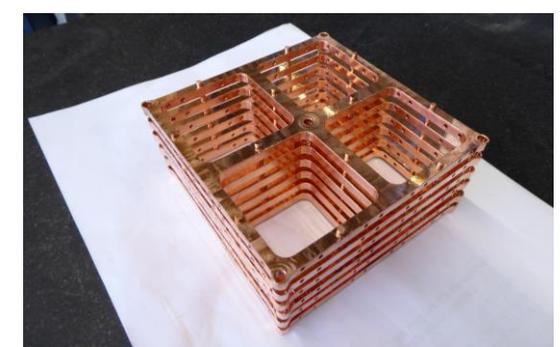
Montage fin bolomètre



Mécanique conventionnelle



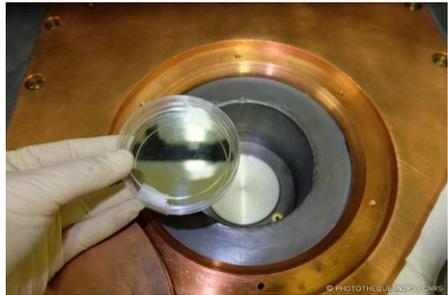
Usinage cuivre



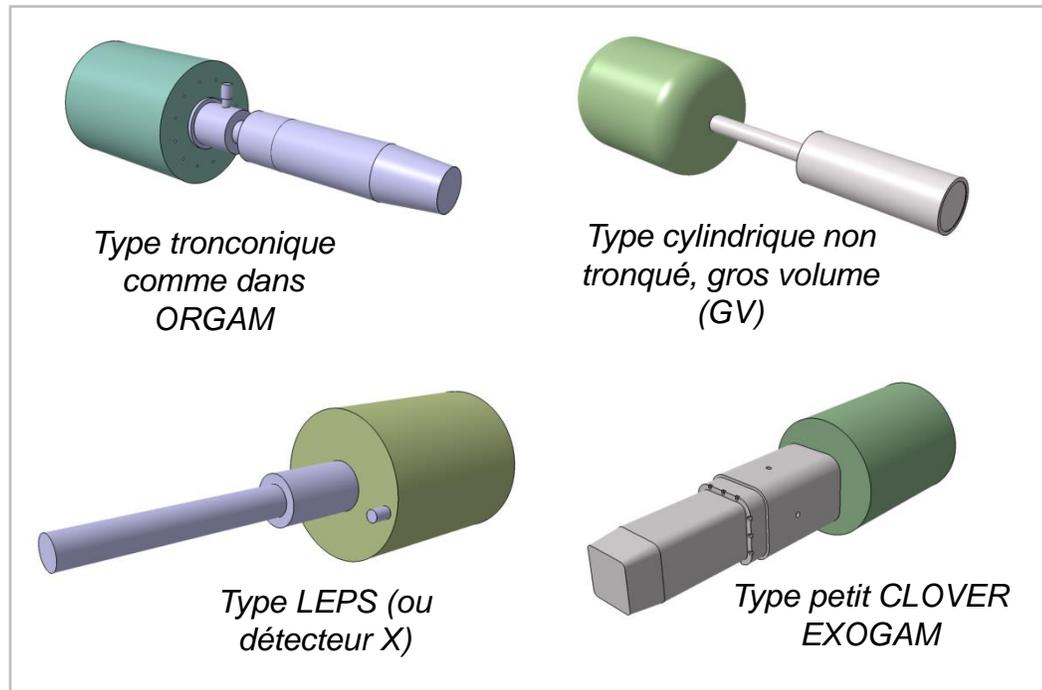
Usinage cuivre

## Intégration de détecteurs à semi-conducteurs (Ge)

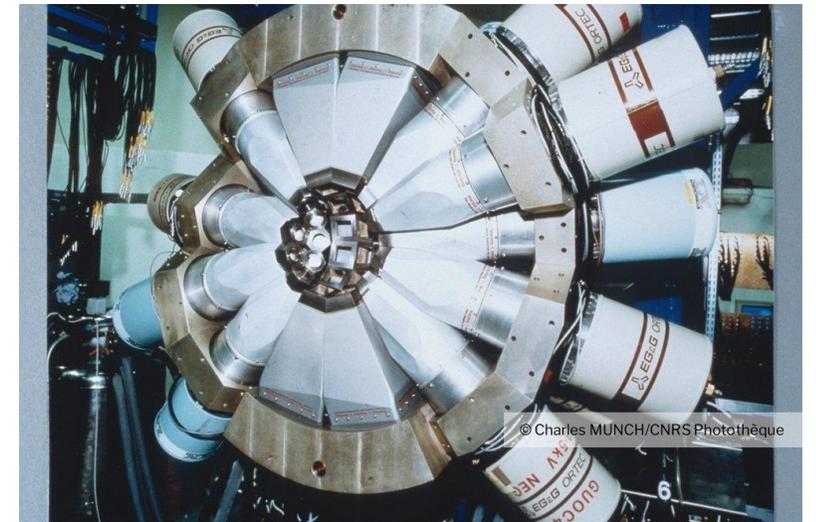
Détecteurs très utilisés en physique nucléaire (GANIL, Alto...)



Partie active du détecteur Ge



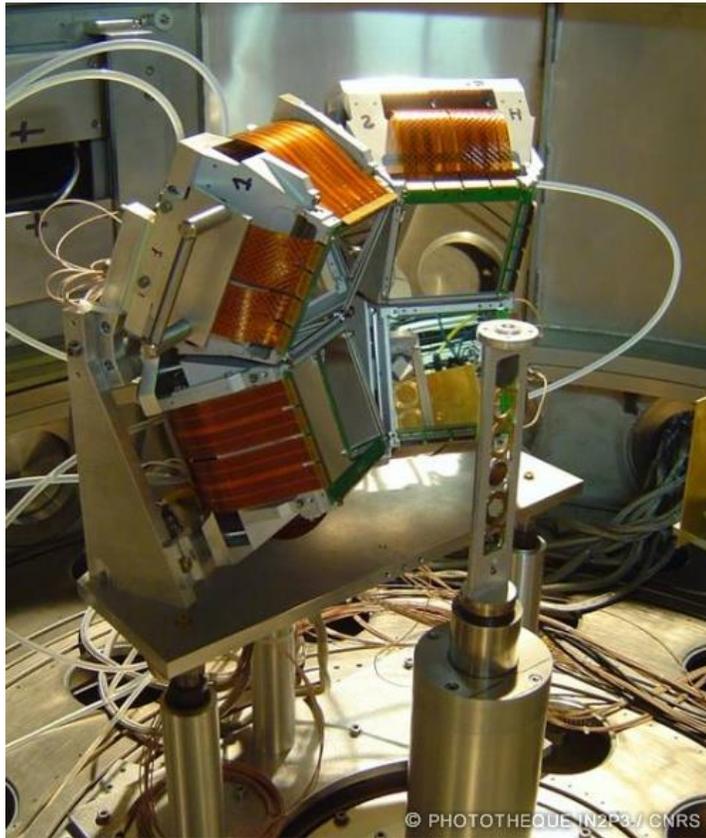
Quelques exemples de détecteurs Ge



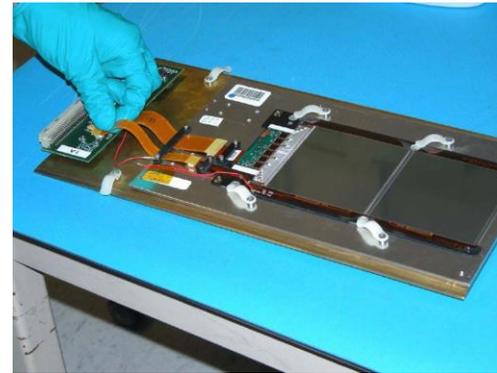
Intégration de détecteurs Ge en structure « Gamma sphère » (détecteur EUROGAM)

