

**Marc Anduze  
DT – LLR**

**- Ecole 2018 -  
Du détecteur à la mesure  
Bénodet, 10-15 juin 2018**



**IN2P3**

Institut national de **physique nucléaire**  
et de **physique des particules**

**MECANIQUE des DETECTEURS**

# Plan du cours

## 1ère partie

1. Introduction et généralités
2. La conception mécanique
  - a) Définition du besoin et analyse fonctionnelle
  - b) La conception de forme
  - c) Le dimensionnement
  - d) Les essais mécaniques

## 2ème partie

1. La fabrication
2. L'intégration des détecteurs
3. L'installation sur site
4. La métrologie

# Introduction : les détecteurs

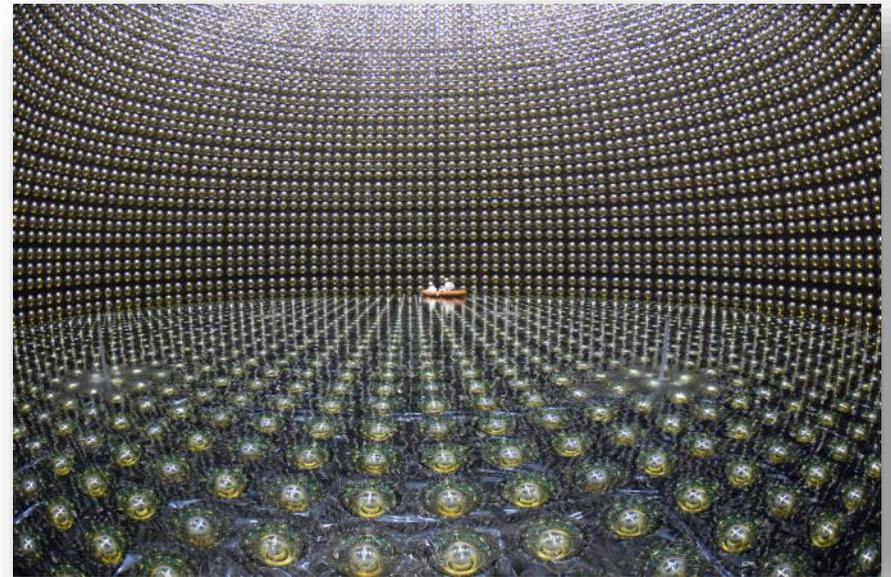
Les développements de détecteurs se caractérisent par une **très grande diversité**

## 1. Dimensionnelle :

- a) masse de quelques kg à plusieurs milliers de tonnes ;
- b) quelques cm à plusieurs dizaines de mètres



*Détecteur de vertex SVT  
(Silicon Vertex Tracker),  
cœur de l'expérience Babar*



*Super-Kamiokande - Japon  
(50,000 tonnes d'eau pure, 12,000 photodétecteurs)*

# Introduction : les détecteurs

## 2. Technologique :

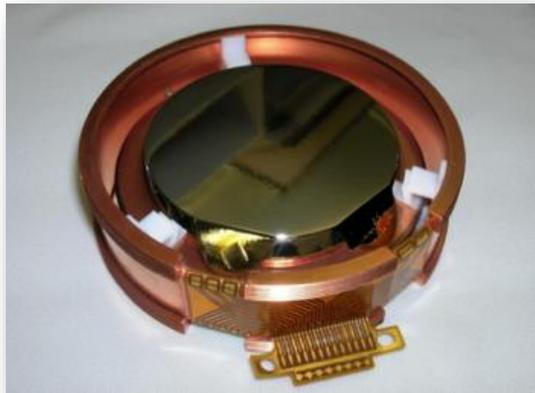
Très large palette de matériaux et de **systemes de détections** :



*Photodétecteur (ANTARES)*



*Détecteur gazeux SDHCAL (CALICE)*



*Bolomètre (cristal Ge), EDELWEISS*



*Détecteur semi conducteur (Tracker CMS)*

## 3. Contexte et environnement :

- a) Collaborations internationales ;
- b) Accélérateurs et collisionneurs ;
- c) Spatial ;
- d) Environnement naturel (océan, désert, ...)



*Télescope HESS II, Namibie*



*Installation de GLAST/FERMI  
dans la fusée DELTA II*

- **L'essentiel des fonctions mécaniques dans un détecteur de particules consiste à supporter, positionner et refroidir les composants actifs (détecteurs)**

- 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

**Remarque : Les détecteurs n'ont souvent peu ou pas de mouvements. (pas d'études cinématiques nécessaires)**



- Etudes en **statique linéaire, non-linéaire**
- Les études dynamiques se limitent souvent aux petits mouvements autour de la position d'équilibre ⇒ **vibrations**
- **Etudes thermiques** (régulation) et **thermomécaniques** (influence de la température sur le comportement mécanique)

# la Mécanique à l'IN2P3

- **Des compétences très diverses :**
  - Mécanique/Thermique
  - Automatismes/Mécatronique
  - Cryogénie/Vide/Fluide
  - Matériaux (composites)
  - Impression 3D ...
- **Des métiers :**
  - Bureaux d'études
  - Calculs/Simulations
  - Réalisations : Ateliers
- **Des réseaux métiers IN2P3 :**
  - Réseau calcul
  - IAO/CAO mécanique
  - Réseau R&D mécanique



*THE DRAWING OFFICE 1960. © GM ARCHIVE*



*LLR (1959)*

# La conception mécanique

## Dès les 1ères idées ... au lancement en fabrication

- **Définition et analyse du besoin**  
**Analyse fonctionnelle**, analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), rédaction des spécifications, groupes de travail, échanges importants entre les différents intervenants
- **Conception des formes**  
**CAO**, choix des matériaux et technologies à mettre en œuvre
- **Dimensionnement**  
Notes de calculs, **éléments finis**, codes de calculs ...
- **Tests et essais**  
**Phase prototypage**, caractérisations, tests destructifs, ...
- **Dossier de fabrication**  
Réalisation des **plans de fabrication**  
Cahier des charges pour la sous-traitance (marchés, ...)

# La conception mécanique

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

- **La conception du détecteur par lui-même**
  - Créativité
  - Etude de solutions ou de techniques innovantes
  - Recherche de performances optimales
  - Etudes longues, généralement très discutées et analysées (revues, etc...)
  - Possibilité de programme de R&D, de prototypes ...
- **La conception des outillages qui entourent le détecteur depuis les phases d'intégration jusqu'à l'exploitation**
  - 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 mécanique

**La conception doit intégrer très tôt la faisabilité des pièces :**

- **Nécessité d'un dialogue fort** entre concepteur (BE) et le bureau des méthodes (lorsqu'il existe) et/ou l'Atelier.  
**Point fort des laboratoires de l'IN2P3 !**
- **Prise en compte du procédé de fabrication** au regard du nombre de pièces, du coût, des performances attendues
- **Obtention des tolérances vis-à-vis du procédé de fabrication**  
ex : Usinage : 0,1 à 0,01 mm/m  
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

# Les enjeux actuels

- Instruments **innovants**, complexes, intégrés, **compacts** et **gigantesques**, plus performants...
- **Environnements contraints** : faisceaux intenses, champ magnétique, accessibilité, sûreté, ...
- **Fiabilité**, cycle de vie « long »
- Nouveaux matériaux
- Nombre de **prototypes limités**
- Collaborations internationales avec multiples interlocuteurs et outils
- Fractionnement des contributions et **complexification des interfaces**

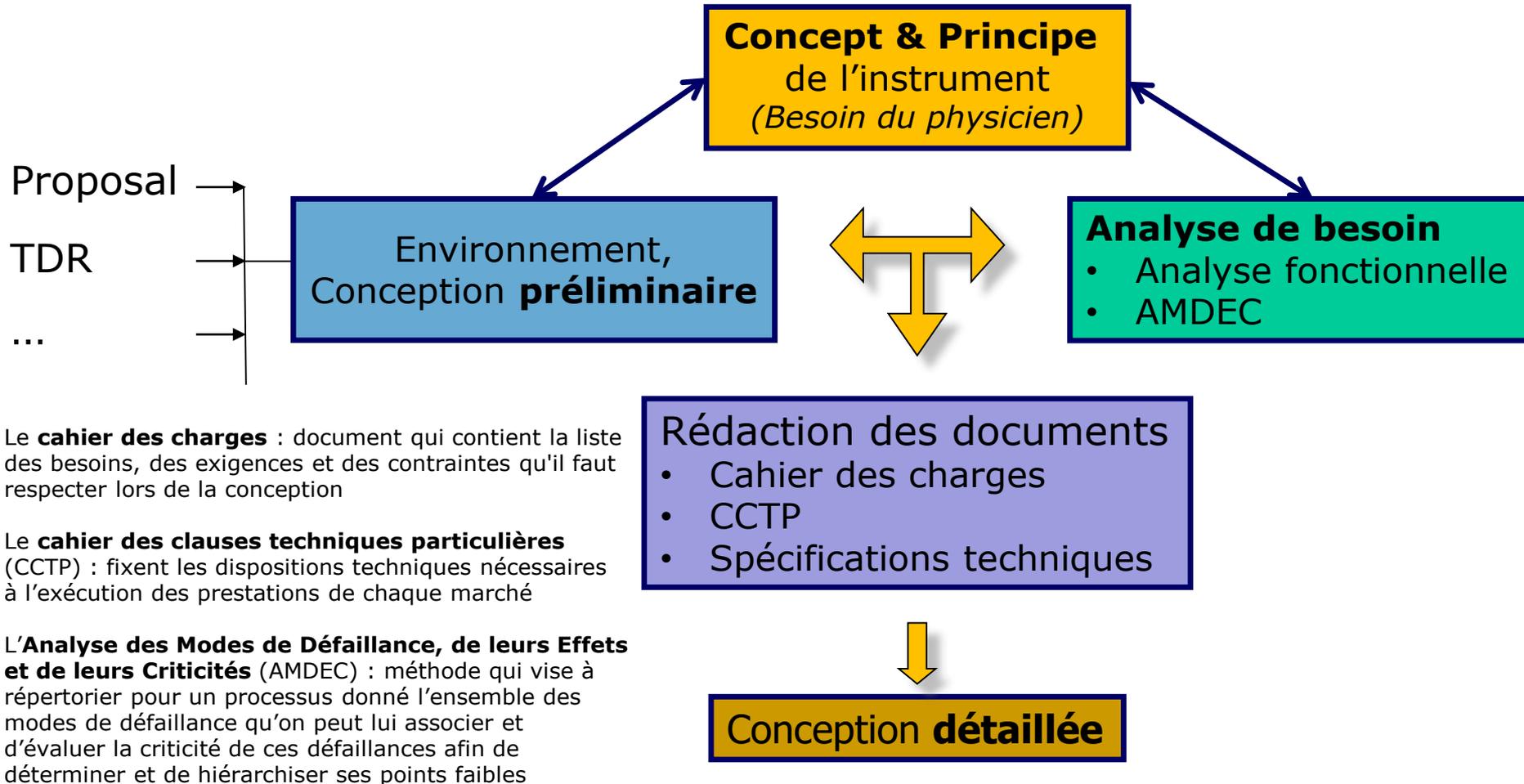
## Evolution des outils logiciels :

- Modélisation virtuel CAO
- Base de données d'échange CAO
- Outils collaboratifs
- Simulations numériques

# Définition du besoin

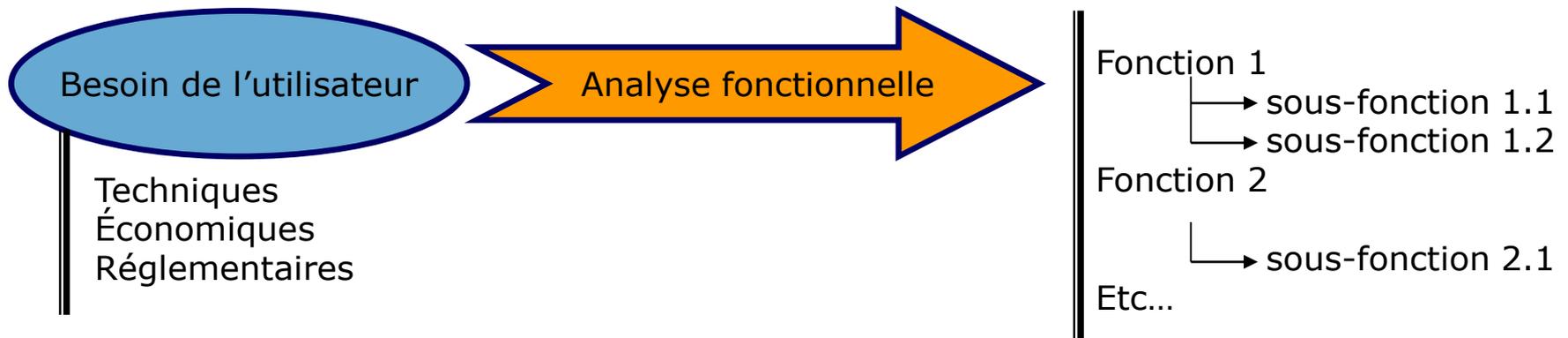
C'est une **étape essentielle** de la conception

Plus la définition est précise et exhaustive, plus le produit sera optimisé



# Analyse fonctionnelle

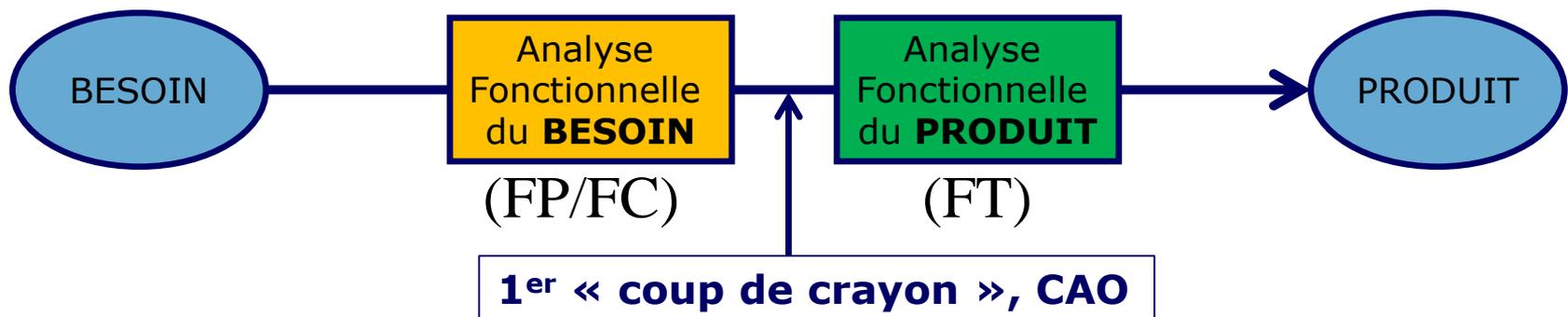
- Démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les **fonctions** du **produit** (matériel, logiciel, processus, service) attendues par l'utilisateur (AFNOR NF X 50-151).
- Elle permet de traduire le **besoin** en fonctions
  - **Besoin** : insatisfaction qui motive la création du produit
  - **Fonction** : Actions d'un élément constitutif d'un système exprimée **exclusivement** en terme de **finalité, sans aucun a priori de solutions**.
  - **Produit** : Élément concret qui répond au besoin à travers la satisfaction des fonctions



# Panorama de l'Analyse Fonctionnelle

## Deux démarches :

- A.F. du besoin ou Externe - Obtention des fonctions FP/FC:
  - Obtention des données nécessaires à la conception, dialogue (utilisateurs, experts...)
  - Besoins clients explicites et implicites, environnements, situations de vie, réglementations, études de produits similaires
  - Outils de recherche de fonction : « pourquoi le besoin ? » (F. principale) + « quelles sont les contraintes auxquelles il doit satisfaire ? » (F. Contrainte)
- A.F. du produit ou Interne - Obtention des fonctions FT et de leurs critères à remplir pour satisfaire le fonctionnement du produit :
  - Caractériser le fonctionnement interne de la solution
  - Décomposition en blocs fonctionnels et utilisation des outils recherche de fonction
  - Fonctions techniques ou élémentaires : « comment le produit fonctionne ? »

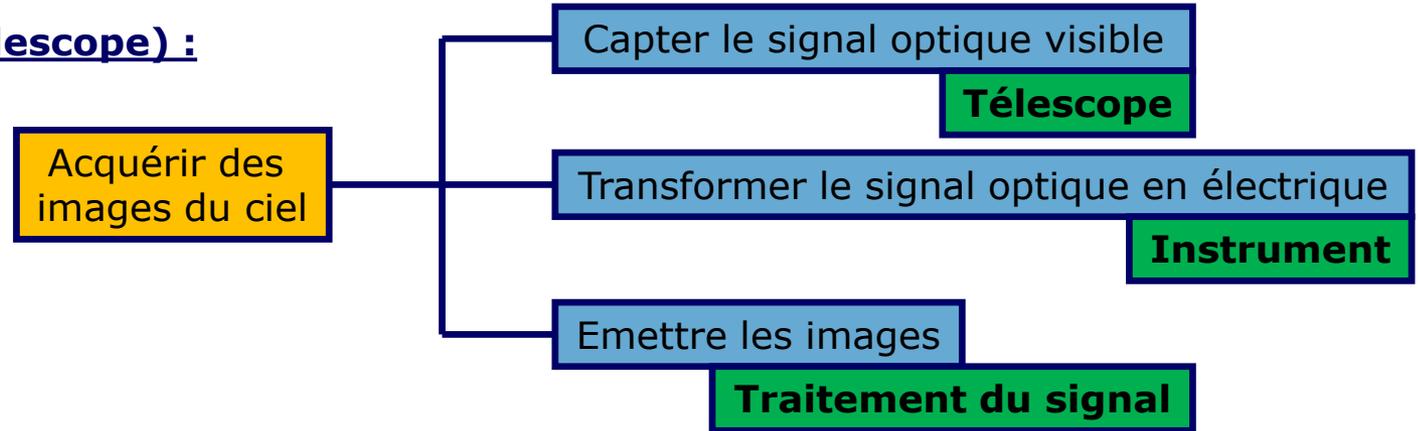


# L'Analyse fonctionnelle : Arborescence

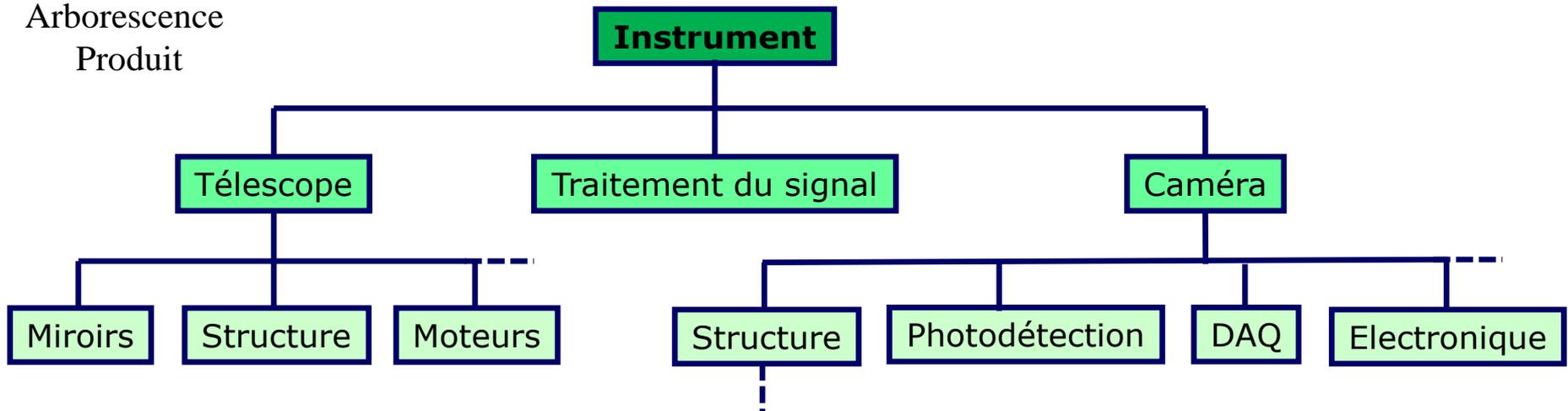
**Ordonner** : l'organisation arborescente des fonctions s'obtient en respectant la logique des deux questions « **pourquoi ?** » et « **comment ?** »

**Exemples (MST télescope) :**

Arborescence  
Fonctionnelle



Arborescence  
Produit

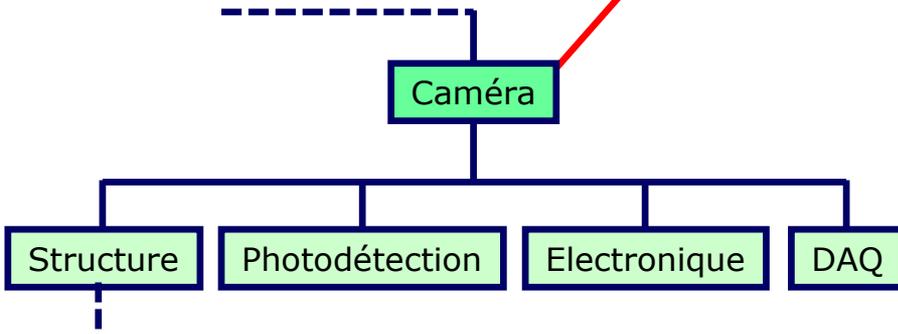


# Analyse fonctionnelle : Product Breakdown Structure (PBS)

**PBS** : outil pour hiérarchiser et quantifier le degré d'importance des différentes fonctions

**Exemple:**

**MST Telescope : la caméra**



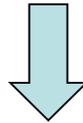
| Detailed PBS of the MST Camera (proposal) |                                | Remarks  |
|---|--------------------------------|--|
| 8   | MST Telescope                  |  |
| 8.1                                       | Structure and optics           |  |
| 8.2                                       | Camera                         |  |
| 8.2.1                                     | Mechanical Structure           |  |
| 8.2.1.1                                   | Skeleton                       |  |
| 8.2.1.2                                   | Telescope Connection           |  |
| 8.2.1.3                                   | Equipments Support             |  |
| 8.2.1.3.1                                 | Sandwich                       |  |
| 8.2.1.3.2                                 | Racks                          |  |
| 8.2.1.3.3                                 | Cables support                 | If any   |
| 8.2.2                                     | Photo-detection                |  |
| 8.2.2.1                                   | Light Concentration            |  |
| 8.2.2.1.1                                 | Light Concentrator             |  |
| 8.2.2.1.2                                 | Mechanical support             | If any   |
| 8.2.2.2                                   | Photo Detector                 |  |
| 8.2.2.2.1                                 | Photo Multiplier Tube          | Includes the signal cable  |
| 8.2.2.2.2                                 | Support + cables               | Mechanical support of PMT, Electronics support of the associated components, possible cables. It can be made for each PMT or per group of PMTs |
| 8.2.2.2.3                                 | HV Supply                      | Includes cables if any   |
| 8.2.2.2.4                                 | HV distribution                | On the basis   |
| 8.2.2.2.5                                 | Slow-Control/Monitoring        | HV control, HV monitoring, Current monitoring  |
| 8.2.2.2.6                                 | Safety control                 | ex : Zener diode   |
| 8.2.2.3                                   | Pre-Amplification              | Electronic Components, Support (Electronic Board with associated small components)   |
| 8.2.3                                     | Signal Processing              |  |
| 8.2.3.1                                   | Digitization                   |  |
| 8.2.3.1.1                                 | Electronic Board               |  |
| 8.2.3.1.2                                 | Support                        | Electronic Board + Mechanical Support + Connectors   |
| 8.2.3.1.3                                 | Software                       | Front-End online acquisition   |
| 8.2.3.2                                   | Trigger                        |  |
| 8.2.3.2.1                                 | L0                             | Electronic components, Support (Electronic board, can be 8.2.3.1.2)  |
| 8.2.3.2.2                                 | L1                             | Electronic components, Support & cables (Electronic board, connectors, cables; can be 8.2.3.1.2), Software                                     |
| 8.2.3.2.3                                 | L1 Distribution                | Electronic components (can be only cables), Support & cables (Electronic Board + Mechanical Support + Connectors + Cables),                    |
| 8.2.3.2.4                                 | Array Trigger Interface        | Ex : Time Distribution system, only a cable and a local GPS clock  |
| 8.2.3.3                                   | Electronic Interface           | Electronic components, Support & cables (Electronic board + Mechanical support + Connectors + Cables),   |
| 8.2.4                                     | Data Acquisition               | Ex : BackPlane Board, Power Distribution Board, CAT6 Board, ...  |
| 8.2.5                                     | Calibration systems            | Electronic Components, Support & cables (Mechanics (Ex: the rear racks) + Cables (Ethernet) + Connectors),                                     |
| 8.2.5.1                                   | Electronic Calibration System  | Ex: specific device (Mylar plate); external trigger delivered by a specific device (1PMT+elec) or just a cable input                           |
| 8.2.5.2                                   | Positioning Calibration System | LEDs+Control ; white screen; ...   |
| 8.2.6                                     | Environmental Protection       |  |
| 8.2.6.1                                   | Sealing                        |  |
| 8.2.6.1.1                                 | Camera Skin                    |  |
| 8.2.6.1.2                                 | Entrance Window                | Optical component, Mechanical support  |
| 8.2.6.1.3                                 | Lids                           | Front, Lateral, Rear: Mechanical structure, Automatism / Control (includes cables), Software   |

# Analyse fonctionnelle

**Elle permet d'avoir une vision claire des exigences attendues du produit.**

**Et ainsi :**

1. d'aboutir sur un **cahier des charges** précis du produit attendu,
2. de démarrer une **analyse des risques** (AMDEC PRODUIT) afin d'identifier tout défaut potentiel engendrant le non-respect des spécifications,
3. de démarrer une analyse de la valeur afin d'optimiser le coût.



**But : Obtenir un produit qui ne réponde qu'aux spécifications demandées.**

« Il ne sert à rien d'avoir un produit, ou composants de produit, ayant plus de fonctions que nécessaire car celles-ci auront un coût. »

- **Laisser un historique qui explicite le pourquoi des solutions techniques retenues dans la phase de conception**
- **Intégrer plus facilement les évolutions de la définition des besoins**

**L'Analyse Fonctionnelle n'est pas une fin en soi, mais une étape dans le processus de conception d'un produit ou d'un système.**

# Analyse fonctionnelle : Jusqu'où aller ?

**Objet de l'analyse fonctionnelle = gagner du temps**

- **La question du niveau de détail approprié est donc capitale :**

1- Le fondement de l'Analyse Fonctionnelle étant d'éviter les oublis, l'exhaustivité est indispensable s'agissant des bases de l'Analyse Fonctionnelle besoin.

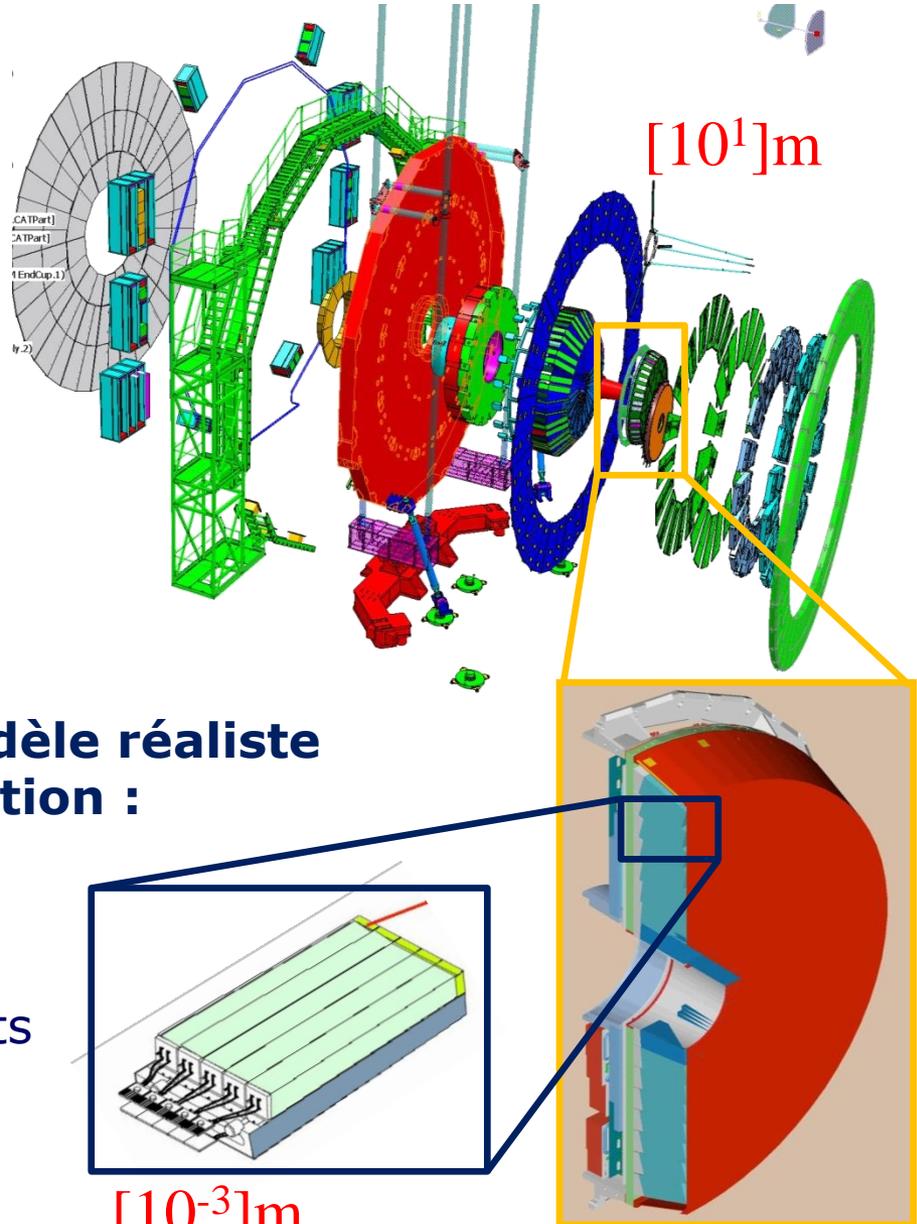
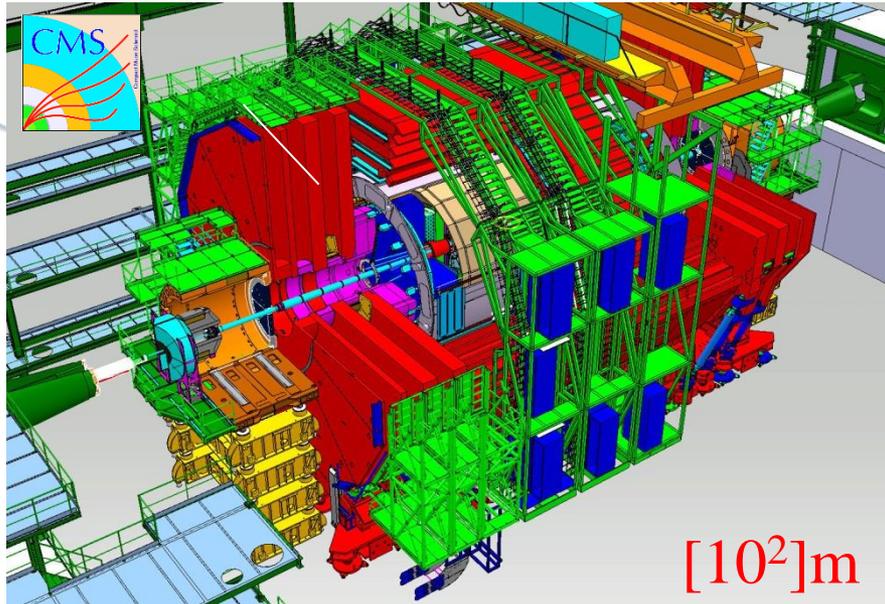
N'oublier aucune situation de vie, aucun élément de l'environnement, aucune fonction....

**Les fonctions importantes** doivent être **parfaitement traitées**.

2- L'approfondissement des niveaux de chaque critère est à doser selon les besoins.

En particulier pour l'Analyse Fonctionnelle produit, que l'on étudie rarement dans ses moindres détails.

# La Conception de formes : CAO 3D



la **CAO 3D** permet d'obtenir un modèle réaliste tout au long de la phase de conception :



- Dimensionnement réel des éléments
- Implantation & environnement
- Définition des interfaces
- prise en compte des câblages

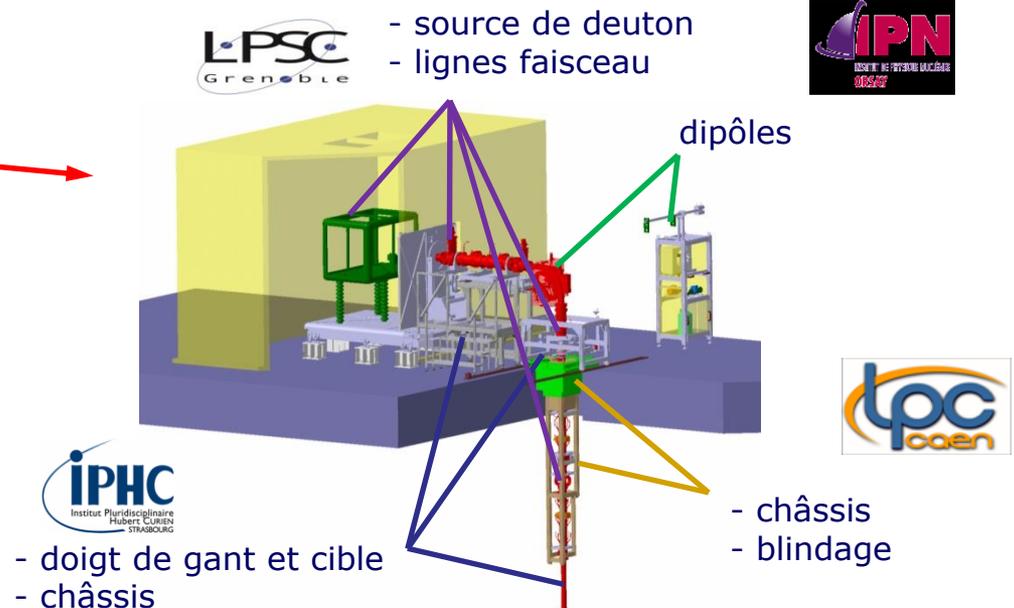
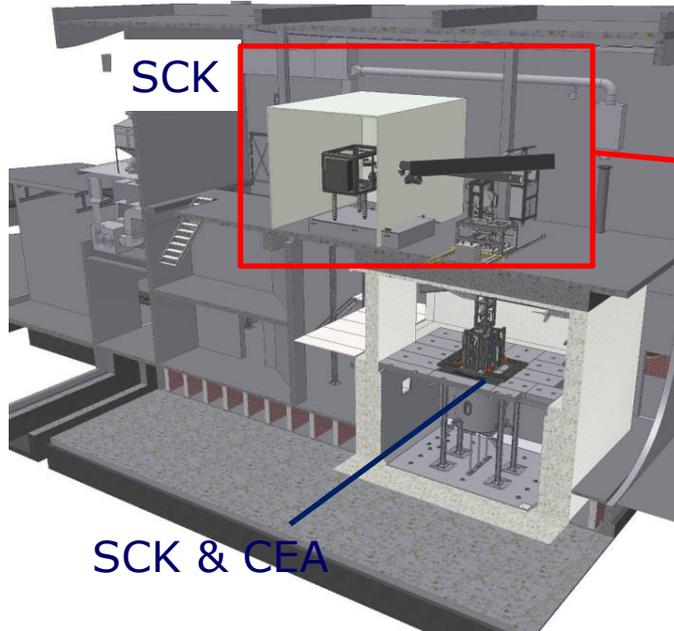
# CAO 3D : échanges/collaborations plus poussées

**CATIA V5 avec Smarteam (PLM) : première version de gestion de cycle de vie d'un produit, outil de validation, de travail en équipe,...**

Exemple d'un Projet IN2P3 : GUINEVERE/ADS

(démonstrateur de réacteur nucléaire sous-critique dont la réaction en chaîne est entretenue par des neutrons produits par un accélérateur)

- **Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (SCK)** - Belgique : accueil expérience, génie civil, cœur, servitudes, intégration
- **CEA** : combustible, structure du cœur
- **IN2P3, 4 laboratoires** : accélérateur et source de neutrons



# Le dimensionnement

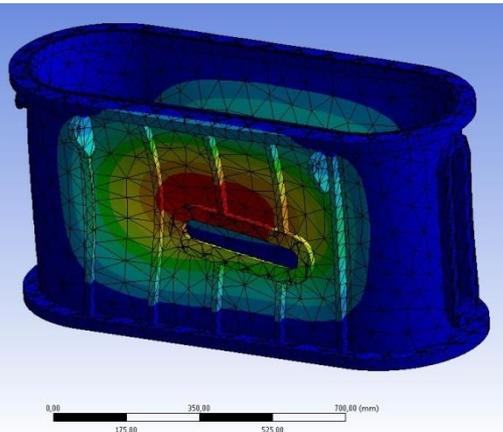
**Objectif :** analyser les comportements mécaniques, thermiques, fluidiques, d'objets **soumis à des sollicitations** afin de dimensionner correctement les détecteurs dans leur environnement

## Calculs par éléments finis :

Méthode numérique pour obtenir le **comportement** mécanique d'objets ou système, par la **discrétisation** de la géométrie en éléments simples (maillage).

Utile pour les **problèmes complexes** (géométries, charges et propriétés des matériaux) où des solutions **analytiques** ne peuvent pas être obtenues.

*Déformation d'une enceinte sous vide (GALOP)*

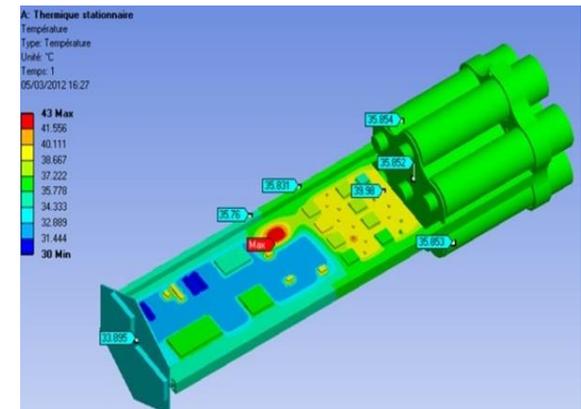


**ANSYS 18**



Elasticité linéaire / non linéaire  
(statique et dynamique)  
Thermique linéaire / non linéaire  
(stationnaire et transitoire)  
Thermofluidique  
(CFX et Fluent )

*Comportement thermique d'une carte électronique (NECTArCam)*



# Le dimensionnement : principe de calcul par EF

## Processus de calcul (cas statique)

$$\{F\} = [K] \cdot \{U\}$$

Vecteur chargements  
 Dim = F(dll)

Matrice de rigidité (dll x dll)

Vecteur déplacements  
 Dim = F(dll)

$\{F\}$  est connu (chargements)

$[K]$  est connu (géométrie, propriétés matériaux...)