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

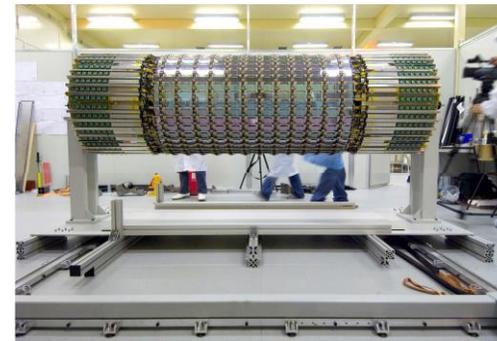
Détecteurs très utilisés pour les trackers



Intégration de 4 ensembles MUST



Un module du tracker de CMS



Un tonneau du tracker d'ATLAS



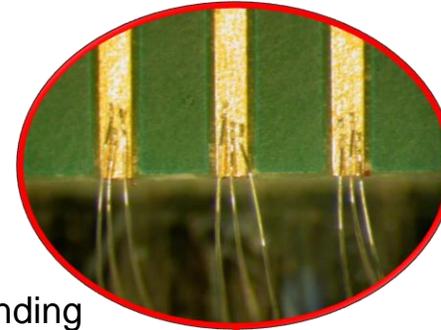
Un disque du tracker de CMS

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

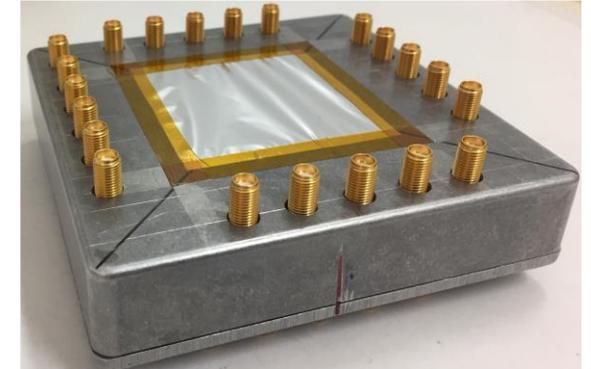
Détecteurs Diamants



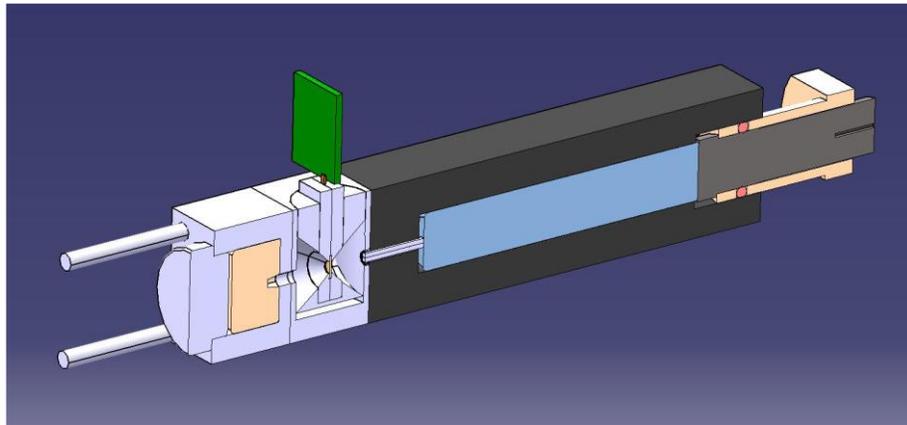
Diamant synthétique CVD



Wire bonding



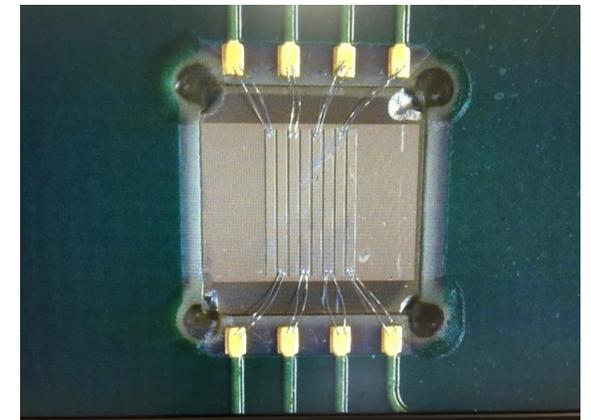
Boitier aluminium intégré



Montage mécanique – banc de test



Opération manuelle sous  
binoculaire



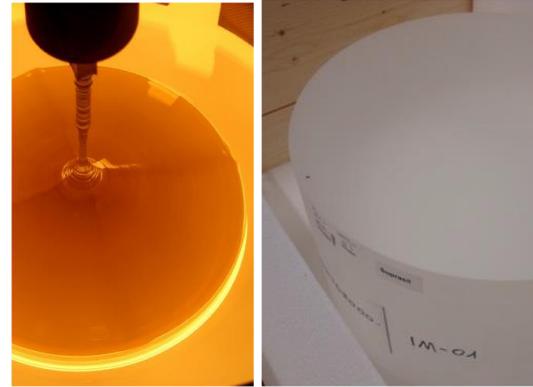
Maintient du diamant par collage  
UV

## 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



Métrie optique

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

Chargeur de filtres pour LSST (Chili)



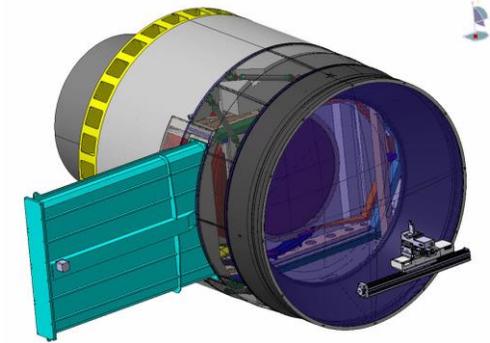
Infrastructure du télescope LSST



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 12 (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...

## 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

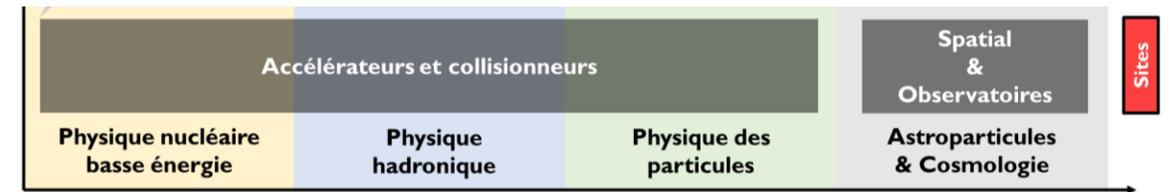
### ❑ Contraintes:

- 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 sur 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)



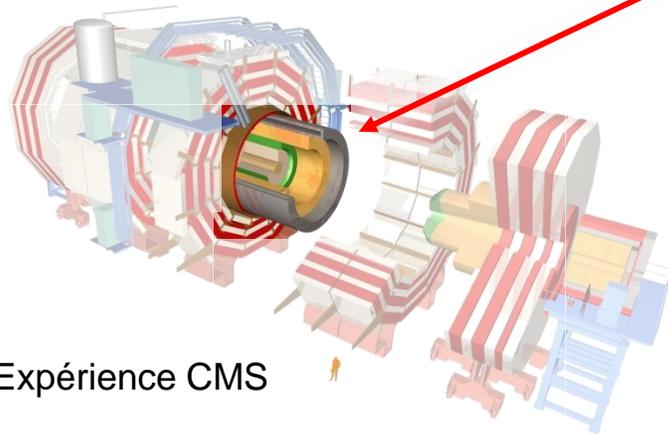
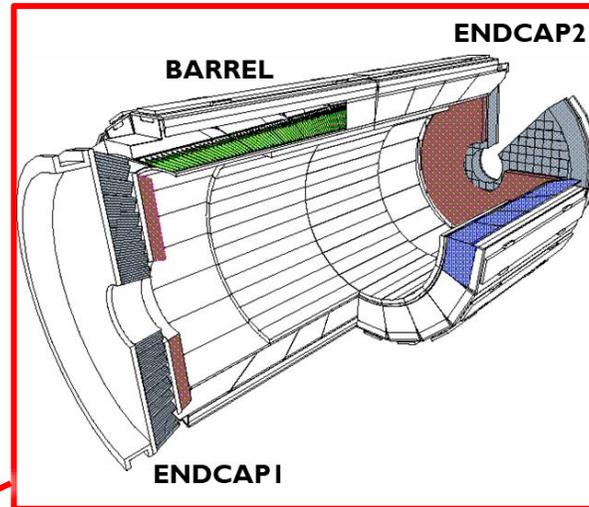
Air-pad, rail de guidage, verin hydraulique

## Installation calorimètre électromagnétique de CMS (ECAL) au CERN

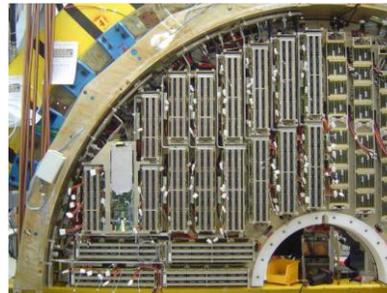
Conception d'outillage spécifique, Mise en place d'échafaudages



**BARREL -**  
Supermodule intégré



Expérience CMS

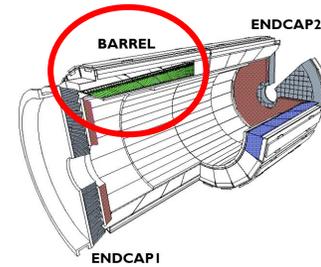


**ENDCAP - Dee** intégré



Installation des structures supports, échafaudages et outillages

## Installation calorimètre électromagnétique de CMS (ECAL) au CERN BARREL

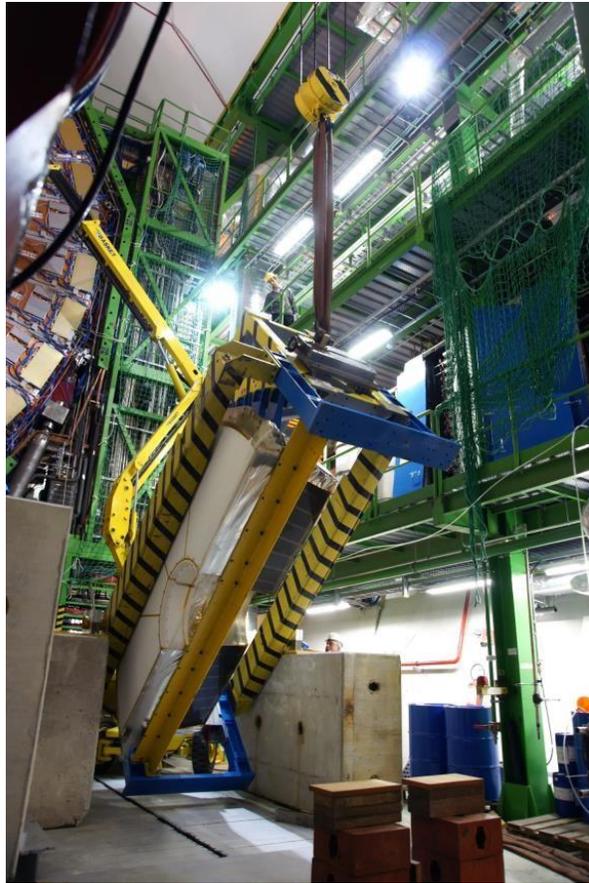
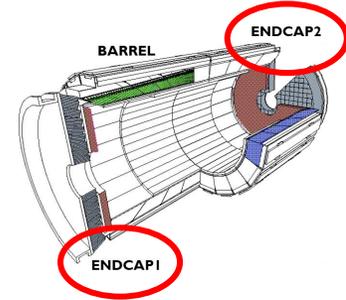