$\{U\}$  doit être calculé (déplacements)

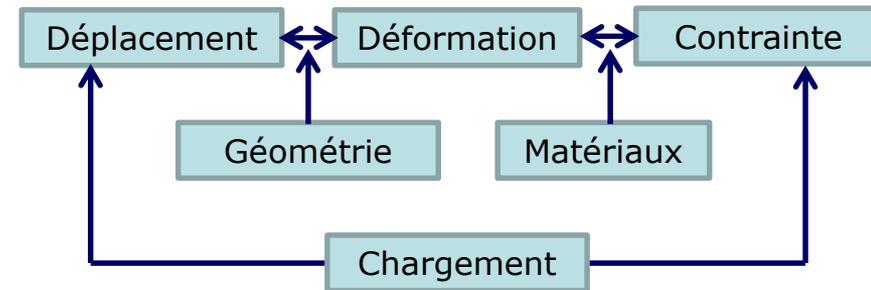
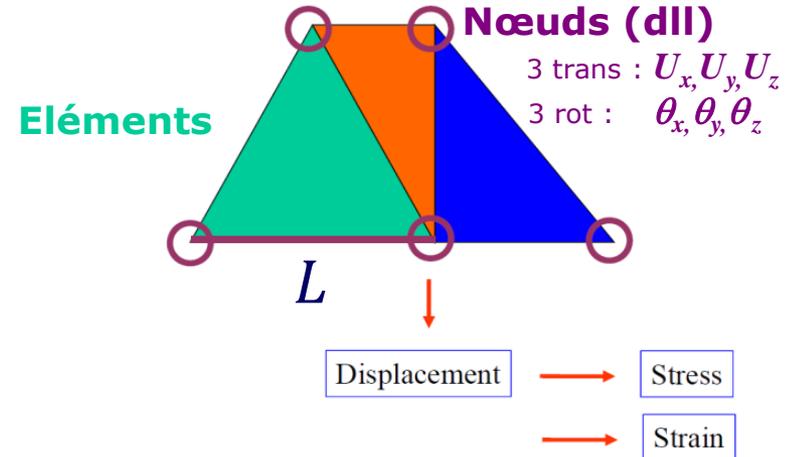
Cette opération est résolue mathématiquement en **inversant la matrice** de rigidité :

$$\{F\} = [K] \cdot \{U\} \rightarrow \{U\} = [K]^{-1} \{F\}$$

$\{U\}$  connu, calcul des quantités dérivées :

- Déformations :  $\{\epsilon\} = [A] \cdot \{U\}$

- Contraintes :  $\{\sigma\} = [D] \cdot \{\epsilon\}$



suivant les principes :

$$\epsilon_i = \frac{\Delta U_i}{L}$$

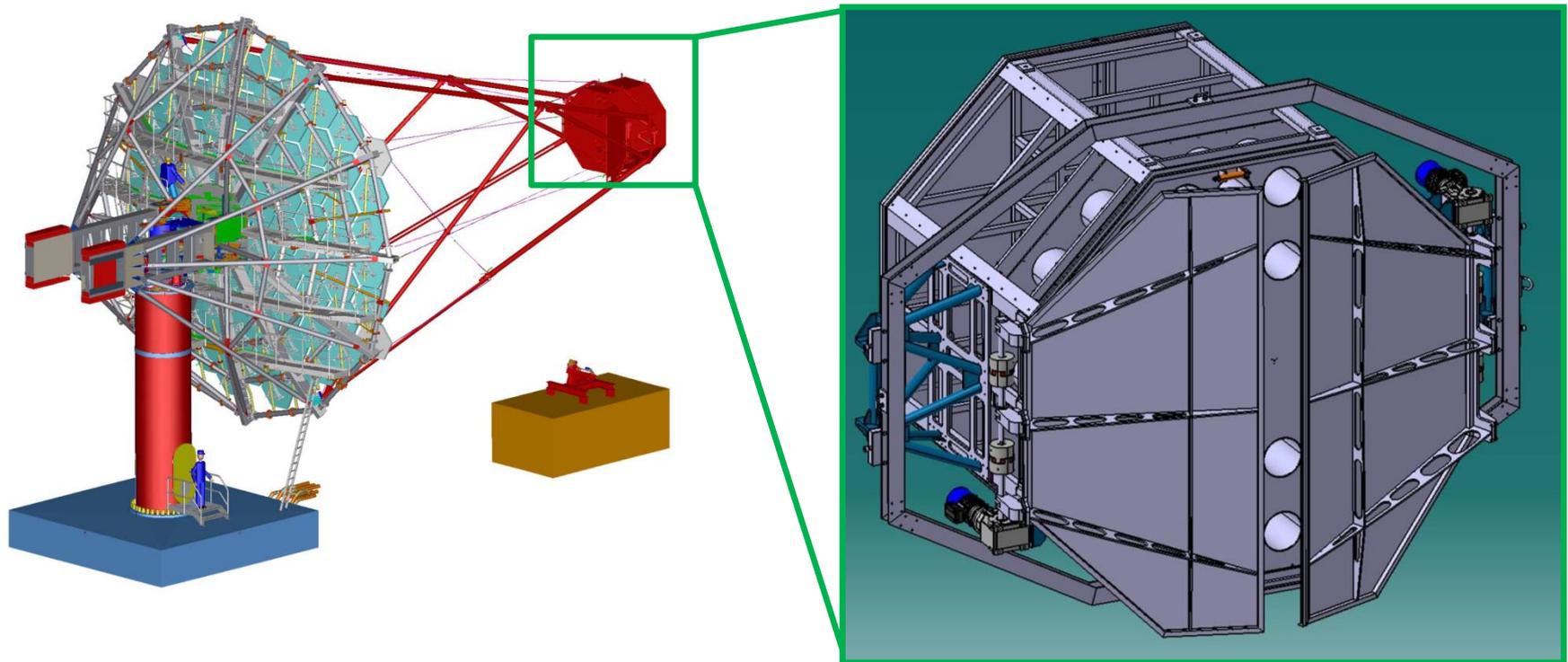
$$\sigma_i = E \cdot \epsilon_i$$

# Le dimensionnement : exemples

## ex 1 : statique non-linéaire & thermomécanique

### Projet Gate : prototype de caméra pour le projet MST CTA

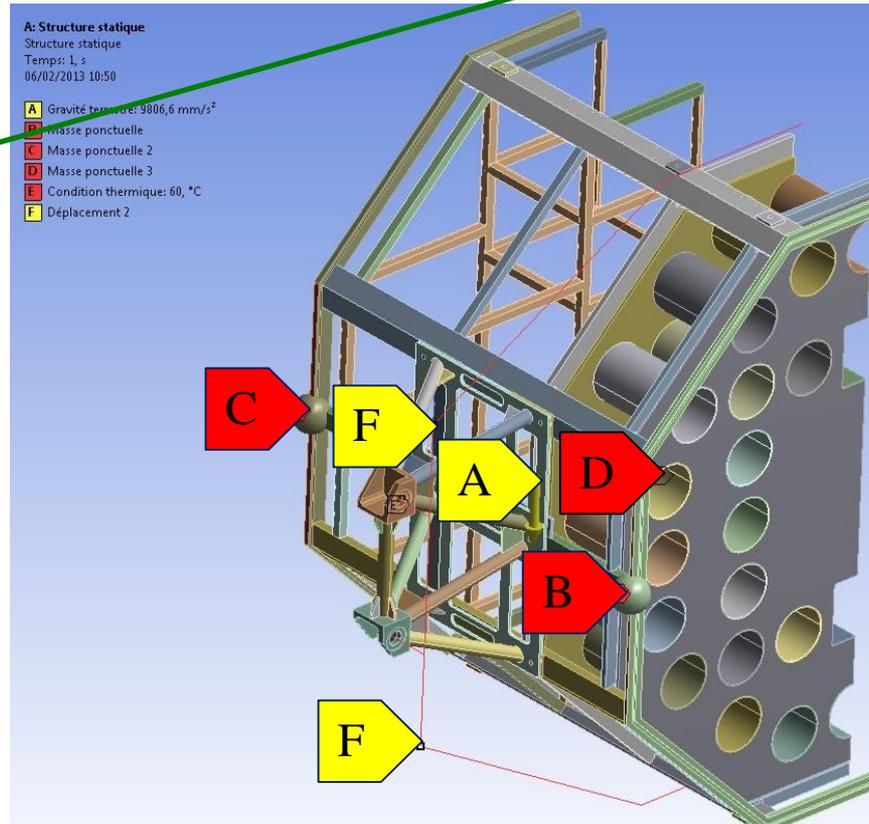
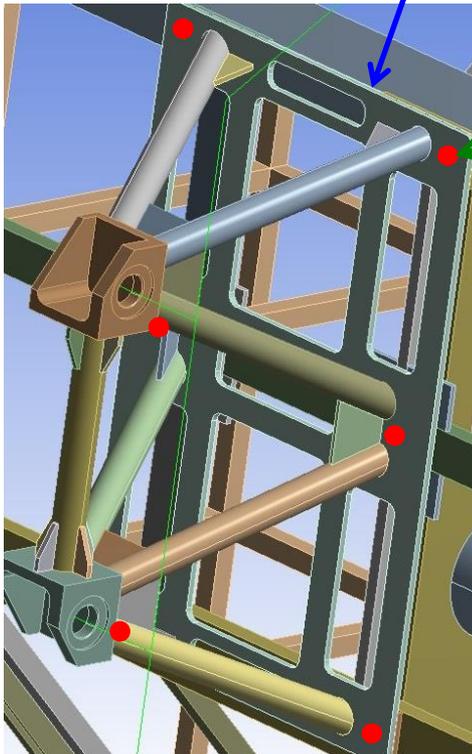
**Problématique** : Prédiction des contraintes liées à la dilatation différentielle entre la caméra aluminium et le cadre acier du télescope lors des variations de température annuelle ( $-20^{\circ}\text{C}$  à  $+60^{\circ}\text{C}$ )



# Ex 1 : modélisation & conditions limites

## Simplifications :

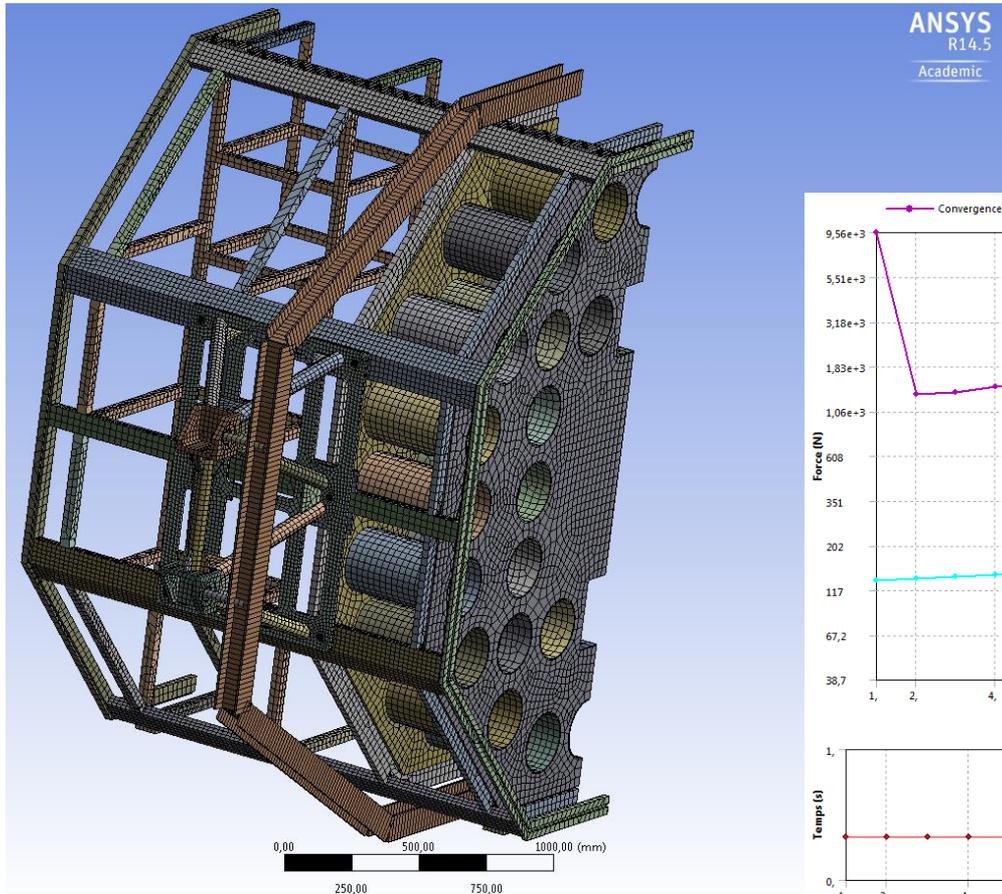
- **Nettoyage** du modèle (trous, petites surfaces, pièces inutiles ...) ;
- Modélisation des portes par des **masses virtuelles** (A & B) ;
- Pas de vis : ensemble des pièces parfaitement assemblées
- Interface entre le corps de la caméra et les pièces attaches : **contact sans frottement**, transfert des efforts par **6 goupilles**
- cadre : **modèle poutre** utilisé (section I)
- Modèle **symétrique** (demi modèle)



- A** Gravity -Z (0°)
- B** Point mass : 140 Kg
- C** Point mass : 45 Kg
- D** dead mass : 400 Kg
- E** Thermal conditions :  
 $\Delta T = 0^\circ\text{C}$   
 $\Delta T = -30^\circ\text{C}$  (10 → -20)  
 $\Delta T = +50^\circ\text{C}$  (10 → 60)
- F** Displacement :  
X = 0  
Y = free  
Z = 0

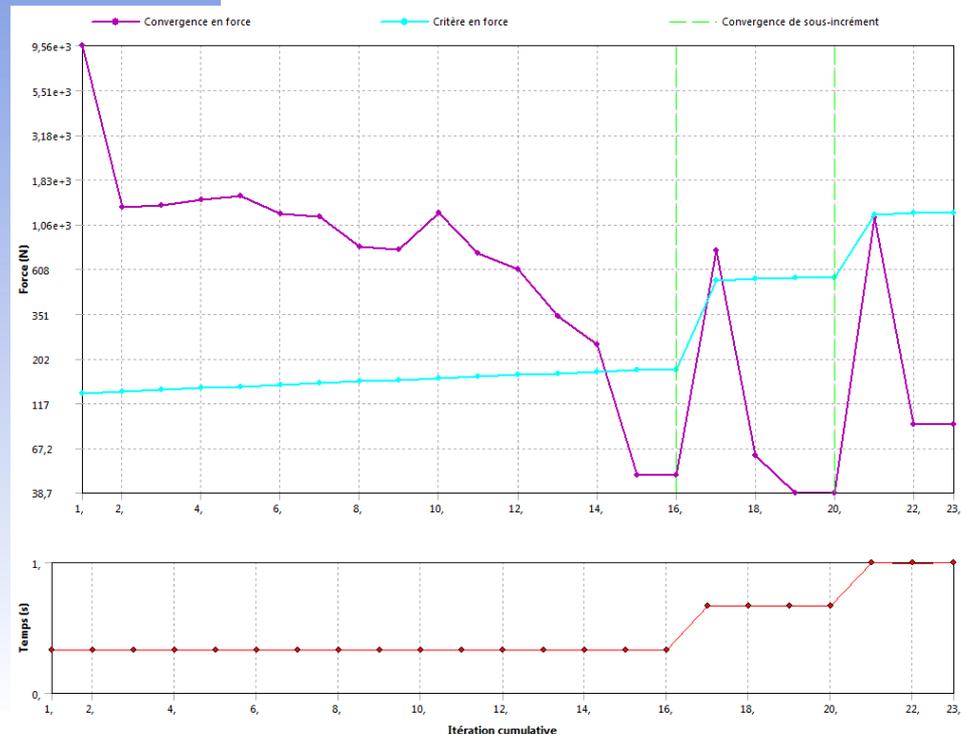
# Ex 1 : maillage & solver

- **maillage** suivant la méthode HEX. dominant avec contrôle des tailles des mailles
- tous les composants sont des **modèles solides**
- Nombre de nœuds : 389680 ; d'éléments : 104657

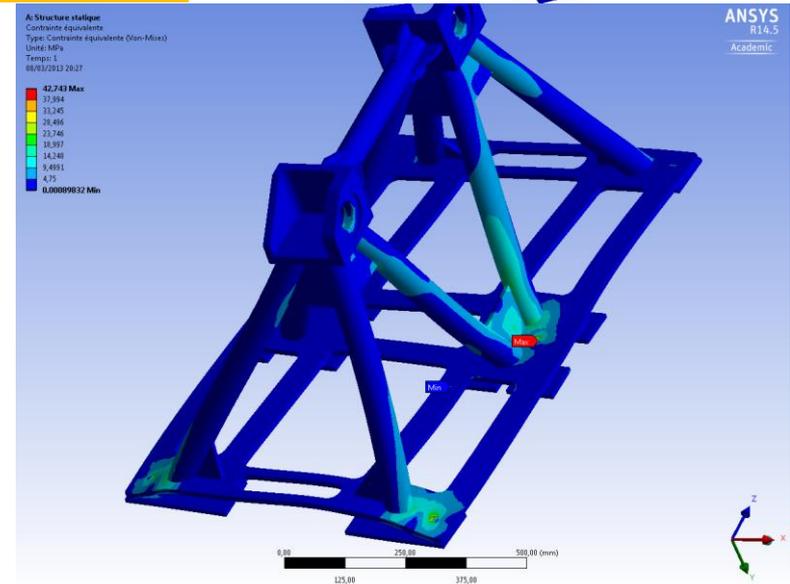
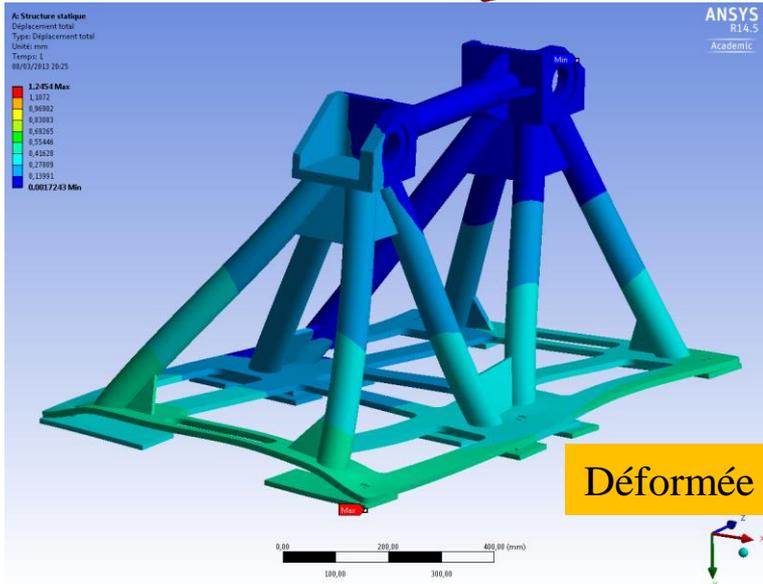
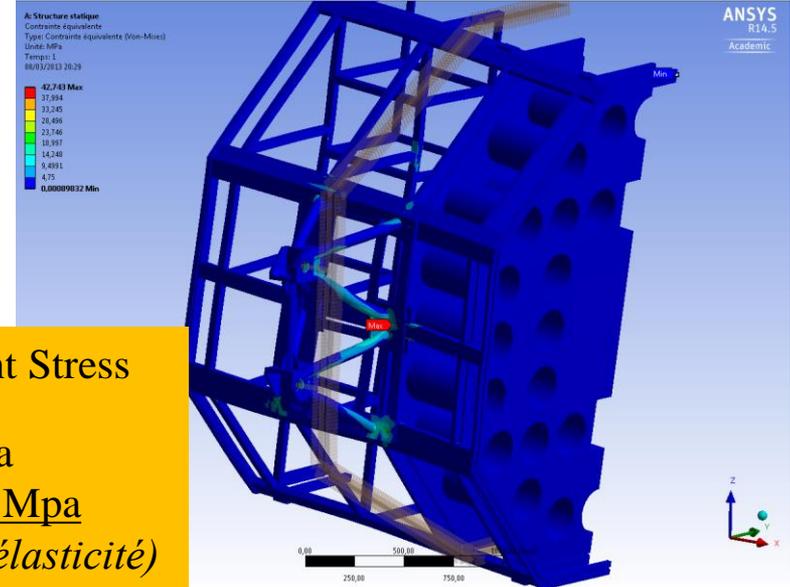
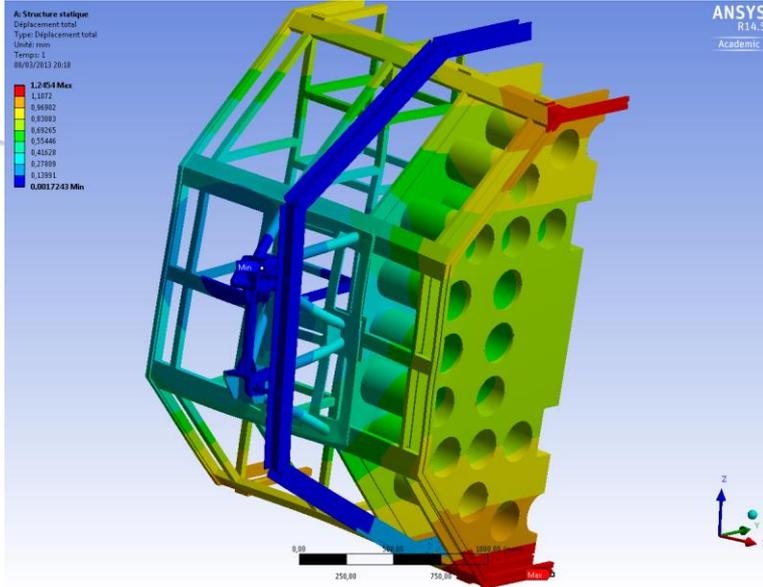


```
----- END ANSYS STATISTICS -----
```