Mise en position des modules sur le rail

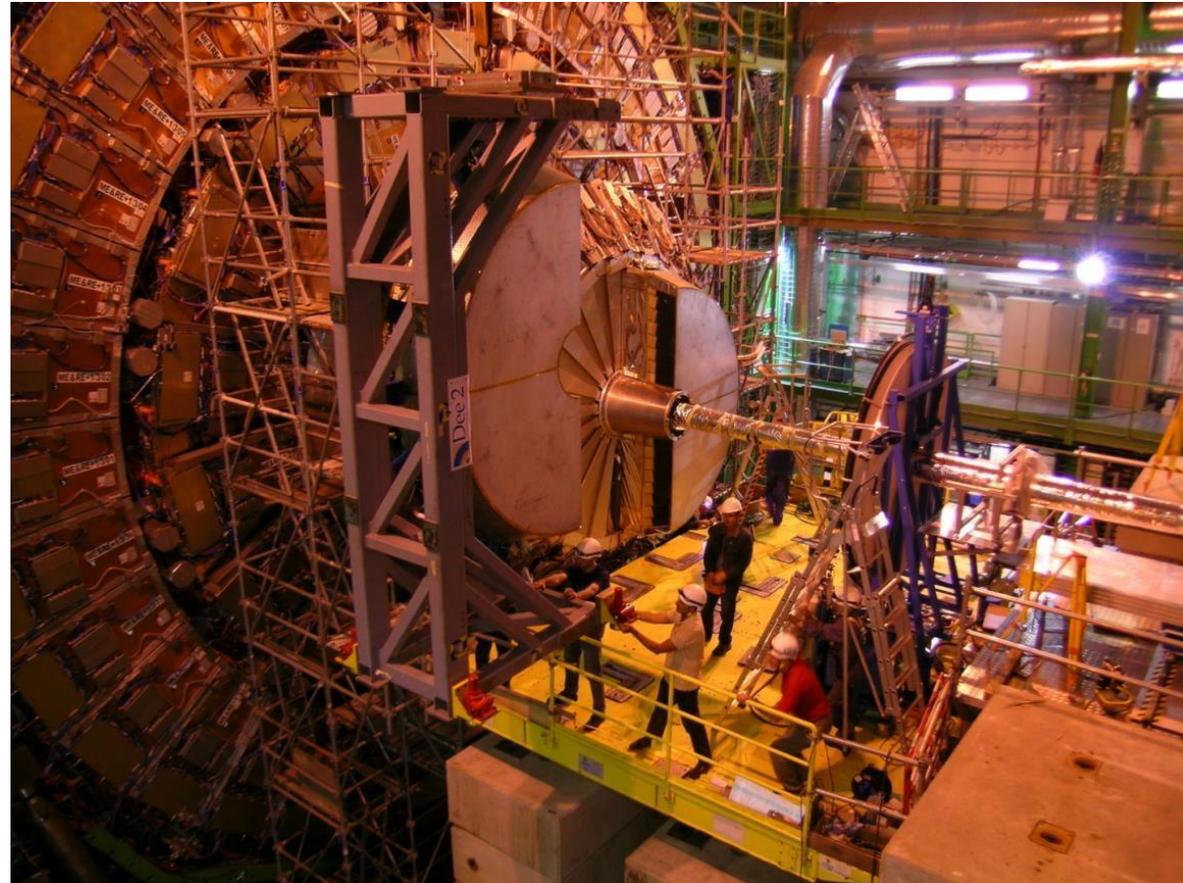


Installation des modules un par un

## Installation calorimètre électromagnétique de CMS (ECAL) au CERN ENDCAP



Mise en position verticale

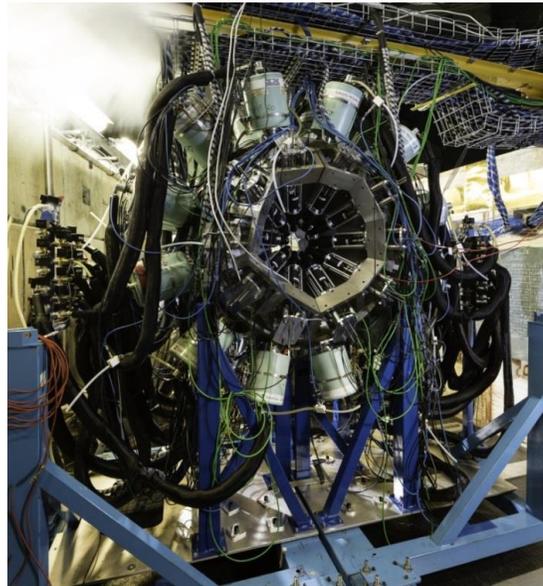


Installation sur son support

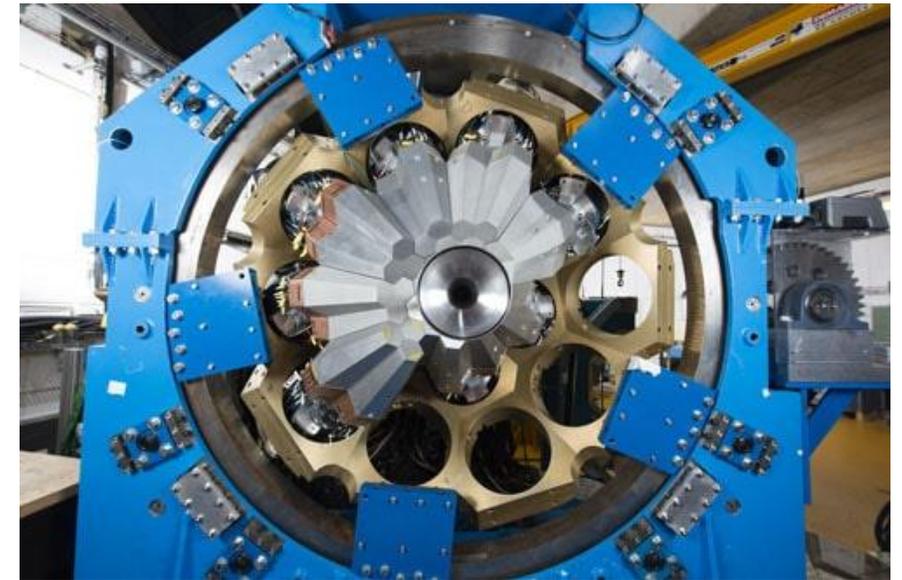
### Installation de structures mécaniques et de détecteurs Ge (GANIL, Alto...)



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

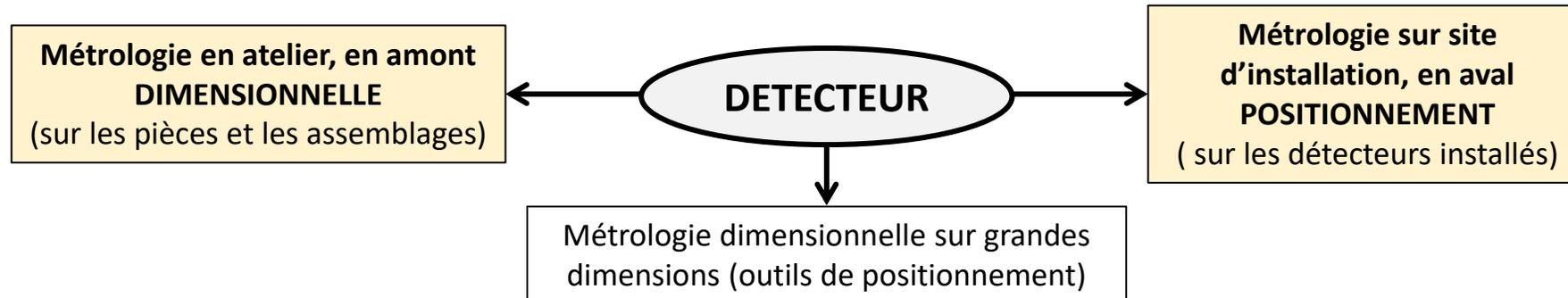
### Métrologie des ensembles de détection

#### ❑ METROLOGIE **DIMENSIONNELLE**: (voir précédemment)

- Réalisée après 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?

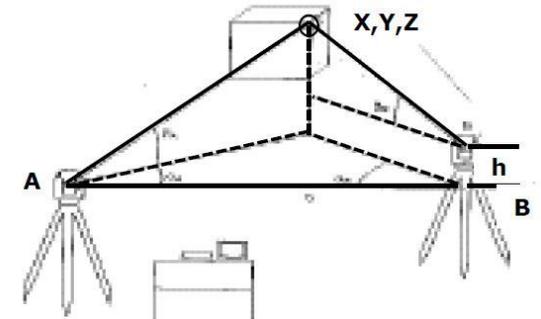
- Malgré la précision de fabrication, d'assemblage et de contrôle des détecteurs lors de la phase d'intégration, il existe toujours des différences entre la CAO et le produit construit
- Lors des installations, il apparaît également des décalages de positionnement des détecteurs par rapport au design 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 décimètre
- 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



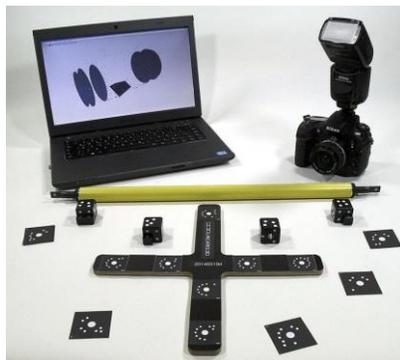
Niveau numérique



Laser tracker

## Photogrammétrie

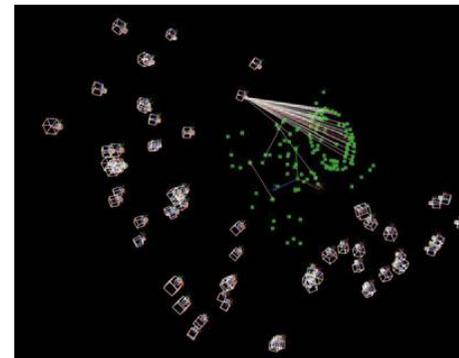
- Technique permettant de déterminer les dimensions et les volumes des objets à partir de mesure effectuées sur des photographies montrant les perspectives de ces objets
- Basée sur le même principe que les yeux humains
- On ne mesure pas l'objet mais son image 2D
- On traite les images 2D pour obtenir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



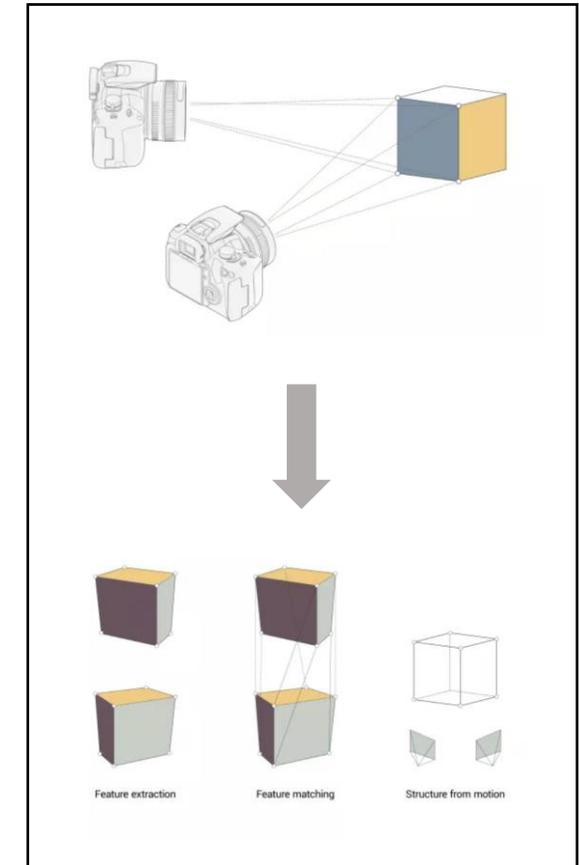
Caméras + flash avec cibles photogrammétriques



Au moins 2 caméras pour la photogrammétrie



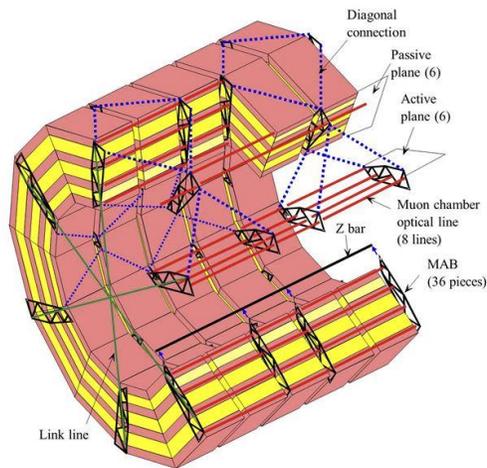
Visualisation spatiale des stations de caméras sur un logiciel dédié



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**

### Installation de 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



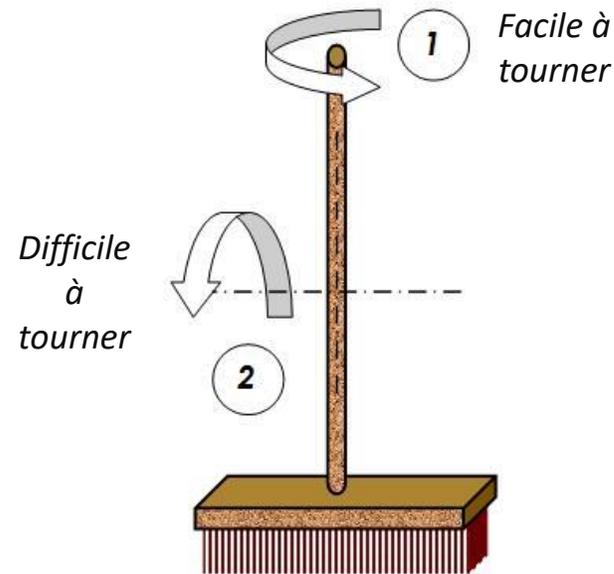
Arrivée de la structure des télescopes CTA

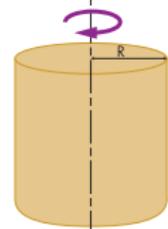
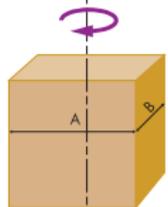
## Résistance des matériaux / Moment d'inertie (kg.m<sup>2</sup>)

Le moment d'inertie, est une mesure de la distribution de masse d'un objet par rapport à un axe de rotation donné.

Le moment d'inertie d'un objet par rapport à un axe est calculé en intégrant le produit de la masse élémentaire de chaque élément de masse de l'objet par le carré de sa distance par rapport à l'axe de rotation.

Plus le moment d'inertie est grand, plus il est difficile de faire tourner l'objet autour de l'axe de rotation.

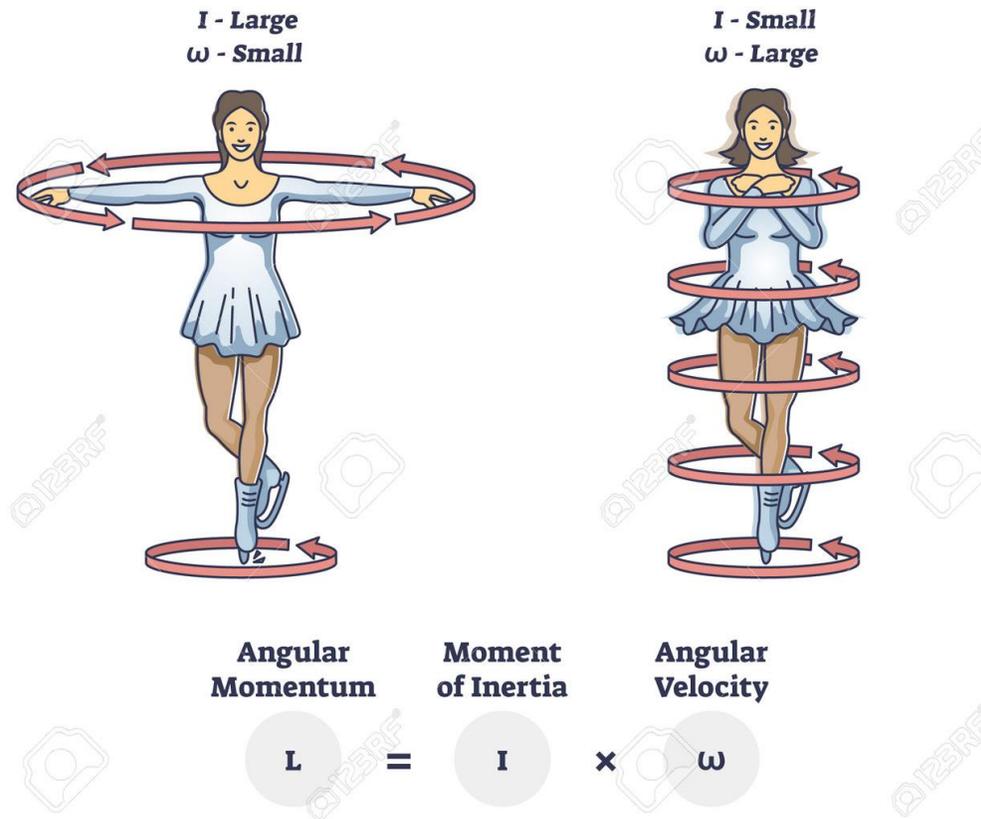


Cylindre plein	$J = \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2$	
Parallélépipède rectangle	$J = \frac{1}{12} \cdot M \cdot (A^2 + B^2)$	

## Résistance des matériaux / Moment cinétique (kg.m<sup>2</sup>.rad/s)

Le moment cinétique d'un objet en rotation est la quantité de mouvement de cette rotation. Il dépend de la vitesse de rotation de l'objet et de son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation.

$$L = I \cdot \omega$$



### Installation des télescopes de CTA (Canaries)

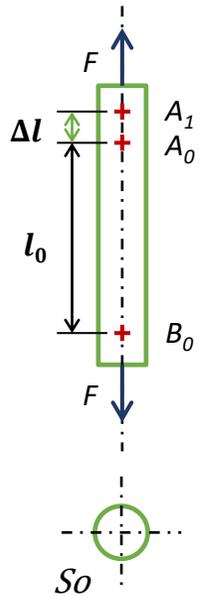


Site de l'expérience CTA



Télescope CTA

## Résistance des matériaux / Traction et Compression



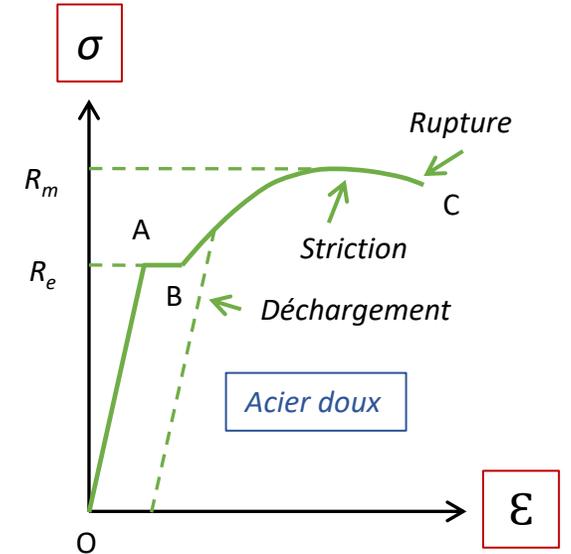
Allongement:  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

$\frac{\Delta d}{S_0} = \nu \frac{\Delta l}{l_0}$

Dans le domaine élastique, la contrainte est liée à l'allongement par la loi de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \leq \frac{R_e}{s} = R_{pe}$$