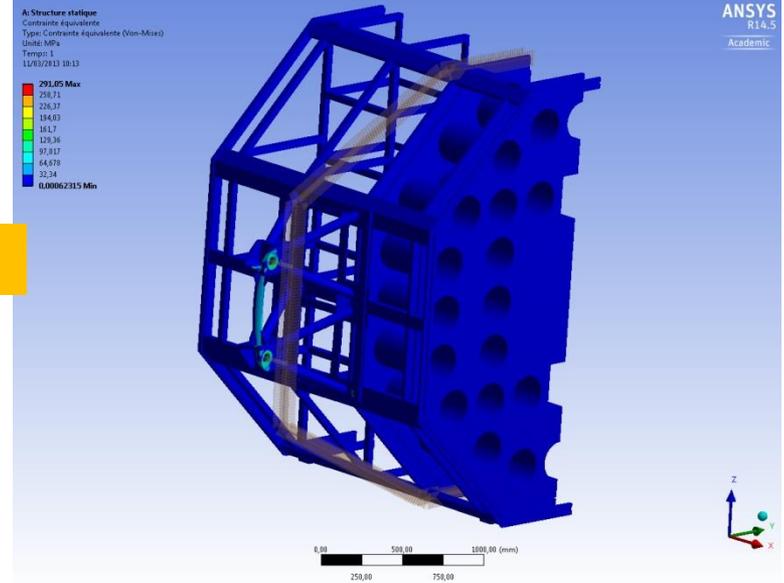
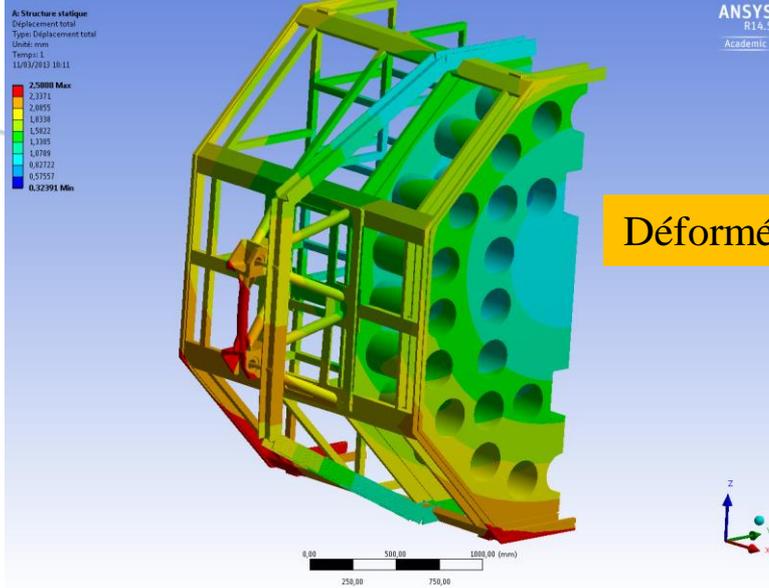
| ANSYS RUN COMPLETED     |            |                             |            |
|-------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| Release 14.5            | UP20120918 | WINDOWS x64                 |            |
| Database Requested(-db) | 512 MB     | Scratch Memory Requested    | 512 MB     |
| Maximum Database Used   | 345 MB     | Maximum Scratch Memory Used | 5308 MB    |
| CP Time (sec) =         | 6259.181   | Time =                      | 18:01:00   |
| Elapsed Time (sec) =    | 7195.000   | Date =                      | 02/11/2013 |



# Ex 1 : résultats ( $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ )

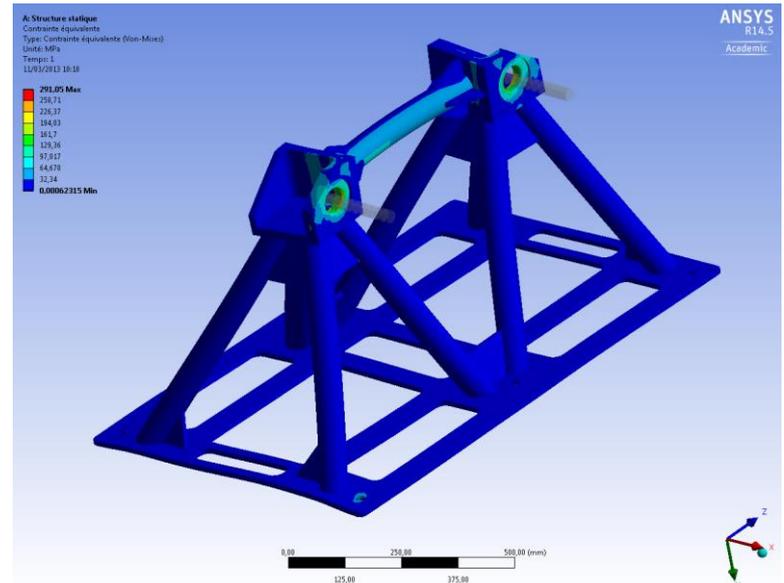
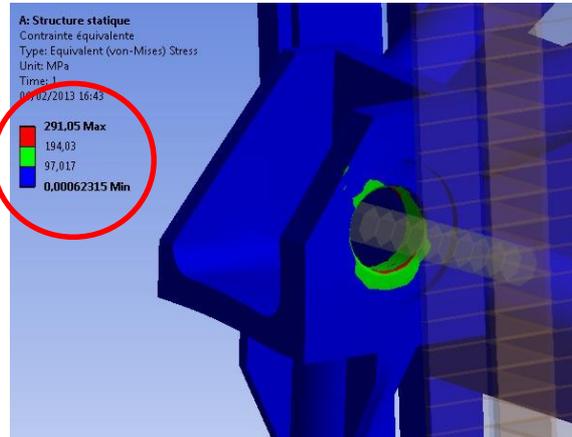


# Ex 1 : résultats ( $\Delta T = +50^\circ\text{C}$ )



Equivalent Stress  
 (green)  
 $97 < \sigma < 194 \text{ Mpa}$

**DANGER !**  
**À modifier !**

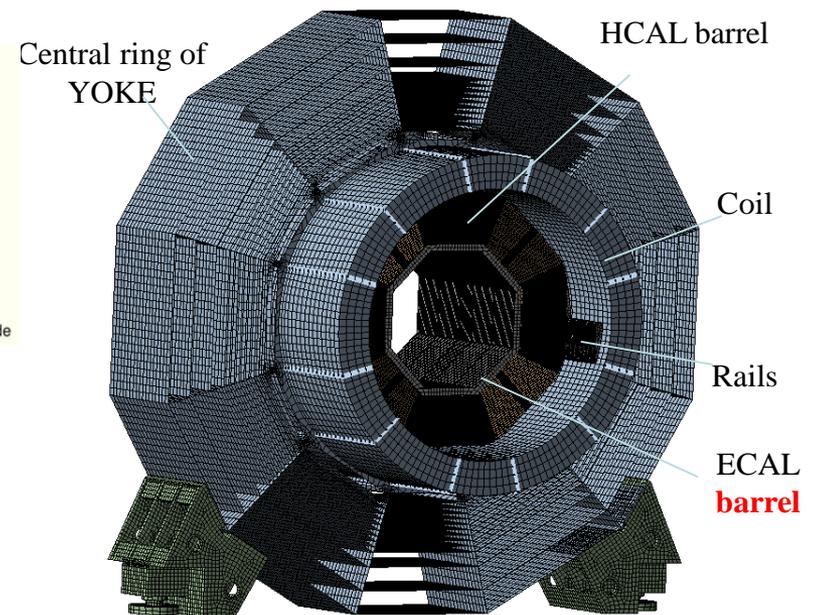
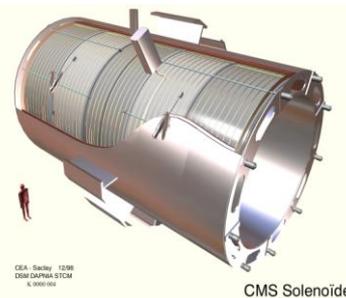
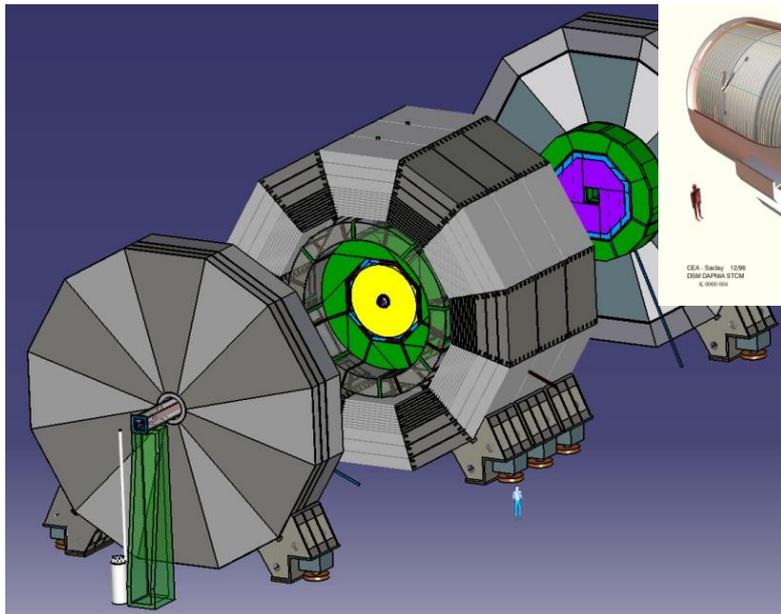


# Ex 2 : comportement sismique d'une structure de détecteur

## Projet ILD : détecteur pour le futur collisionneur linéaire ILC

**Problématique** : Etudier le comportement dynamique de la structure principale, soumis à des **contraintes sismiques** liées au site potentiel de l'expérience (ex: Japon).

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



T. Pierre-Emile  
(LLR)

ILD model :  
Mass = 3100 t

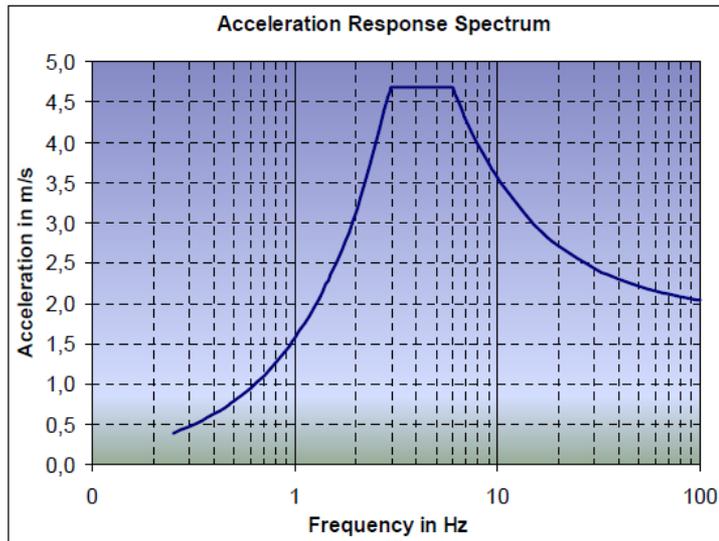
# Ex 2 : modélisation & conditions limites

## • Simplifications :

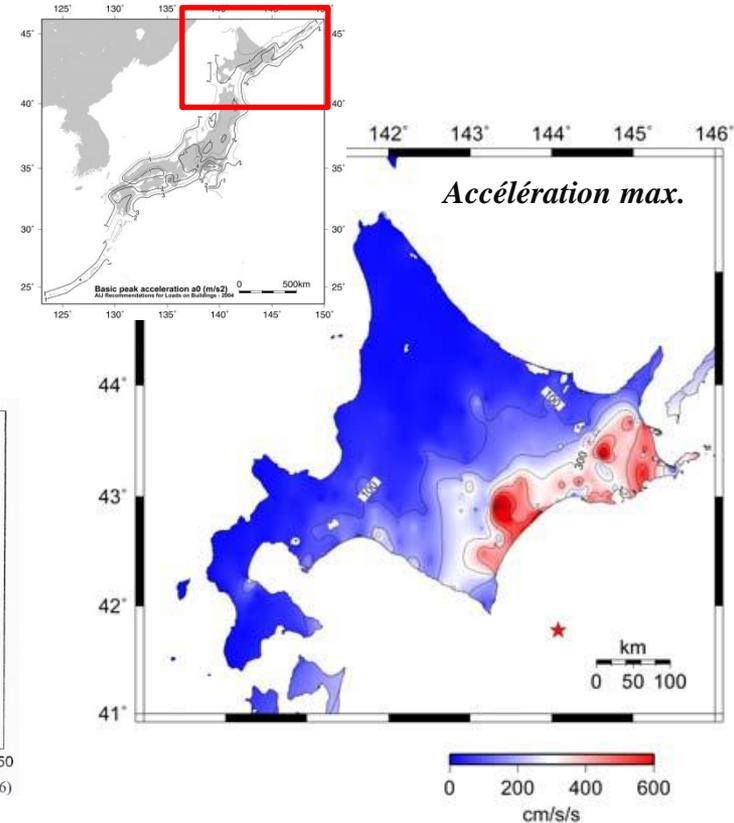
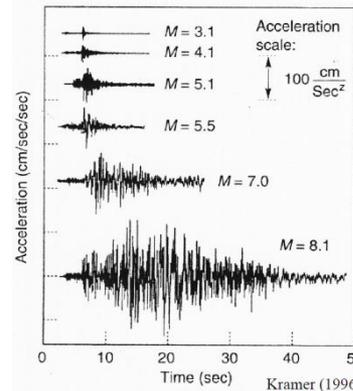
- « à la CMS » : **Anneau central du Yoke** supporte les éléments internes (cryostat, bobine, calorimètres)
- Modélisation des CAL en modèle coque
- La bobine est attachée au cryostat par des ressorts

## • Cas de charges :

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



AIJ - 1993



## Parameters for acceleration spectrum :

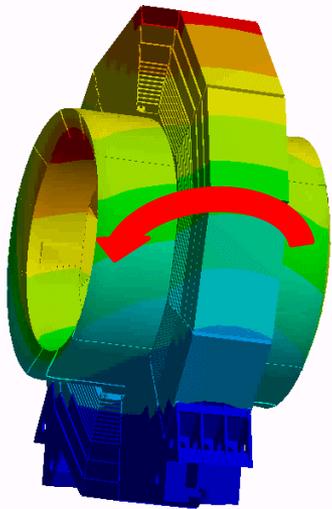
- Peak Ground Acceleration:  $A_0 = 1.5 \text{ m/s}^2$
- Damping ratio for steel structure: 2%
- Soil type: hard soil

## Ex 2 : Résultats premiers modes propres

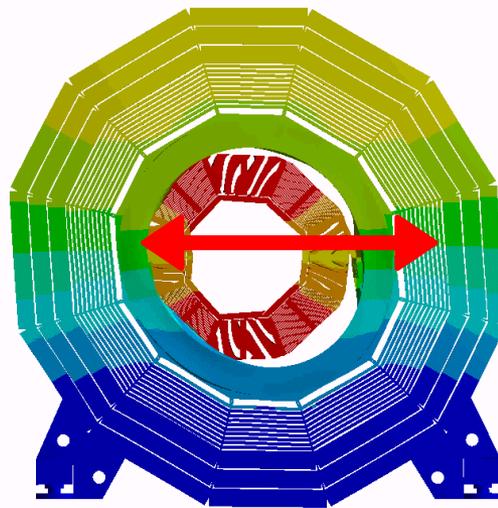
La **vibration** de tous les points d'un système mécanique à une fréquence donnée est appelée **mode propre** de vibration. La fréquence à laquelle le système vibre est appelée **fréquence propre**, elle s'exprime en hertz (Hz).

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

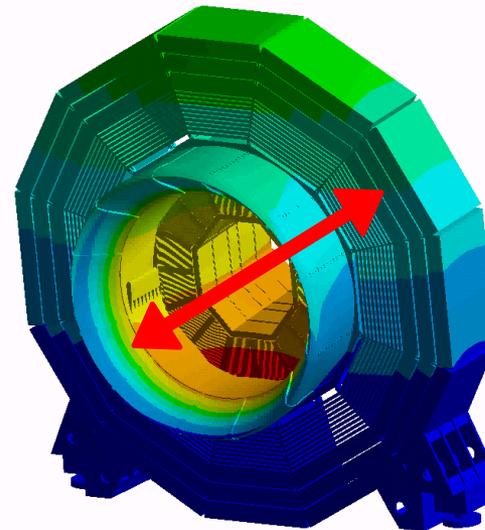
Mode 1 @ 2,3Hz



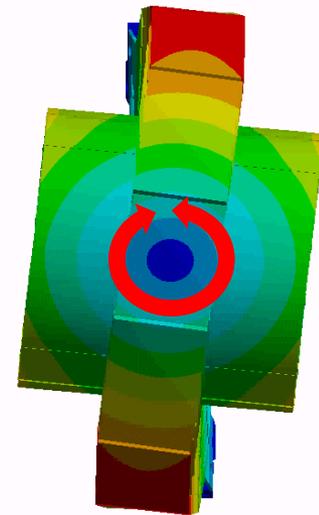
Mode 2 @ 3,05Hz



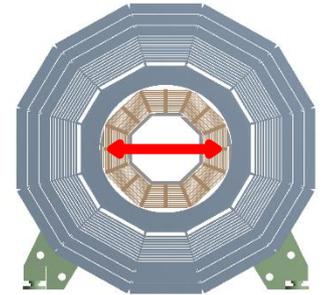
Mode 3 @ 3,8Hz



Mode 6 @ 7Hz

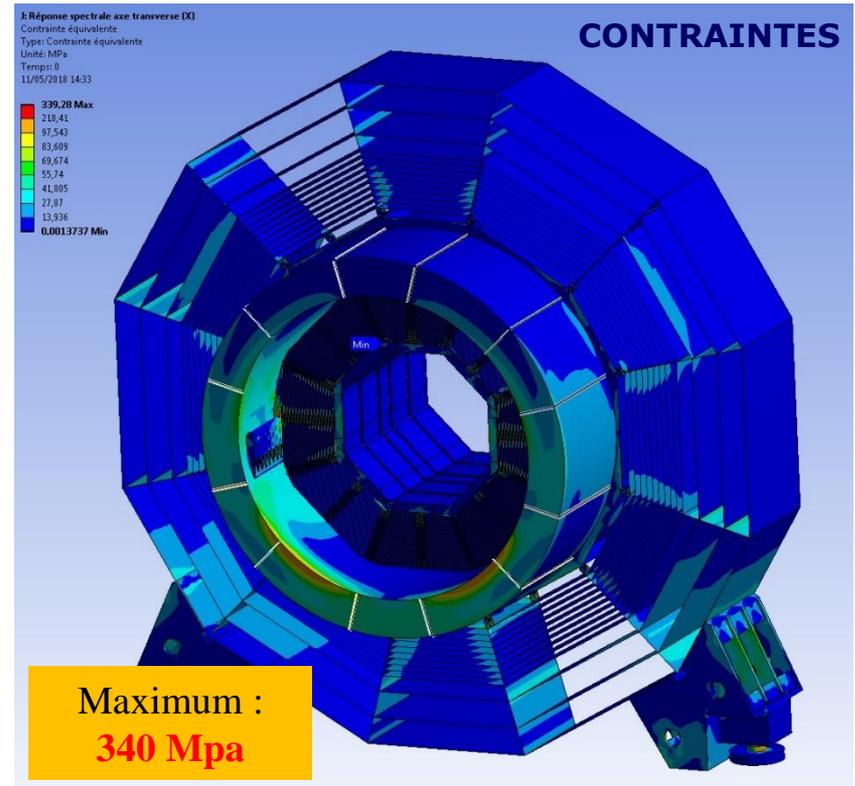
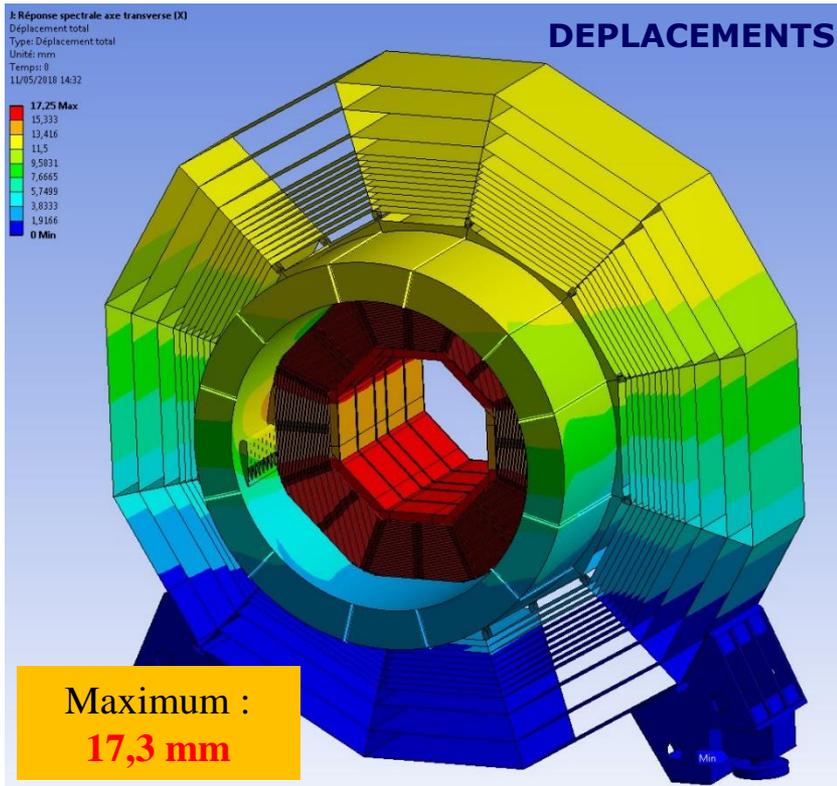