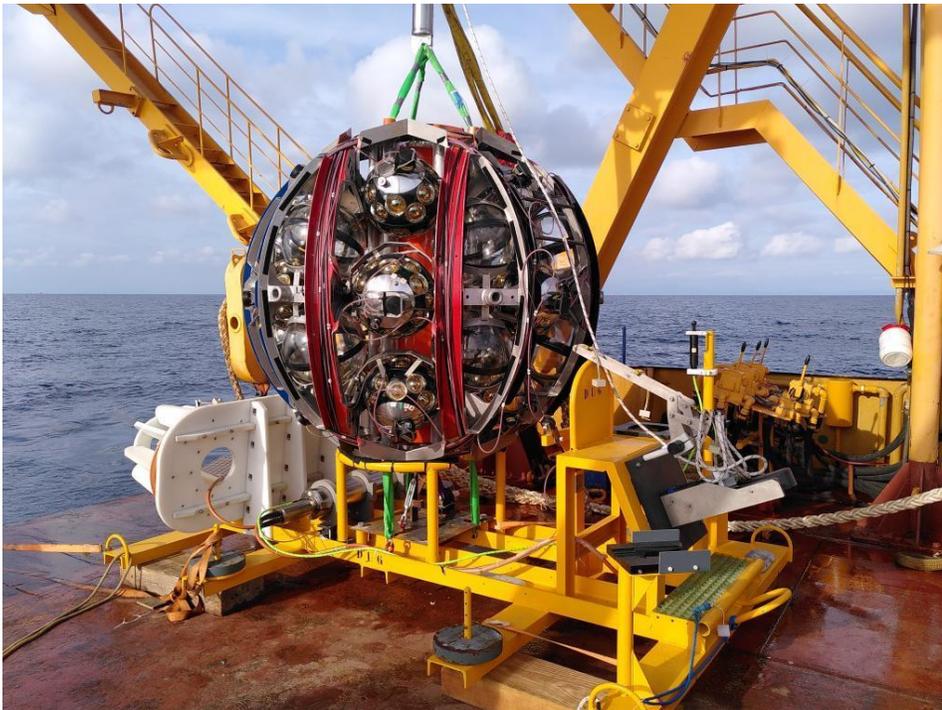


OA: Déformation élastique.  
 AB: palier de plasticité.  
 ABC: déformation permanente-plastique.

- $\sigma$ : contrainte normale
- $R_e$ : limite élastique (Mpa)
- $R_m$ : Résistance à la rupture (Mpa)
- $R_{pe}$ : limite pratique à l'extension (Mpa).
- $R_{p0,2}$ : limite élastique à 0,2% (Mpa) (laisse subsister un allongement permanent de 0,2%)
- $E$ : module d'élasticité longitudinal ou module d'Young (Mpa)
- $\nu$ : coefficient de Poisson  $\approx 0,3$
- $s$ : coefficient de sécurité

	Module d'Young
<b>Acier</b>	<b>190 à 220 GPa</b>
<b>Aluminium</b>	<b>≈70 GPa</b>
<b>Cuivre et ses alliages</b>	<b>90 à 150 GPa</b>
<b>Carbone (fibres haut module - diamant)</b>	<b>250 à 1 000 GPa</b>

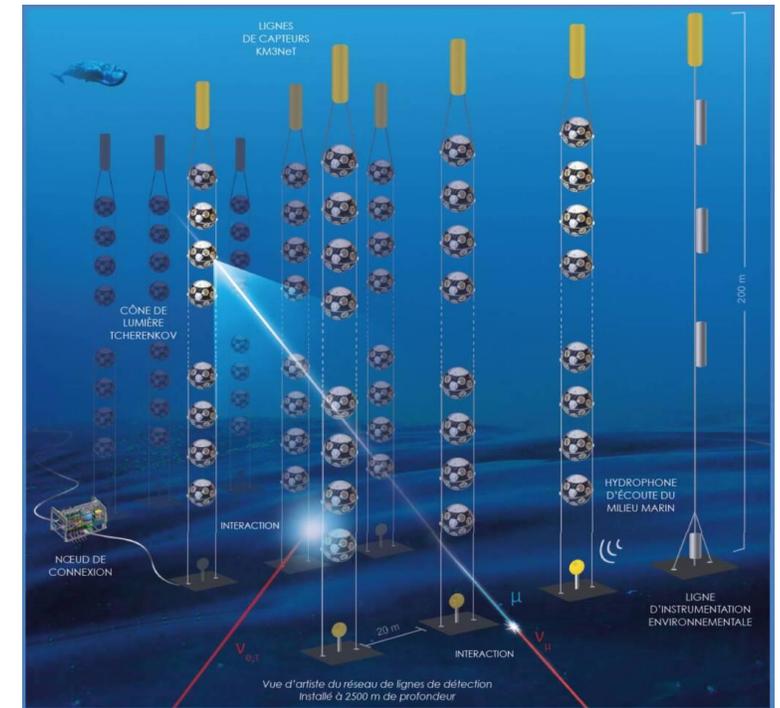
### Installation des détecteurs de KM3NET (mer méditerranée)



Installation des lanceurs pour mis à l'eau  
*18 modules optiques de 31 photomultiplicateurs*  
*(ANTARES a servi de démonstrateur)*



Mise à l'eau des lanceurs et descente vers les abysses



Site avec tous les modules

### Installation de détecteurs dans le spatial

#### ❑ Contraintes:

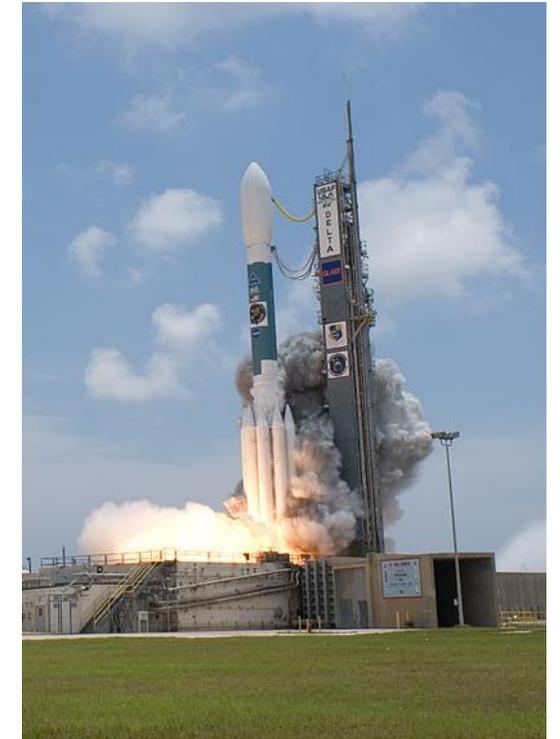
- Difficultés liées à l'environnement et maîtrise seulement partielle des éléments
- Le lancement est assuré par un opérateur extérieur aux équipes scientifiques
- Contraintes liées aux organisations type NASA ou ESA
- Obligation de satisfaire le calendrier imposé (orbites, planification des moyens financiers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

### 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
- Premier vol ballon scientifique à Paris 1783
- 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)



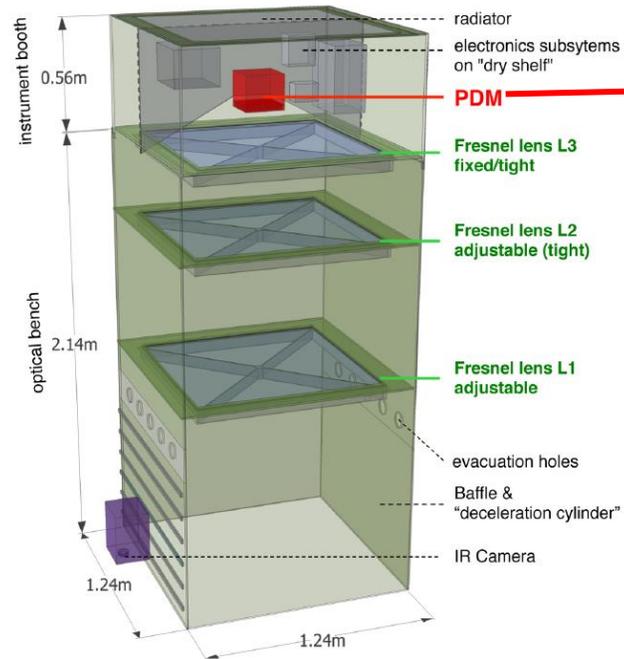
Victor Hess au départ d'un vol ballon en 1911  
Etude de la variation de la radioactivité avec l'altitude

## Proche du spatial, les vols en ballon

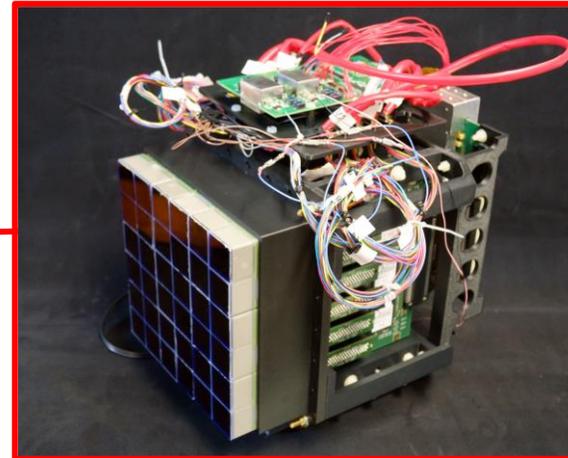
Missions EUSO-balloon et EUSO-SPB



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)

### 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

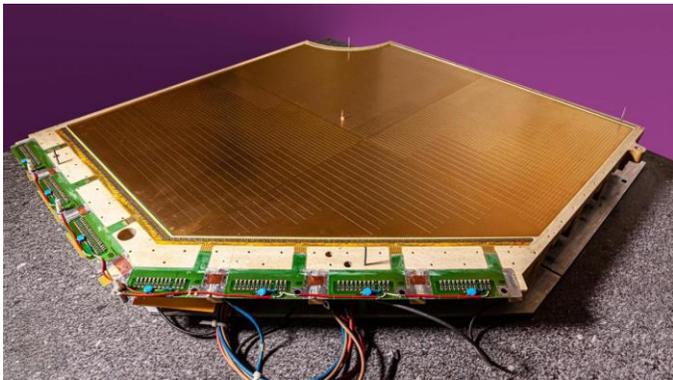
- Parfois nécessaire de se rendre en urgence sur les sites d'installation
- Déplacement sur site également pour récupérer un détecteur pour maintenance
- La fréquence des interventions dépend du type d'expérience et de la proximité (plus fréquent en physique nucléaire)
- Les expériences de physiques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



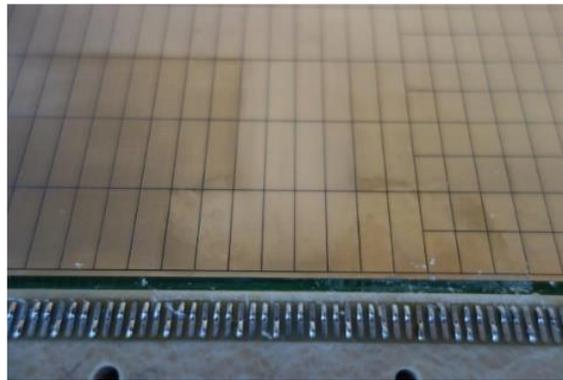
Démontage de quadrants d'ALICE

### 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



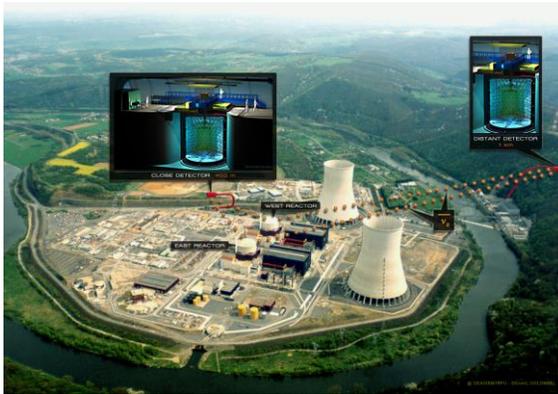
Nettoyage de pads de chambre à  
fils d'ALICE



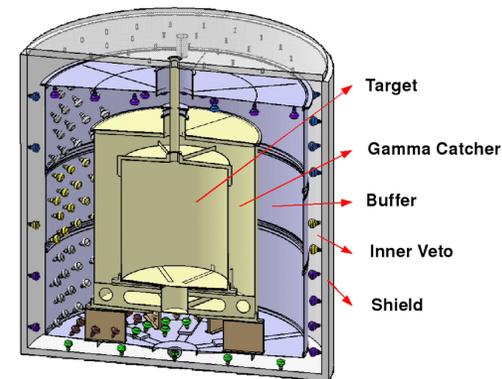
Réparation de fils cassés sur SOFIA. Envoi de  
la chambre de GSI (Allemagne) vers Orsay

### Démantèlement et récupération de matériel

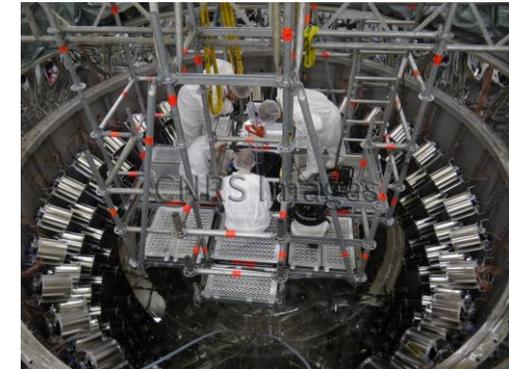
- Les grosses expériences doivent inclure un plan de démantèlement, nécessite d'anticiper parfois sur plus de 20 ans
- Importance capitale de la gestion documentaire
- La budgétisation est difficile
- Le CERN va voir arriver des phases de démantèlement
- Les équipes mécaniques doivent intégrer ces phases 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