# Ex 2 : Résultats



- Exemple : Le spectre d'accélération appliqué transversalement :**

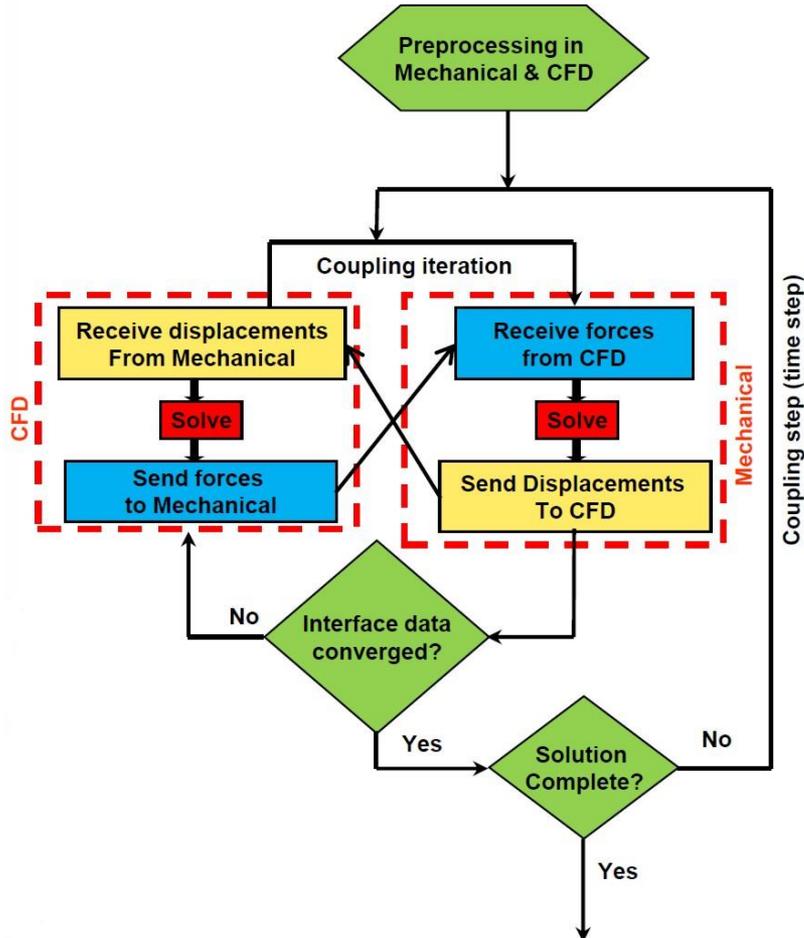
- Déplacement de l'ordre de 17mm, localisé au niveau des calorimètres. Le Yoke plus rigide se déforme moins : Impact important sur le design des rails de supports (340 Mpa)



# Le dimensionnement : vers les calculs multi-physiques

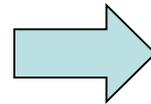
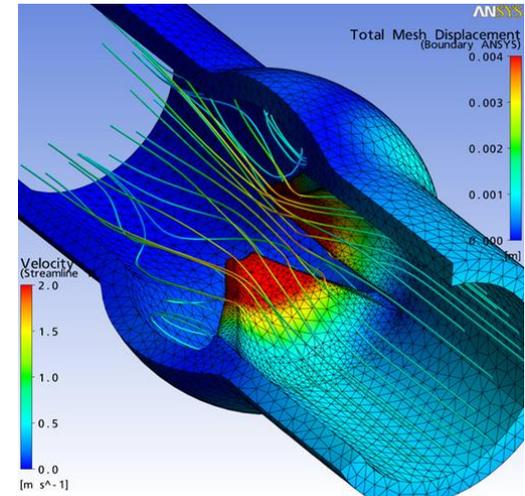
- Analyse du comportement d'un modèle dépendant de plusieurs domaines de physique : **calculs couplés** nécessaires

Description d'un calcul couplé avec ANSYS

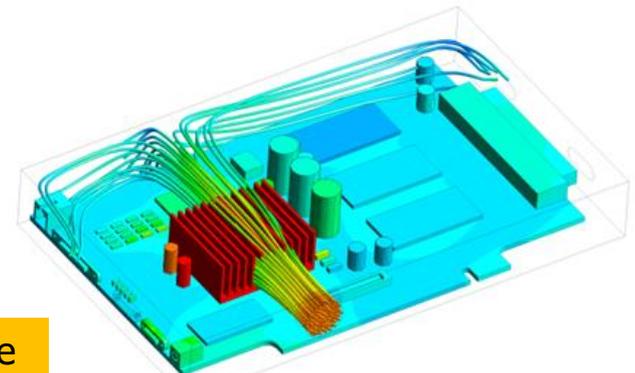


Interaction fluide-structure

Structure + Fluide



Thermique + Fluide



Refroidissement de carte électronique par convection forcée

# Le dimensionnement : marges de sécurité

- La simulation par éléments finis 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                      |

# Le dimensionnement

Outre les E.F., le dimensionnement analytique des composants mécaniques doit généralement être fait.

Il se base sur des **formulaires** ou des **codes de calculs** applicables à des **domaines définis** :

- **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

Ils apportent un complément très intéressant aux EF car ils traitent souvent d'aspects difficiles à modéliser :

⇒ Cordon de soudure, visserie (précontrainte ou non)

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,...

# Les essais mécaniques

## Partie intégrante de la réalisation d'un détecteur, ils interviennent à plusieurs étapes :

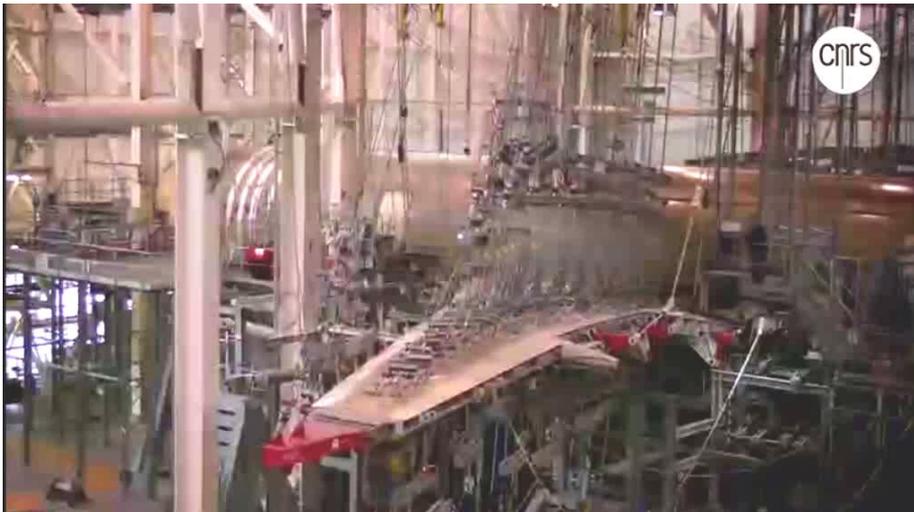
1- **Détermination** ou confirmation des **caractéristiques** mécaniques ou thermiques des **matériaux** utilisés (module d'Young  $E$ , limite élastique  $R_e$ , coef de poisson, conductivité,...).

Ces essais sont utiles pour obtenir des valeurs plus réalistes à incorporer dans les modèles numériques E.F.

2- **Validation** ou **qualification** du comportement d'un modèle de test sous certaines sollicitations (statiques, thermiques, vibrations, fatigues)



*Machine de traction*



*Essais en fatigue d'une aile d'avion*

Les essais mécaniques sont **inévitables** même s'ils peuvent être complexes, longs et coûteux

# Rôle de la matière

- **La matière joue un rôle particuliers dans la réalisation des détecteurs de particules :**

les interactions particules/matière sont à la **base de la détection**.

**Exemple en calorimétrie :** La longueur de radiation  $X_0$

distance pendant laquelle l'électron ou le positon perd, en moyenne, 63,2% de son énergie par radiation. Basée sur les propriétés physiques de la matière (Nb atomique  $Z$ , Nb de masse  $A$ ) suivant l'approximation :

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

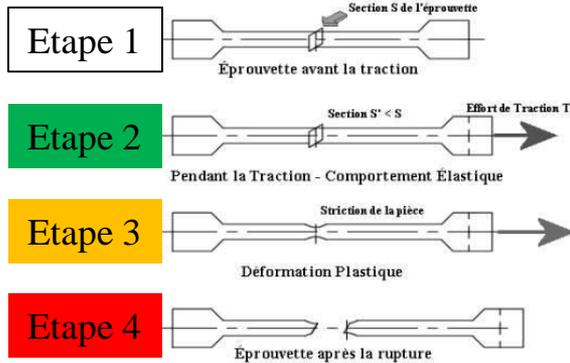
|            |       |     |     |     |      |      |      |
|------------|-------|-----|-----|-----|------|------|------|
|            | Air   | Eau | Al  | LAr | Fe   | Pb   | W    |
| Z          | -     | -   | 13  | 18  | 26   | 82   | 74   |
| $X_0$ (cm) | 30420 | 36  | 8,9 | 14  | 1,76 | 0.56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

- 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** (zone morte de détection)
  - Maintenir et positionner au mieux la matière active (plaquettes de silicium, photomultiplicateurs, scintillateurs)
  - Contraintes de **minimum de matière** : bonne connaissance des propriétés de la matière ;

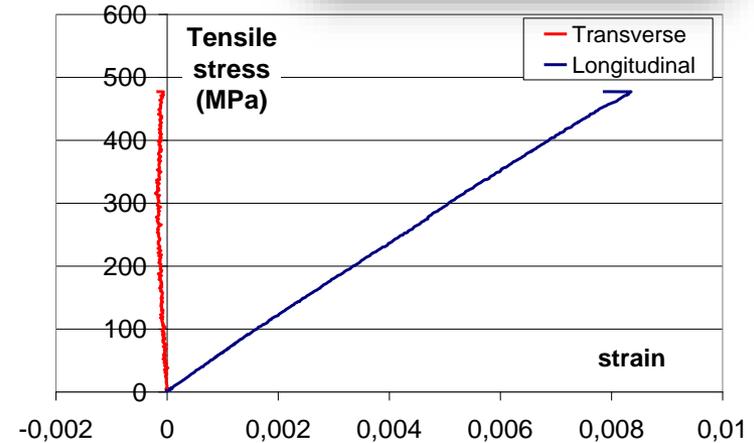
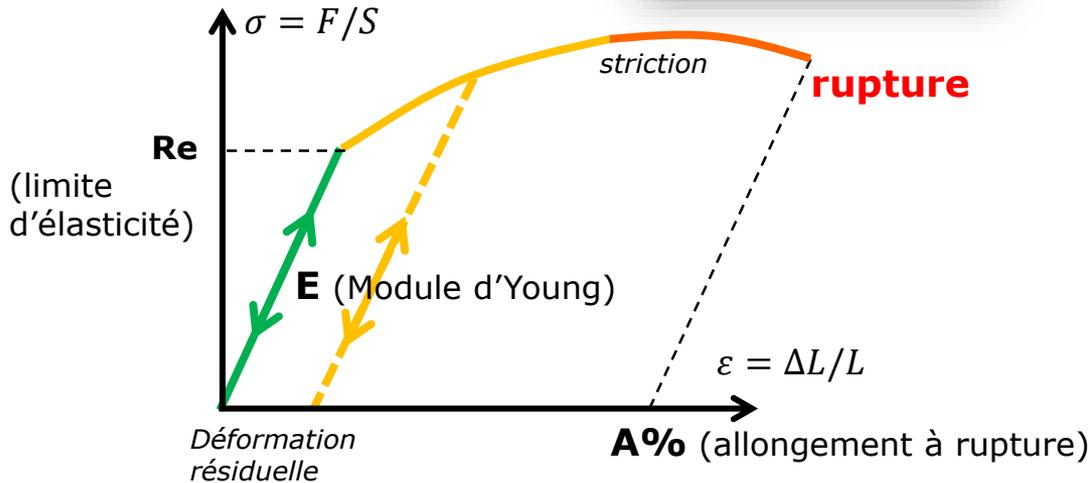
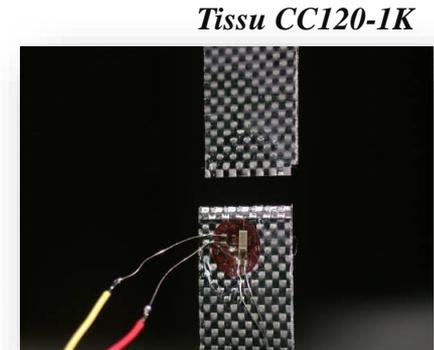
# lois de comportement des matériaux

En mécanique des milieux continus, la loi de comportement établit une relation entre les **contraintes** (pression=force/surface) et les **déformations** (allongement unitaire adimensionnel).

La déformation d'une pièce dépend de sa géométrie et de la manière dont les efforts extérieurs sont exercés sur cette pièce. Les essais doivent donc être normalisés : éprouvettes normalisées (géométrie, taille)



Particularité des matériaux composites



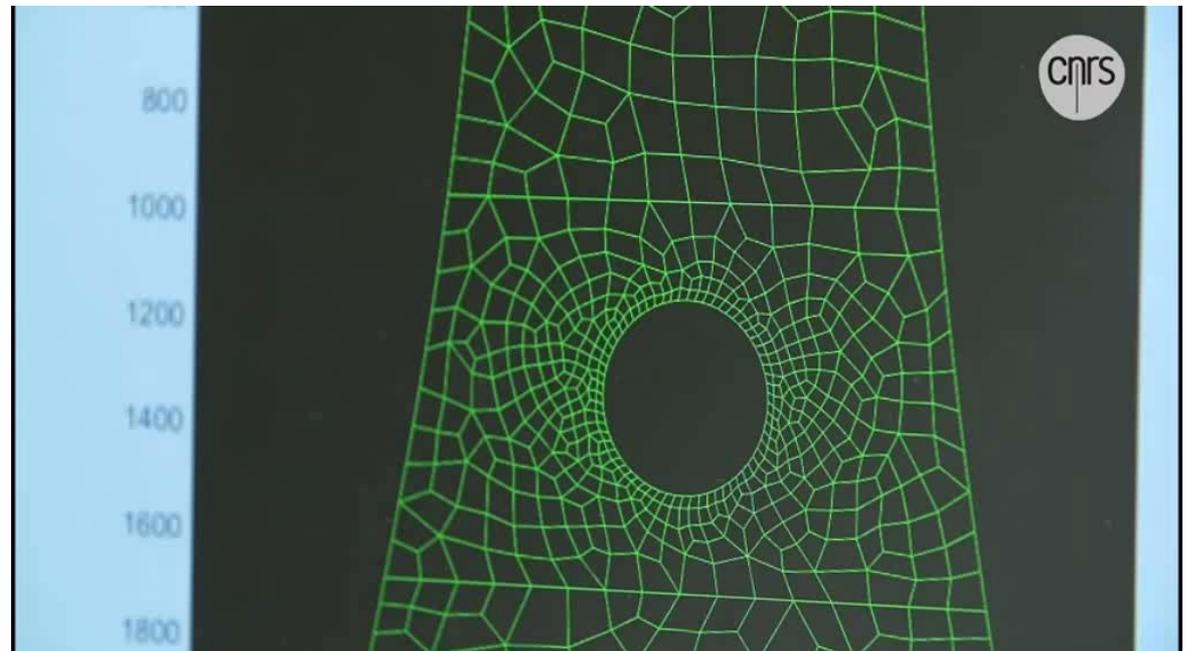
# Les essais mécaniques : Etude de la rupture

La rupture d'une pièce dépend du **matériau**, de sa **géométrie**, de la manière dont les **efforts** extérieurs sont exercés sur cette pièce et des **singularités** propres à la pièce, comme par exemple un trou.

Des essais expérimentaux doivent aussi être réalisés afin de valider le comportement mécanique simulé en fonction des singularités

## Exemple :

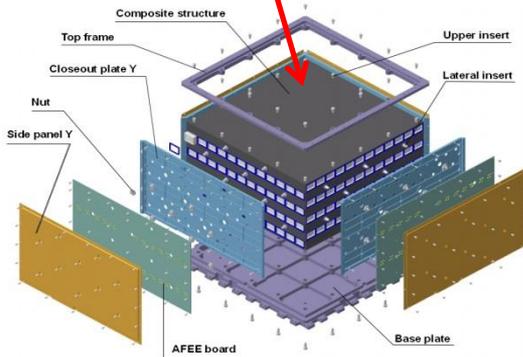
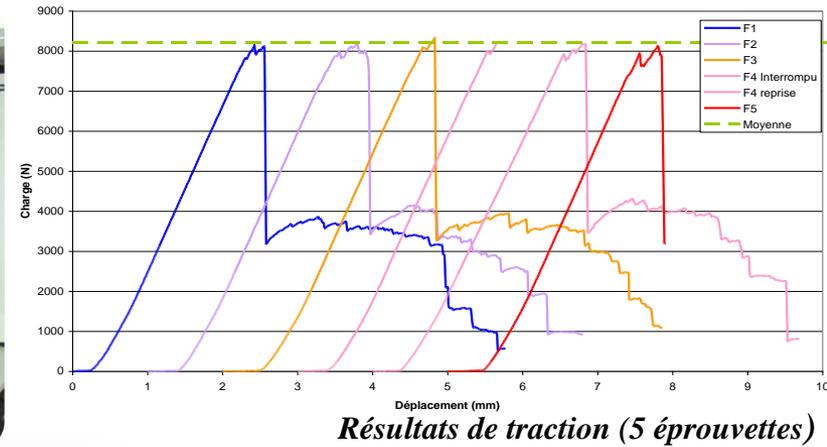
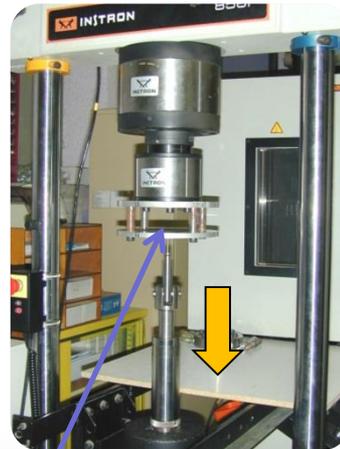
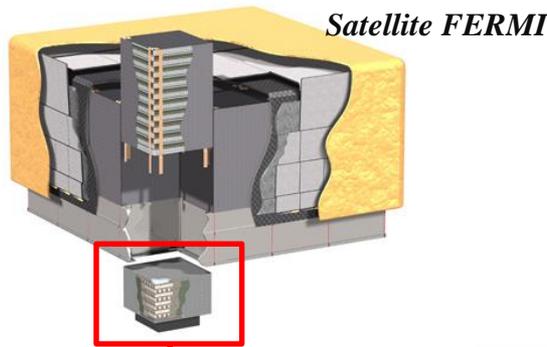
Etude de l'impact d'un trou  
(éprouvette de traction)



# Les essais mécaniques : validation/qualification

Exemples d'essais mécanique, thermomécanique, dynamique sur un module du calorimètre électromagnétique de l'expérience FERMI

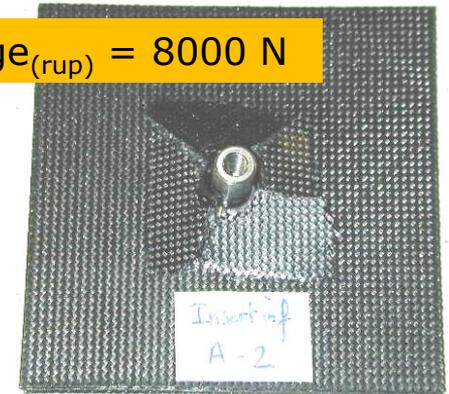
## 1- Caractérisation de l'attache inférieure (insert/composite) : (traction/torsion/flexion)



*Module ECAL (x16)*



**Charge<sub>(rup)</sub> = 8000 N**

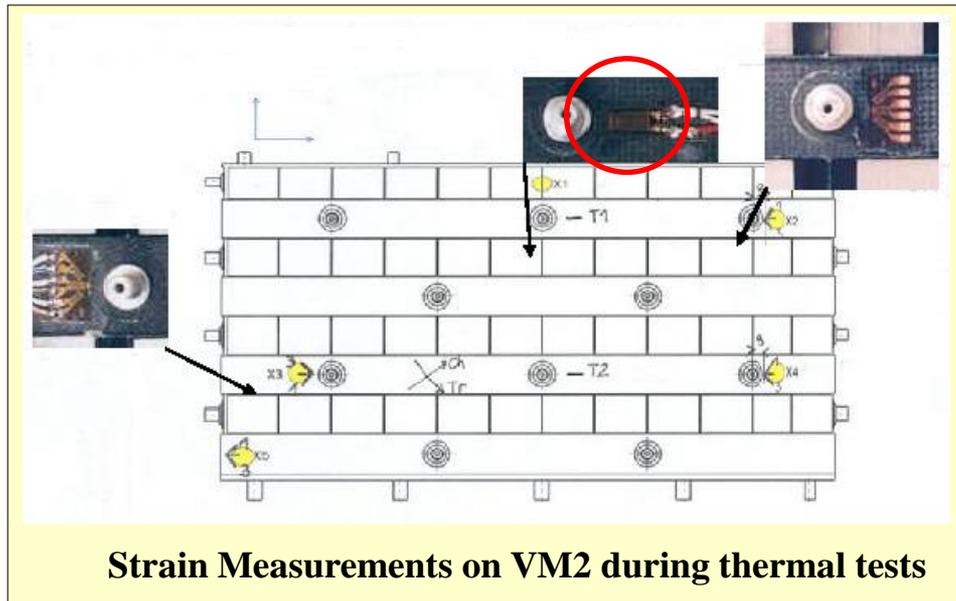


*Éprouvette de test après rupture*

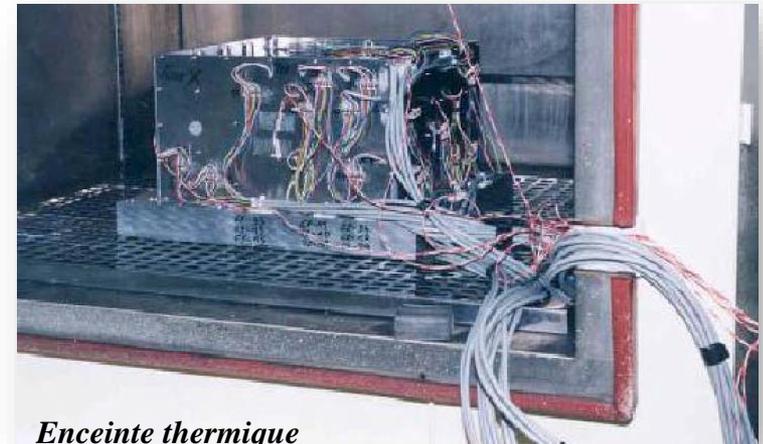
# Les essais mécaniques : validation/qualification

## 2- Tests thermomécaniques :

- 43 **Cycles thermiques** entre **-45°C et +85°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



| 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                        |

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

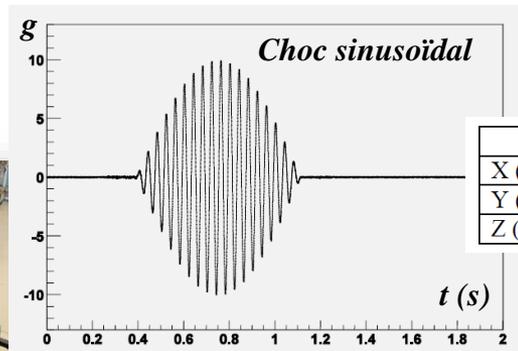
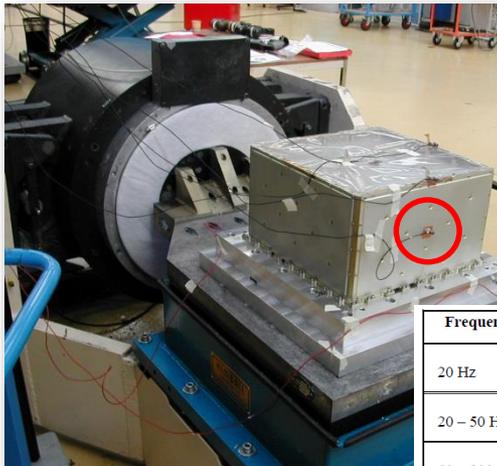
# Les essais mécaniques : validation/qualification

## 3- Essais de qualification en vibrations :

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

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

Essais sur pot vibrant  
Masse du module ~100 Kg

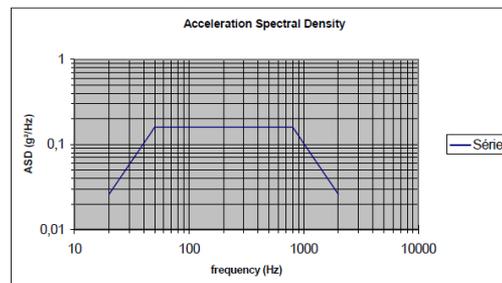


Acceleration  
X;Y : +6,8 g  
Z : +8,5 g

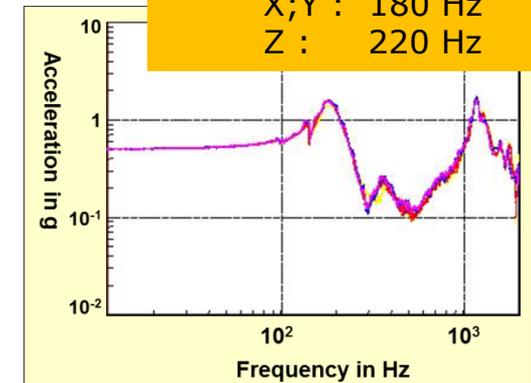
| Axis           | Frequency | Acceleration | Cycles |
|----------------|-----------|--------------|--------|
| X (Transverse) | 25 Hz     | +6.8         | 5      |
| Y (Transverse) | 25 Hz     | +6.8         | 5      |
| Z (Thrust)     | 25 Hz     | +8.5         | 5      |

| Frequency    | ASD                      |
|--------------|--------------------------|
| 20 Hz        | 0.026 g <sup>2</sup> /Hz |
| 20 - 50 Hz   | 6 dB/oct                 |
| 50 - 800 Hz  | 0.16 g <sup>2</sup> /Hz  |
| 800 - 200 Hz | -6 dB/oct                |
| 2000 Hz      | 0.026 g <sup>2</sup> /Hz |

Densité spectrale d'accélération



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



# Plan du cours

## 1ère partie

1. Introduction et généralités
2. La conception mécanique
  - a) Définition du besoin et analyse fonctionnelle
  - b) La conception de forme
  - c) Le dimensionnement
  - d) Les essais mécaniques

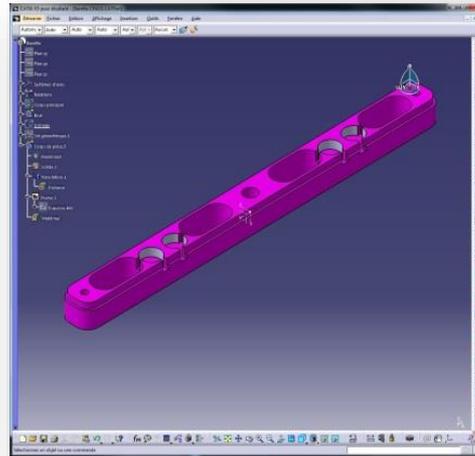
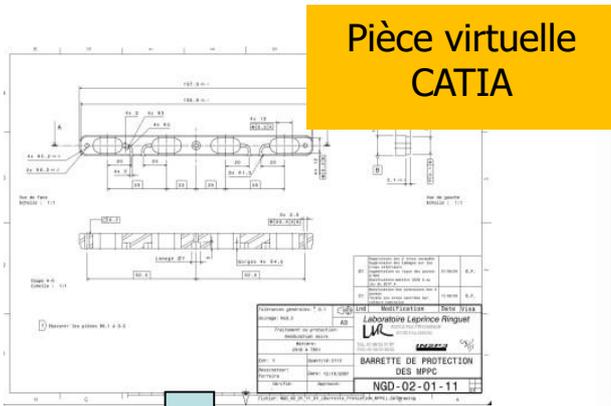
## 2ème partie

1. La fabrication
2. L'intégration des détecteurs
3. L'installation sur site
4. La métrologie

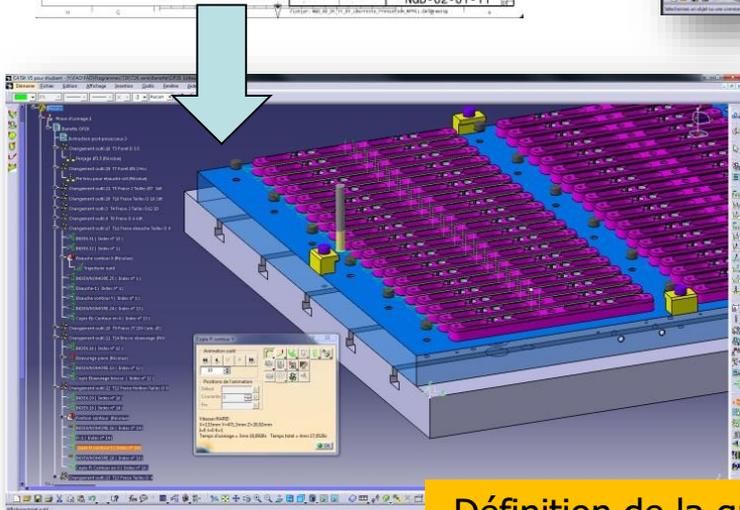


# La Fabrication Assistée par Ordinateur

Les machines d'usinage modernes intègrent des modules à **commandes numériques** de leur axes de déplacements, pilotés par ordinateur rendant possible la FAO.



*Centre d'usinage*



**Définition de la gamme & simulations d'usinage**

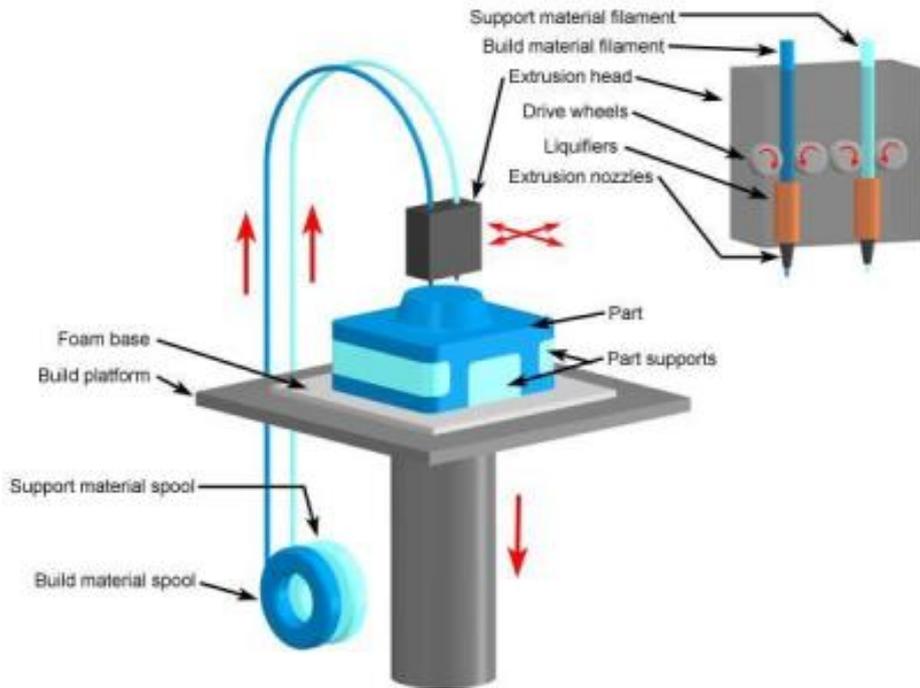


**Usinage sur machine**

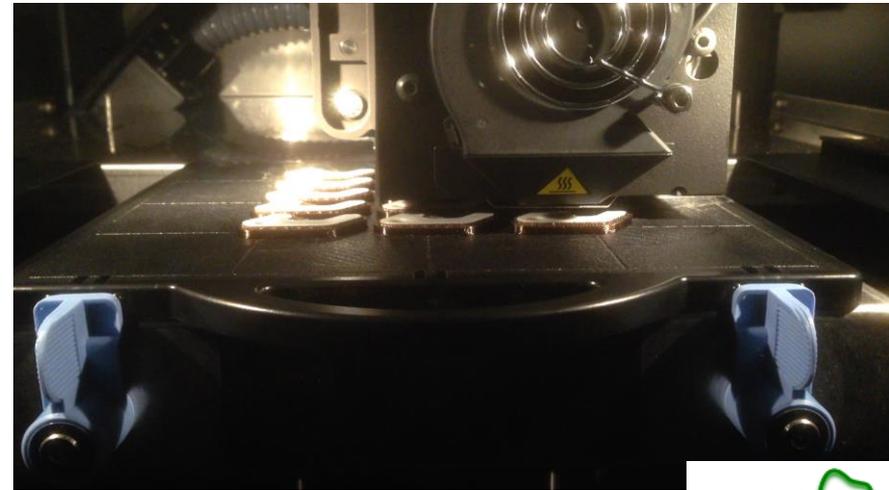
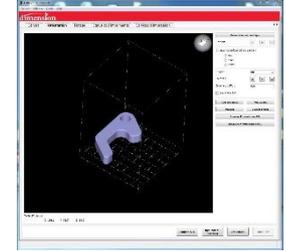
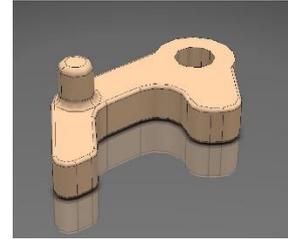


# La Fabrication additive

- Modelage par dépôt de matière en fusion FDM (Fuse Deposition Modeling)**  
**ex : Dépôt de fil fondu en ABS**



*Principe de fonctionnement*



**T2K**



Prospective sur la **FA métal** pour les laboratoires de l'IN2P3



**10 laboratoires :**

LPC, LPSC, LAPP, CPPM, SUBATECH, IPHC, LPNHE, LLR, IPNO, LAL

**17 agents :**

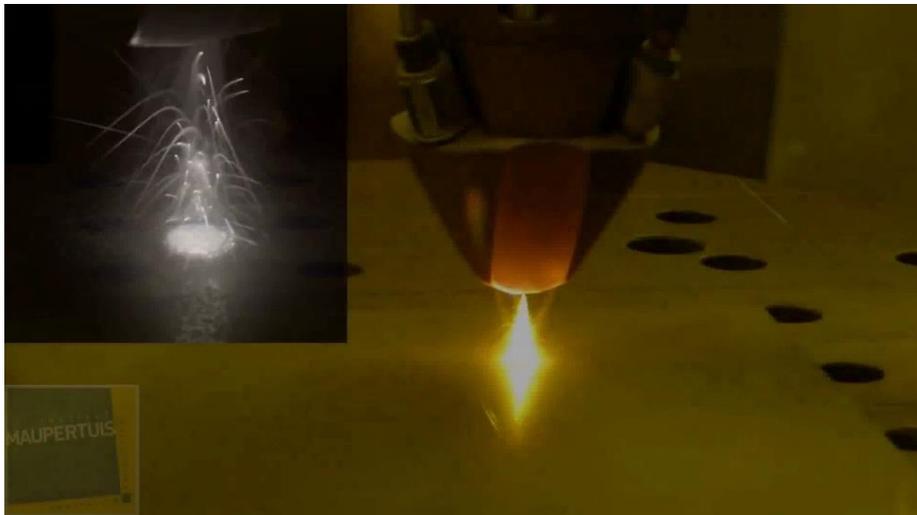
J. Bonis, H. Carduner, AM. Cauchois, G. Deleglise, H. Franck de Preaumont, J. Giraud, A. Gonnin, E. Guerard, S. Jenzer, M. Krauth, J. Laurence, B. Mercier, F. Peltier, P. Repain, S. Roni, M. Roy, L. Vatrinet

**4 spécialités :**

Fabrication mécanique, bureaux d'études, technologie du vide, calcul de structure



- **Projet IN2P3 3D metal**  
**Evaluation et Démonstration** de l'utilité de la FA métal pour nos laboratoires
- **Principales techniques :**
  - fusion sur lit de poudre (laser)
  - dépôt direct de métal



*Dépôt direct de métal  
(Institut Maupertuis)*

## Comparaison conventionnel – 3D metal



# L'intégration

La phase de conception a permis de définir précisément le détecteur et l'ensemble de ses composants.

La mise à disposition des composants, qu'ils soient produits dans les laboratoires ou dans l'industrie (sous-traitance) initialise la phase suivante : **l'intégration**.

## Définition :

- **Intégration** : assemblage des composants, montage mécanique + instrumentation et câblage.
- **Installation** : mise en place du détecteur dans son environnement final



# L'intégration

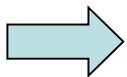
- **Objectif : rendre le détecteur opérationnel**
- **Etat final : assemblage terminé**  
fonctionnalités **testées en laboratoire**

**Idéalement l'étude de l'intégration du détecteur est couverte lors de la conception**

**En pratique, un décalage peut apparaître entre l'étude du détecteur et celle de son intégration du fait :**

- du manque d'effectif
- du manque de temps
- du sentiment de moindre urgence  $\Rightarrow$  gestion des priorités

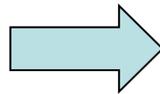
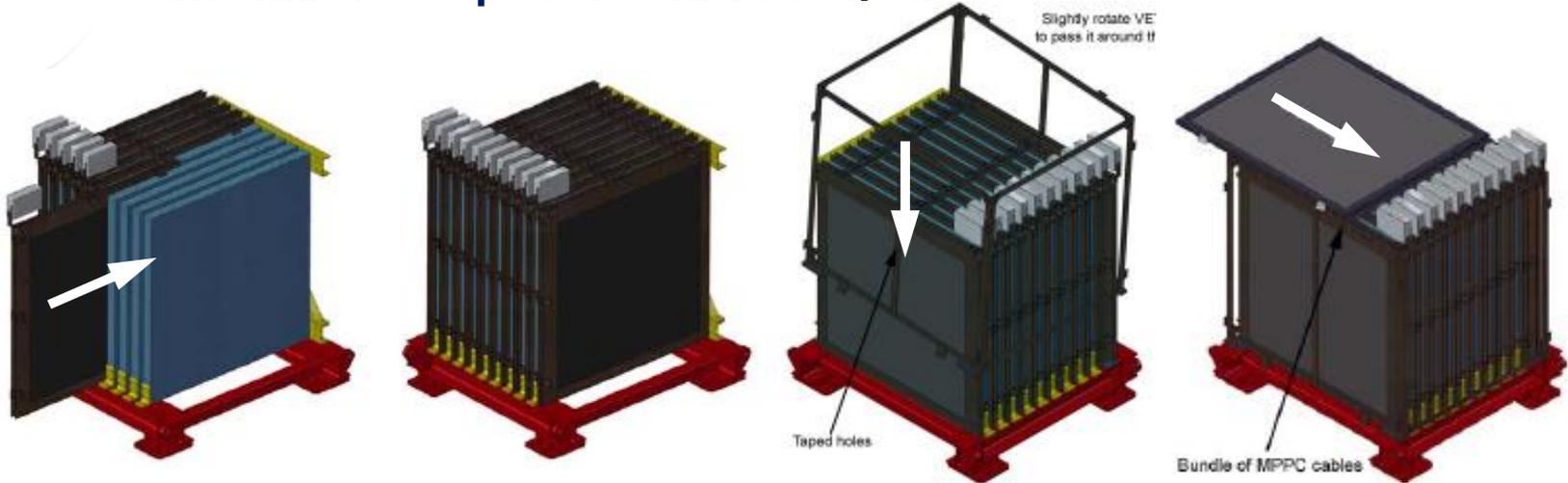
**Malgré tout, en général, la faisabilité est acquise  
le scénario de montage existe dans les grandes lignes**



**Amélioration de l'étude de l'intégration avec nos outils modernes de CAO 3D : simulations de montage**

# CAO 3D : simulations d'intégration

Préparation de la **gamme de montage** d'un module du détecteur INGRID de l'expérience T2K au Japon