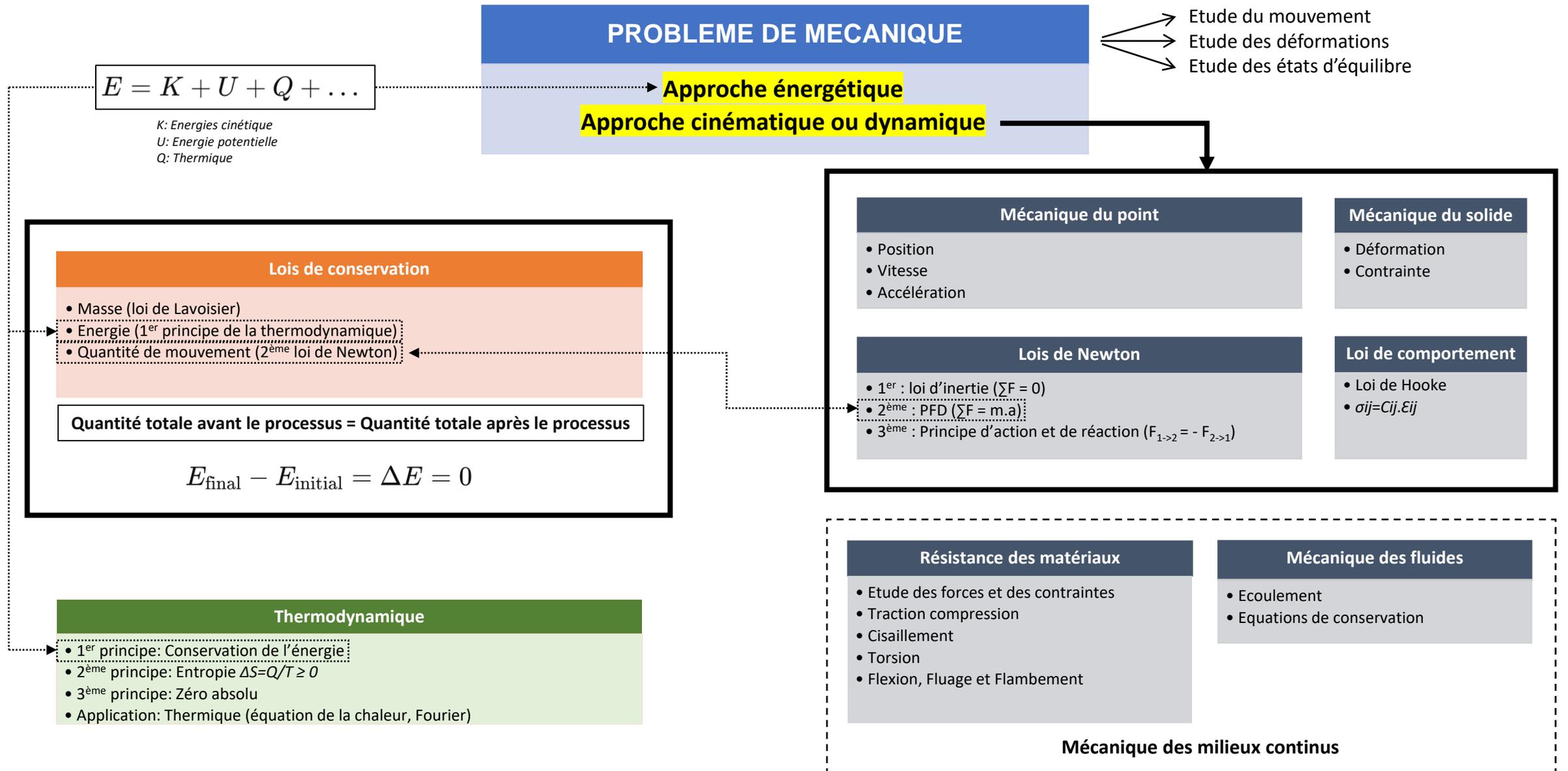


Récupération des PMTs de l'expérience pour le projet Liquido

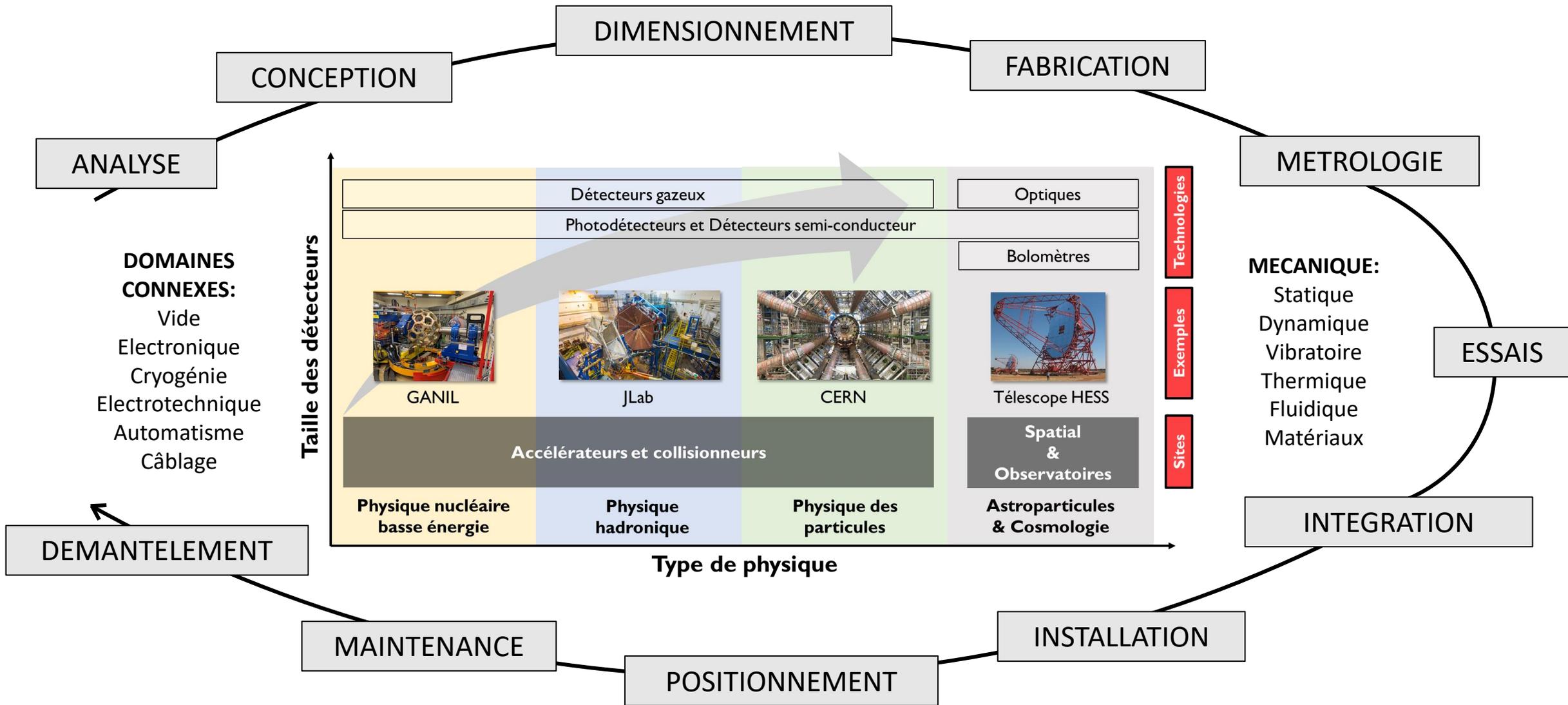
## 5. Conclusion

- Résumé
- Perspectives

# 5. Conclusion | Résumé



# 5. Conclusion | Résumé



## ❑ Actuellement:

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

## ❑ A venir:

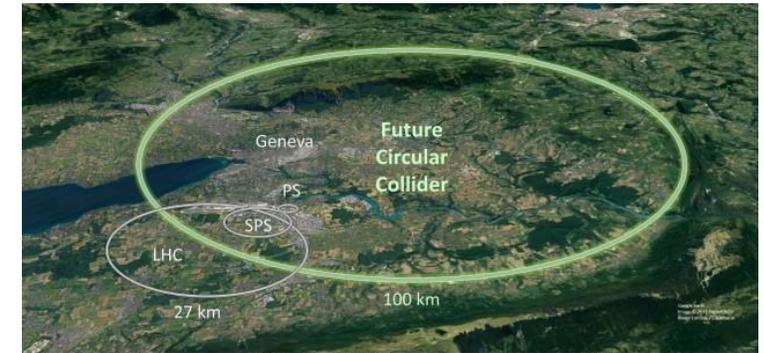
- Arrêt du LHC? Démantèlement de détecteurs (ALICE 2033)?
- Gros projets en perspectives (EIC, Einstein Telescope, FCC...)
- Dépendra des contextes géopolitique, budgétaire, énergétique

## ❑ Contexte CNRS:

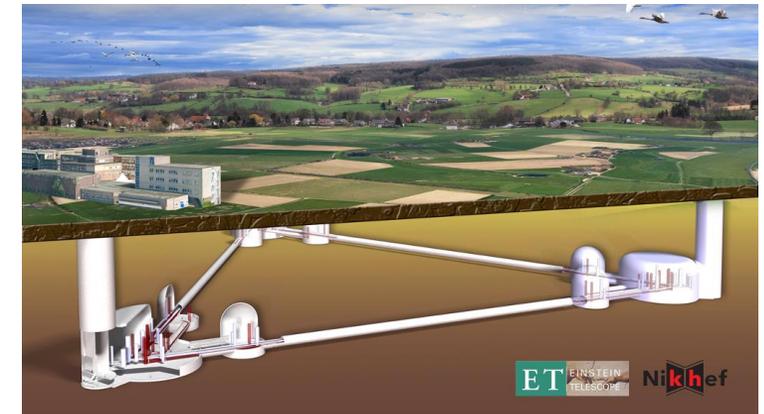
- Suivi des tendances en terme d'embauche (réduction du nombre de techniciens)
- Faire connaître le métier de mécanicien à l'IN2P3 (formations, stagiaires, apprentis...)

## ❑ Veille technologique:

- R&D interne à mener (nouveaux matériaux pour la détection...)
- Réseaux professionnels (calcul, détecteurs, alignement...)
- Implémentation d'IA dans les logiciels de conception et de simulation?
- Workshop techniques détecteurs



Future Circular Collider



Télescope ondes gravitationnelles  
Einstein Telescope



# Mécanique des Détecteurs

## 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 », Stephane 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

## 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