# Les outillages

**Montage d'un détecteur ⇒ outillages adaptés**

**Ces outillages vont de simples supports à de véritables machines spéciales.**

**Leur conception, leur fabrication et leur mise en service sont le plus souvent du ressort des mécaniciens.**

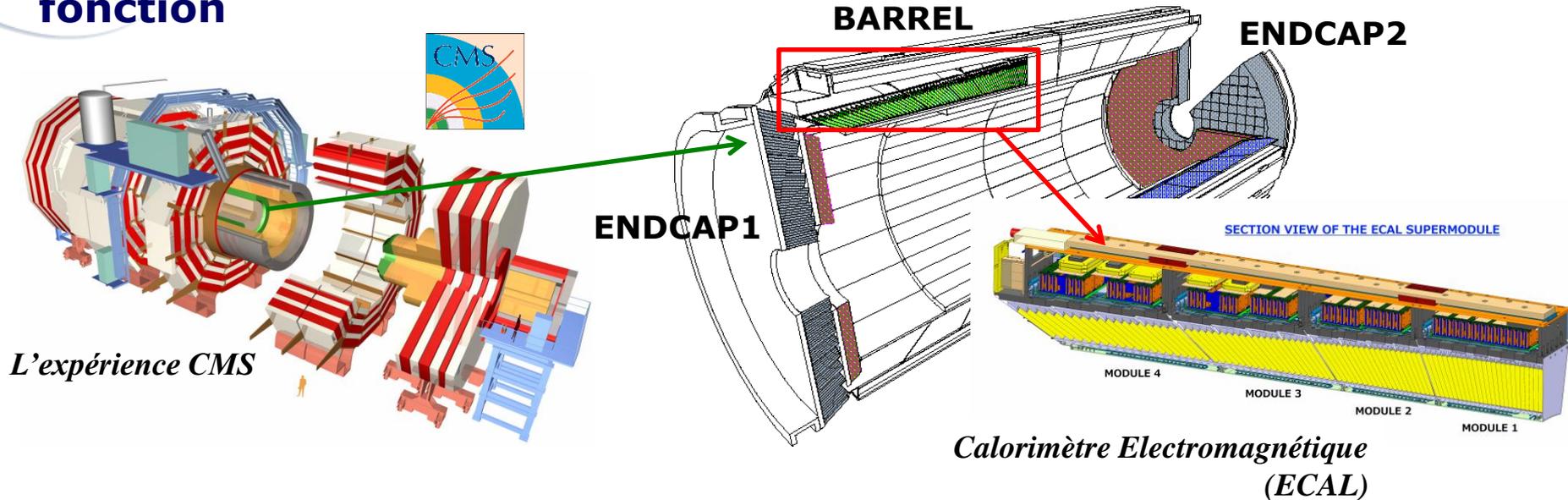
**La conception d'un outillage répond aux mêmes exigences que celle d'un détecteur ⇒ les mêmes règles sont applicables (voir 1ère partie du cours)**

## Quelques différences :

- Environnement moins complexe
- Contraintes budgétaires et temporelles plus sévères ⇒ cahier des charges généralement moins ambitieux

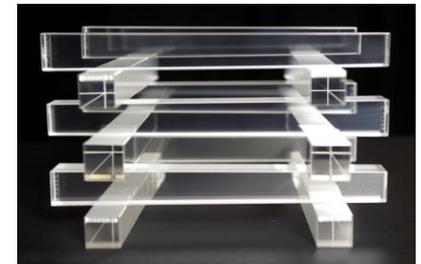
# Exemple : intégration du ECAL de CMS

- **CMS est composé de plusieurs détecteurs ayant chacun sa fonction**



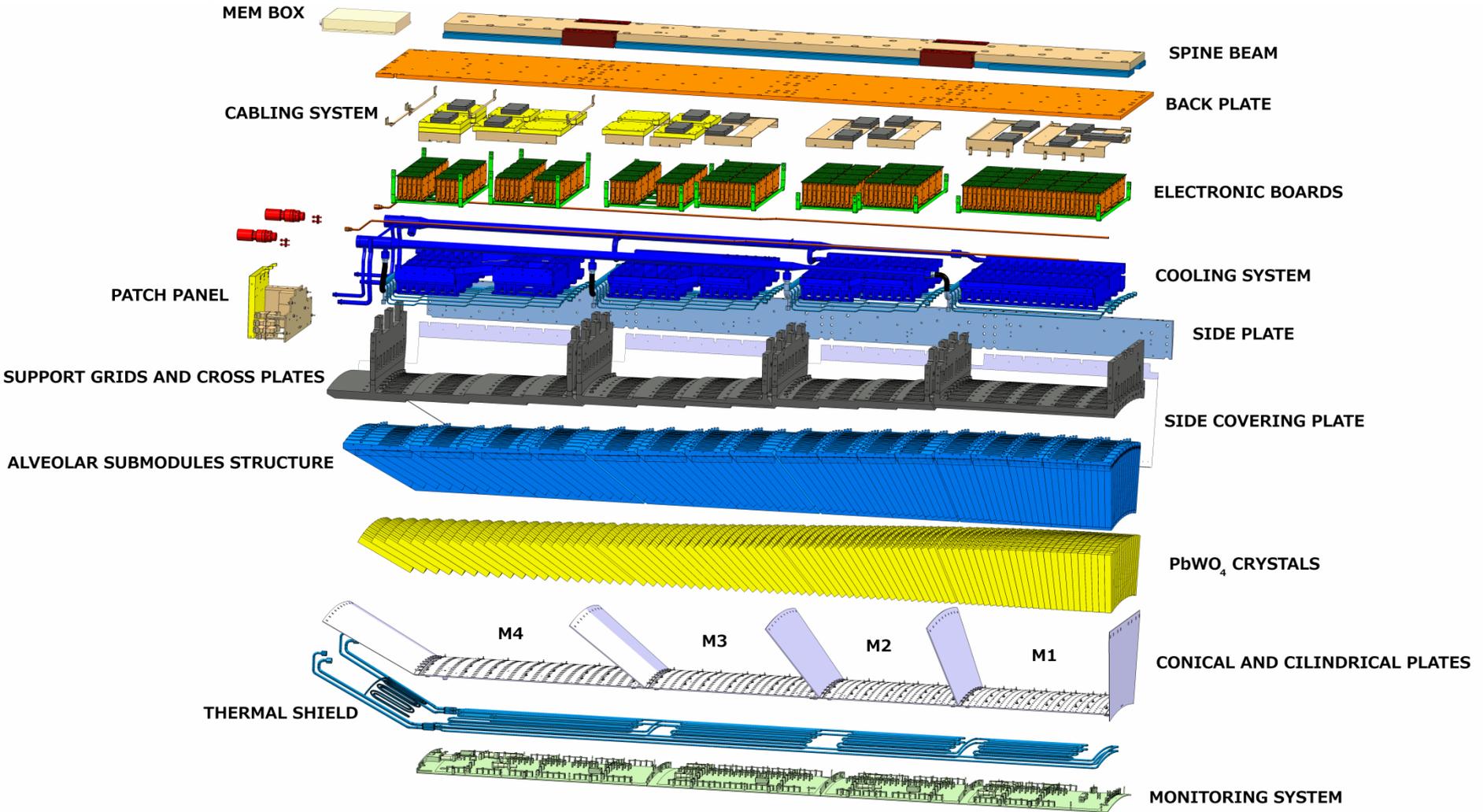
- **Le calorimètre électromagnétique de CMS :**

- ~ 76000 cristaux scintillateurs de  $\text{PbWO}_4$  ;
- 100 tonnes ;
- 6 m de long , 60 cm de large ;
- 250 collaborateurs de 17 pays différents :  
(Arménie, Bélorussie, CERN, Chine, Croatie, Chypre , France, Grèce, Inde, Italie, Portugal, Russie, Serbie, Suisse, Taiwan, UK, USA)



*Cristaux de  $\text{PbWO}_4$*

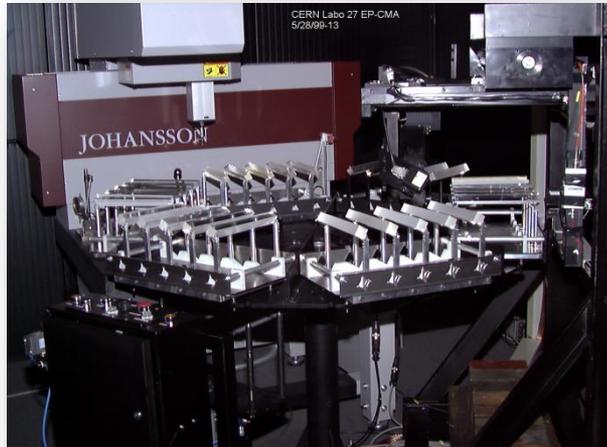
# Supermodule ECAL (1700 cristaux)



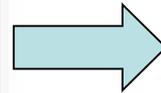
*I.G. Tabares (Cern PH-CMX-DS)*

# Intégration Barrel

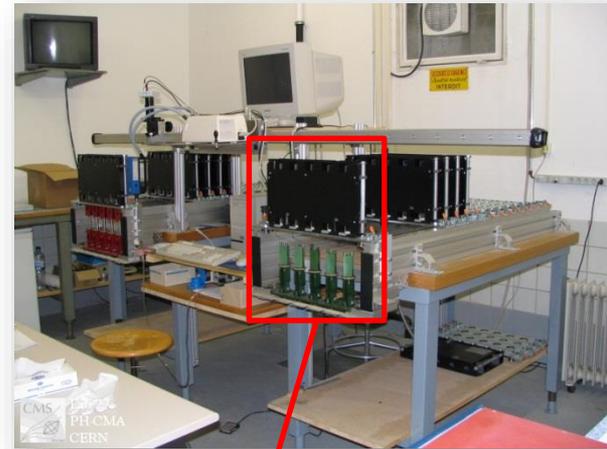
1- Caractérisation des **cristaux** (x61200) :  
 dimensions (21,8x21,8x230 mm<sup>3</sup> ; X<sub>0</sub>=25,8)  
 & propriétés optiques



(05/1999)



2- Collage des **photodétecteurs** (61200 unités) :



*Machine spéciale  
de collage*

(11/2000)

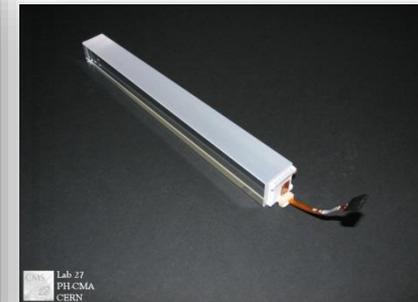
2.a- **dépôt de colle** calibrée



2.b- **Collage**



*Unité de détection*



# Intégration Barrel

3- Montage des **sous-modules** (x6120) :



CMS  
 Lab 27  
 PH-CMA  
 CERN

4- Montage des **modules** (x144) :

Robot de manipulation



*Structure alvéolaire (10 alv.) en fibre de verre (17 type fonction de l'inclinaison)*

CMS  
 Lab 27  
 PH-CMA  
 CERN

Table de transport



Support

**(04/2002)**

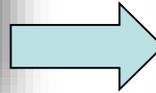
*2 types de modules*

# Intégration Barrel

5- Montage des **supermodules** (x36) :



*Structure principale du supermodule*



*Supermodule*

**Cadre rotatif**

**Support**

# Intégration Barrel

6- Installation **d'écrans thermiques** (x36) :



*Plaque d'interface thermique*

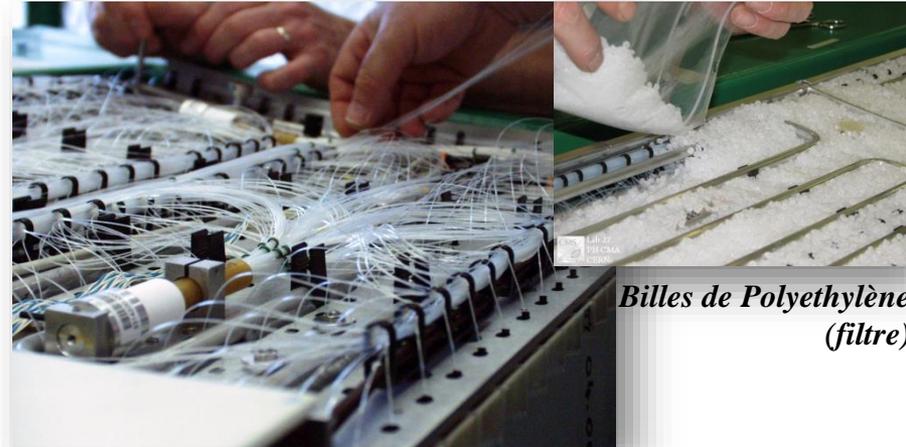
**(07/2003)**

8- Installation **du système de refroidissement** :



Juin 2018

7- Installation **du système de monitoring** :



*Billes de Polyéthylène (filtre)*

9- **Calibration** sur faisceau test H4/CERN :



# Intégration Barrel

10- Préparation/conditionnement pour le **transport** (x36) :



(2004)

*Caisse de transport*

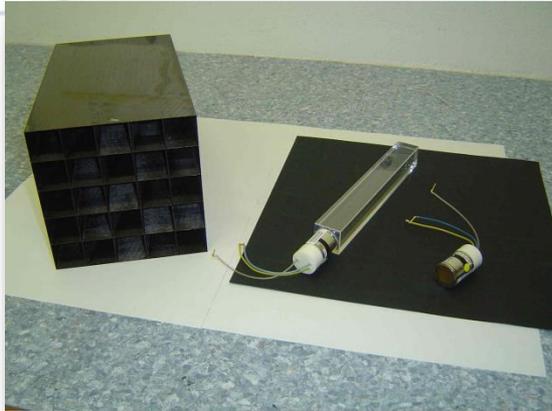


La phase de **transport** ne doit jamais être négligée : elle est **fondamentale** pour la **sécurité** du détecteur (+ **budget nécessaire** !)

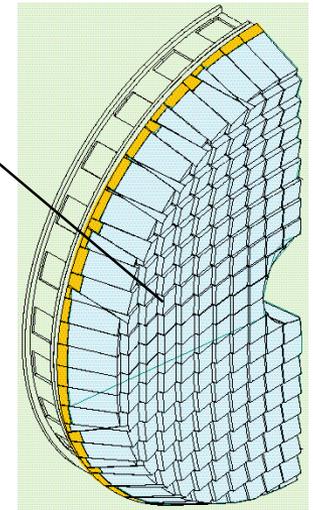
*Cadre de transport*  
*(système d'amortissement aux chocs)*

# Intégration Endcaps

1- Caractérisation des **cristaux** (x21528):  
dimensions (24,7x24,7x220 mm<sup>3</sup> ; X<sub>0</sub>=24,7) & propriétés optiques



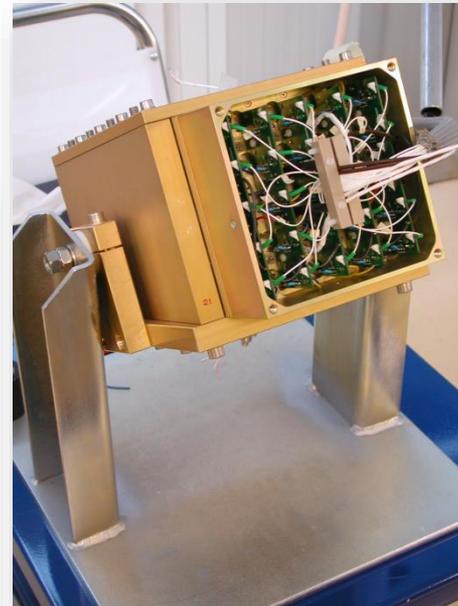
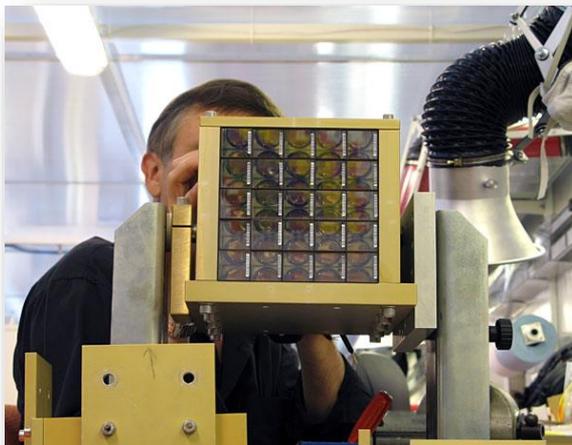
*Structure alvéolaire (25 alv.) et cristal adapté à la géométrie des bouchons*



Supercristal

*“Dee” de 3662 cristaux  
constituent les bouchons*

2- Montage des **Supercristaux** (x624):



*Outillage de montage*

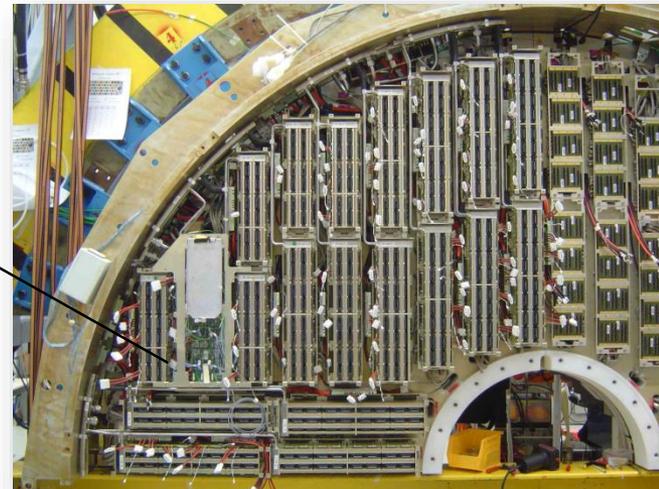
# Intégration Endcaps

3- Installation des supercristaux sur la **structure « Dee »**



*Face avant*

4- Installation des **cartes mères & système de refroidissement**



Cooling

Cartes mères

*Face arrière*

Robot de manipulation

Outillage support



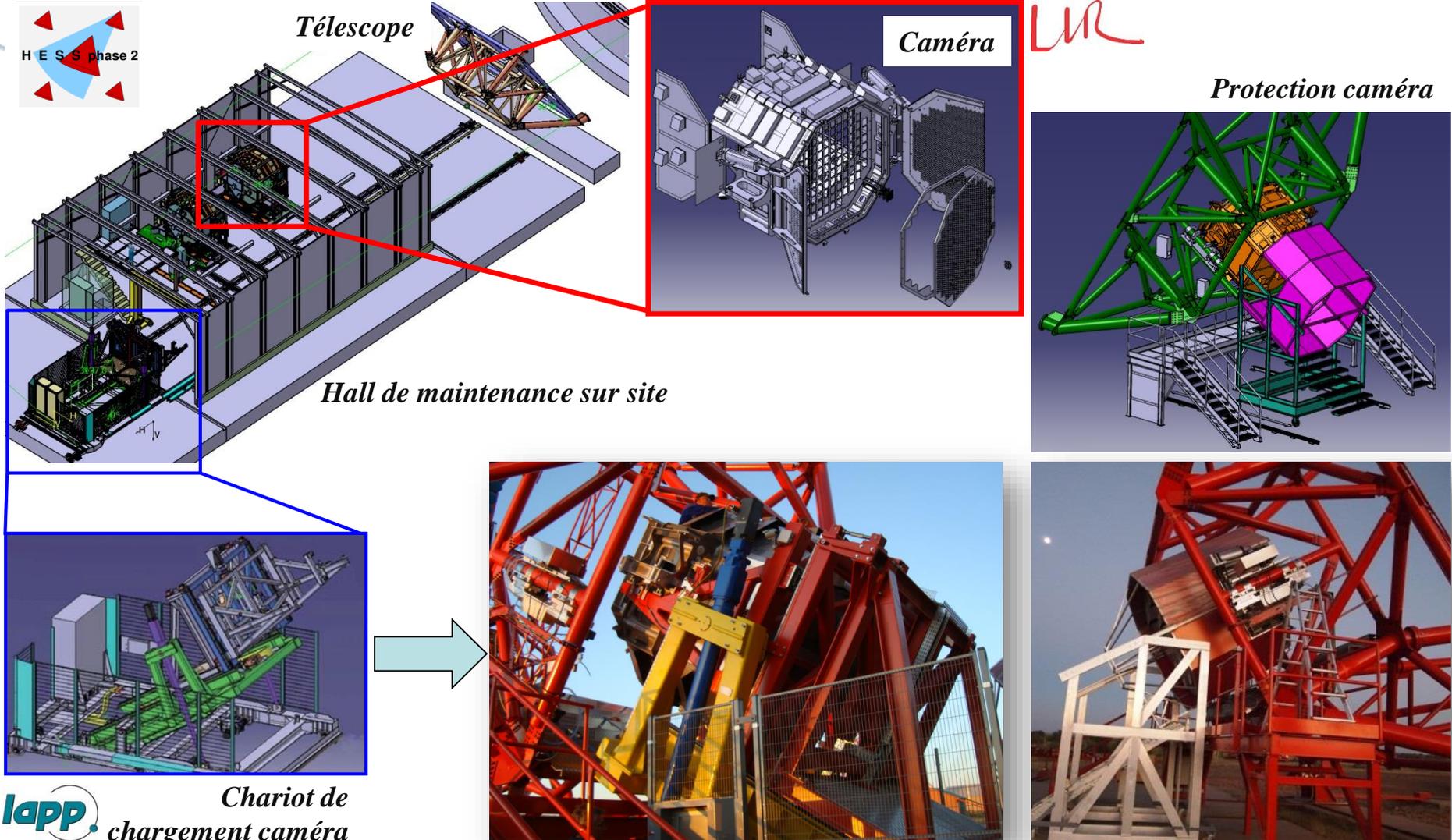
# L'installation : généralités

- **Objectif :** Installer le détecteur dans **le site de l'expérience**
- **La méthodologie est proche de celle de l'intégration**
  - Développement **d'outillages spécifiques**
  - Importance des travaux de préparation et de suivi : **procédures, traçabilité**
- **Les contraintes sont plus spécifiques**
  - Contraintes **d'environnement** liées au site
  - **Transport** du détecteur complet
  - Accessibilité, **sécurité**
- **Les compétences liées davantage au métier qu'au domaine d'application**

**Rq :** Une bonne connaissance du détecteur n'est pas indispensable

# Simulation des installations sur site : CAO 3D

## Préparation de l'installation de la caméra du télescope HESSII (Namibie)



# L'installation sur site naturel

- **Difficultés liées à l'environnement**
  - Connaissance ? contraintes particulières, aléas plus importants
- **Opérations effectuées en liaison avec des entreprises spécialisées, le plus souvent en étroite collaboration**
- **Maîtrise partielle de l'environnement et des moyens**
- **Accessibilité difficile**



*Immersion de l'ancre  
instrumentée de la ligne 1  
(ANTARES)*

# L'installation dans l'espace

- **Contraintes d'environnement très nombreuses :**
  - Interface avec le **lanceur**
  - **Contraintes mécaniques** : accélération, vibrations, chocs thermiques...
  - Aucune accessibilité
- **Pas ou peu de maîtrise sur les moyens**
- **Le lancement est assuré par un **opérateur extérieur** aux équipes scientifiques**  
**contraintes organisationnelles (NASA,ESA,...)**
- **Certaines missions scientifiques sont basés sur un « rendez-vous »**

Dans tous les cas, existence de fenêtres de tir très pointues

- Du fait des orbites
- Du fait de la planification des moyens



*Satellite FERMI*



*Lancement le 11 juin 2008  
(Delta II)*

# L'installation sur collisionneur

- Nombreux **problèmes d'interfaces** entre les systèmes
- **Maîtrise totale** de l'environnement et des moyens
- **Opérations effectuées par le personnel des instituts scientifiques**



*Descente d'une bobine de l'aimant toroïdal (110t)  
dans la caverne d'ATLAS*



*Descente du Yoke central YB0 (2000t)  
dans la caverne de CMS (28/02/2007)*

# Exemple : Installation du ECAL de CMS

- **Installation des parties barrel & Encaps dans la caverne**
- **Barrel se compose de 36 supermodules**
  - interfaces : rails fixés sur le HCAL / patins du supermodule
  - installation des 2 cotés du HCAL
- **Endcaps se compose de 4 Dees (demi-disques)**
  - Interface : couronne de fixation sur le HCAL Endcap
  - Installation de 2 Dees par Endcap

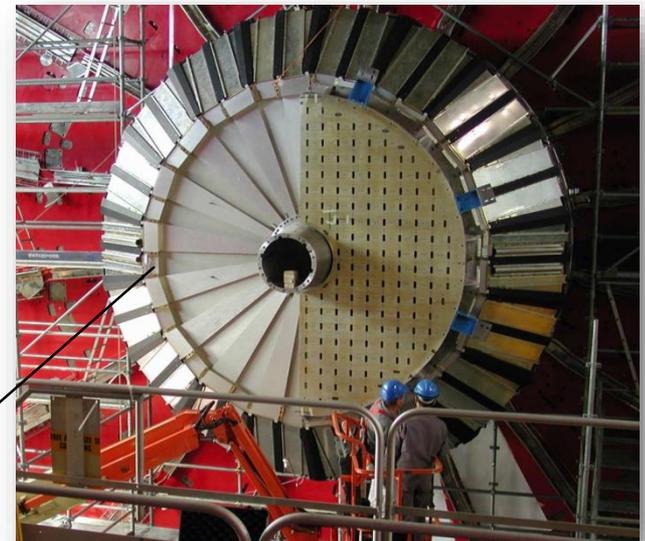


*Patin SM*

Rail support



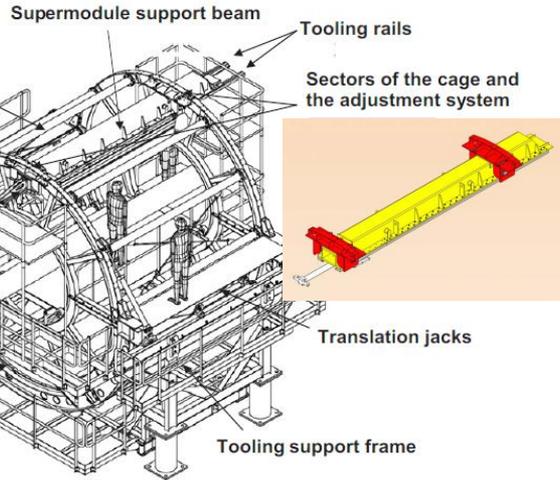
*HCAL (CMS)*



Couronne interface

*Endcap CMS*

# Outillage spécifique : enfourneur SM ECAL



*Outillage enfourneur CEA-DAPNIA (10T)*



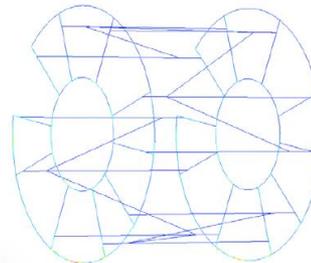
*Outillage dans son environnement*

Maximum stress occurs when  $\theta = 110^\circ$ :

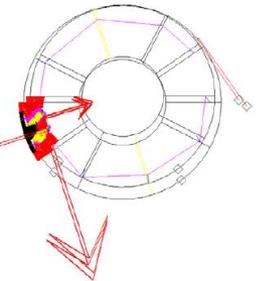
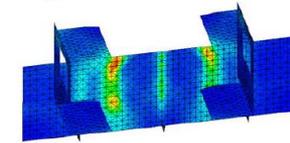
- in the support beam 92 MPa;



- in the cage 48 MPa.



| Steel       | Yield strength $R_{p0.2}$ [MPa] | Admissible tensile stress [MPa] | Admissible shear stress [MPa] | Tensile strength $R_m$ [MPa] |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| E 24 (S235) | 215                             | 143                             | 83                            | 340                          |



$\theta = 110^\circ$

28



*Transport difficile ?*

# Installation du barrel

1- prise des supermodules (SM) avec le **support beam** intégrant les rails interfaces



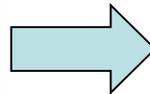
2- le support est fixé sur la **cage cylindrique** **rq:** travail important d'alignement en amont de l'outillage



3- **Insertion** du SM après orientation de la cage



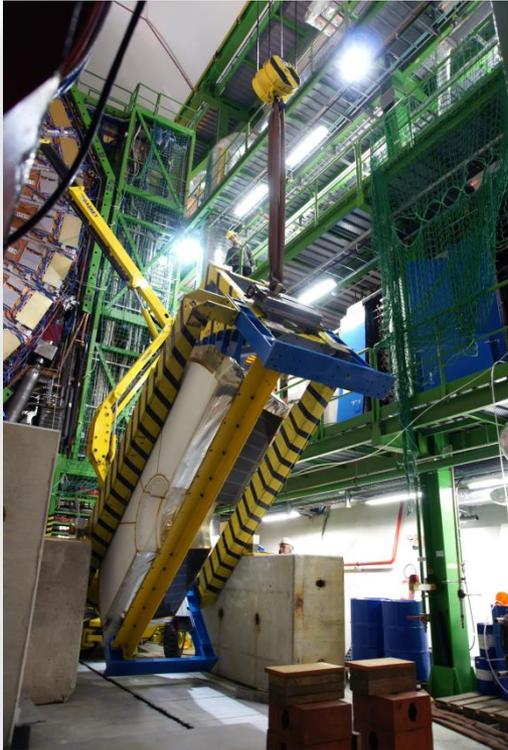
(04/2007)



*Demi-barrel assemblé*

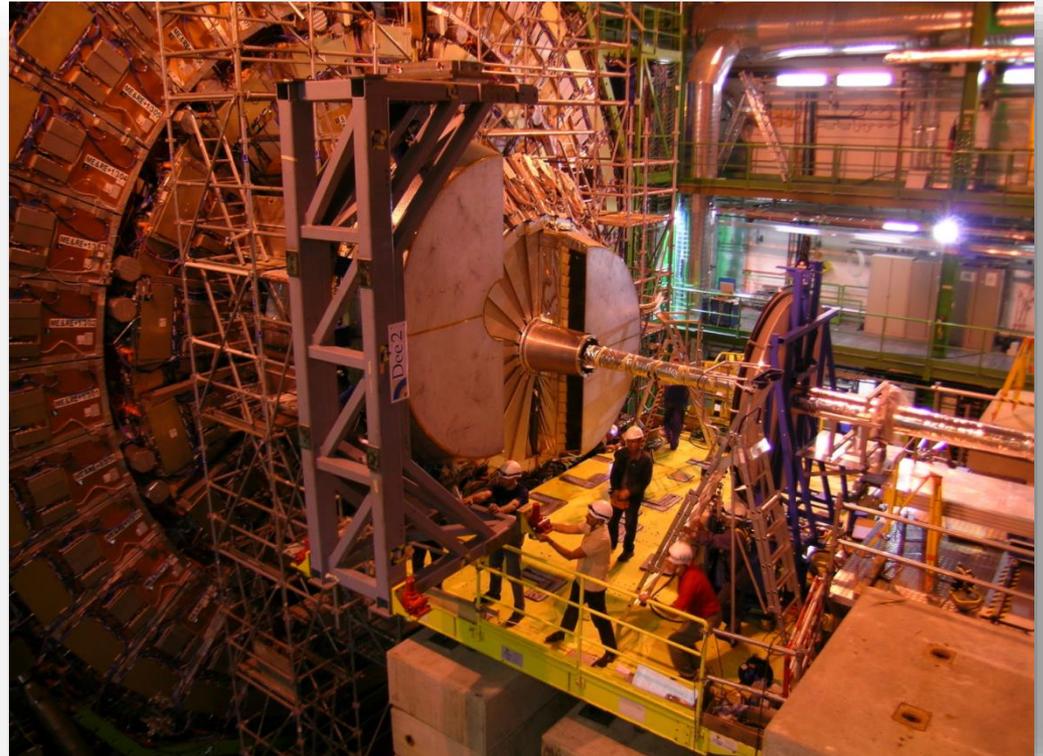
# Installation des Endcaps

1- préparation des Dees en position **verticale** (support renforcé )



*Manutention du Dee*

2- Installation du Dee sur son support



*Mise en place du détecteur*

# Autres exemples d'installation

*Outil de support et de rotation de la bobine de CMS*



*Insertion de la bobine dans le cryostat*

*Insertion du HCAL*

*Installation des chambres à muons*



# Installation : systèmes de déplacement de charges lourdes

- Utilisation **combinée** d'air-pads pour **soulever** et de vérins hydrauliques pour **déplacer**
- Les Air-pads sont des Aéroglisseurs à air comprimé (24 bars), sous forme de disques circulaires sous les pieds des structures à déplacer, provoquant un décollement d'environ **1cm**, en réduisant considérablement les frottements ( **$\sim 0,01$** ). Chaque pad peut soulever  **$\sim 350t$** . Leur nombre est donc fonction de la charges (ex : 8 pour le YB0).
- Les structures se déplacent le long de rails de guidage sur le sol à l'aide de vérin hydrauliques (vitesse :  **$\sim 1m$  en 10 mins**).



Air-pad

Rail de guidage

Vérin hydraulique

*Test de fermeture de CMS*

# La métrologie



*Système métrique : Mètre étalon*

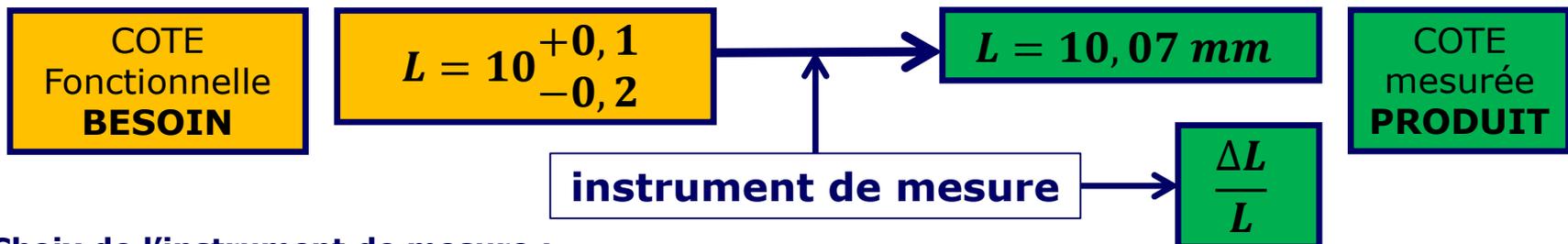
- **La métrologie est la science de la mesure.**  
Le terme désigne également l'ensemble des technologies de mesure.

**Mesure :** Evaluation d'une **grandeur** par rapport à une **référence** (étalon) ainsi que la détermination de l'incertitude liée à cette mesure.

- **Métrologie dimensionnelle :**

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

**Ex:** mesure d'une longueur :

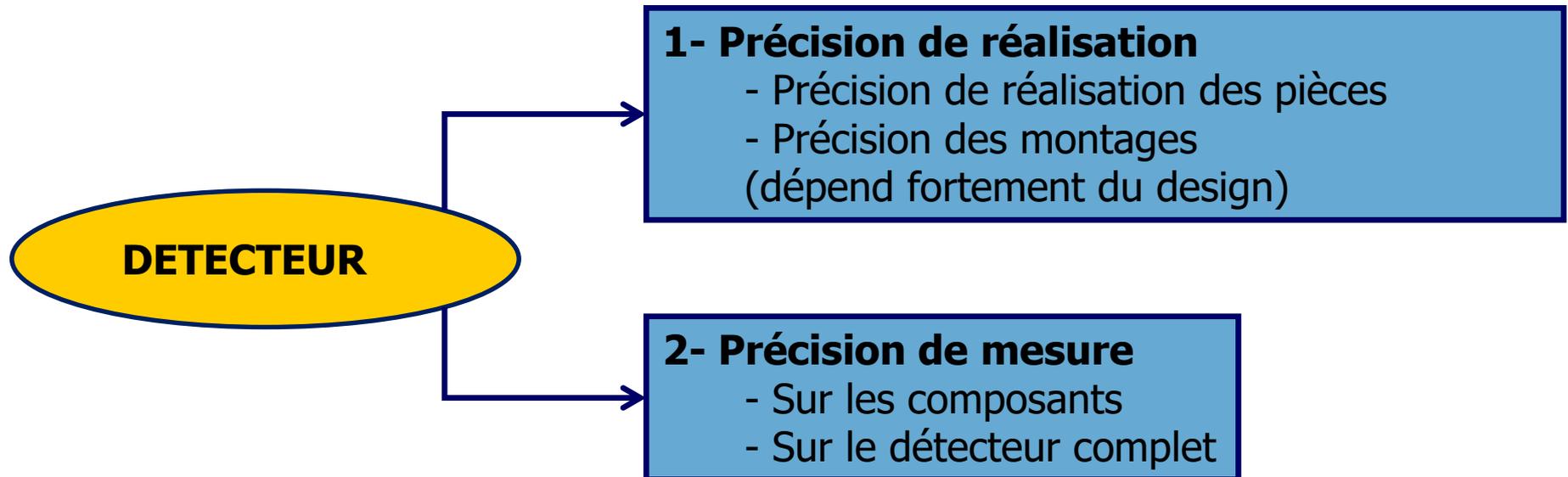


**Choix de l'instrument de mesure :**

- réglet : précision de mesure entre  $\pm 1$  et  $\pm 0,5$  mm
- pied à coulisse numérique : précision de mesure  $\pm 0,02$  mm
- micromètre au 1/100 mm : précision de mesure de l'ordre  $\pm 0,01$  mm

## Pour les détecteurs :

- La **mesure dimensionnelle** de l'ensemble des pièces qui constituent le détecteur est importante et nécessaire afin de pouvoir l'assembler correctement (dimensions, ajustage, intégration)
- La **connaissance de la géométrie** de **la position finale** du détecteur est fondamentale pour l'analyse des événements

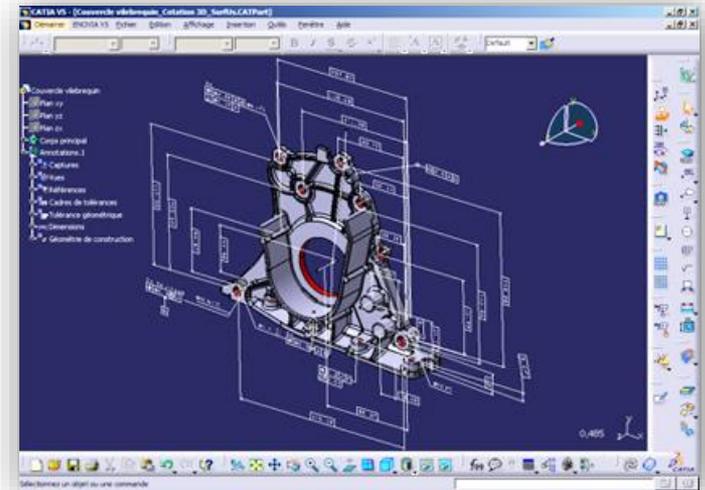


- Les 2 notions sont complémentaires mais différentes, elle nécessite des **spécifications techniques explicites**

# La mesure de pièces

## 1- Précision de réalisation

- Précision de réalisation des pièces
- Précision des montages (dépend fortement du design)



Tolérancement 3D

- métrologie des pièces à partir d'un **plan de détail** ou d'une **pièce 3D cotée** :

- **Métrologie portative** : mesure les tolérances dimensionnelles et angulaires courantes (réglet, pied à coulisse, jauge de profondeur ...)
- **Métrologie sur marbre** : mesure de diamètres, distances linéaires, balayage (colonne de mesure, comparateurs...)
- **Métrologie tridimensionnelle** : solution au contrôle des pièces complexes et précises

Mesure de la géométrie des supercristaux (CMS)



Marbre

Comparateur

$$p < 10\mu\text{m}$$

Mesure de géométrie d'une structure composite



# Spécificités des mesures

- **Les outils de mesure tels que pieds à coulisse, réglets, palmers, donnent un **résultat déterministe** basé sur une mesure discrète (2 points en général)**

➔ Augmentation de la précision par l'augmentation du nombre de mesures

- **Une machine à mesurer donne un **résultat statistique****

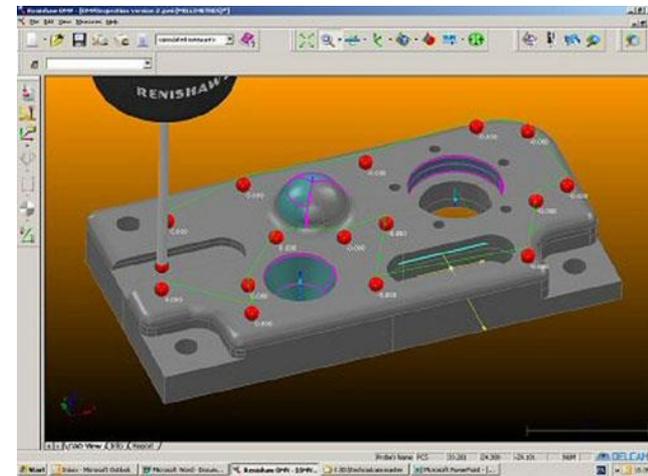
- Reconstruction d'un élément géométrique (ex plan) déterminé à partir de points mesurés sur une surface

- Utilisation d'algorithmes

**ex :** méthode des moindres carrés

$$K = \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i, \alpha))^2$$

➔ Augmentation de la précision par augmentation du nombre de points de mesure

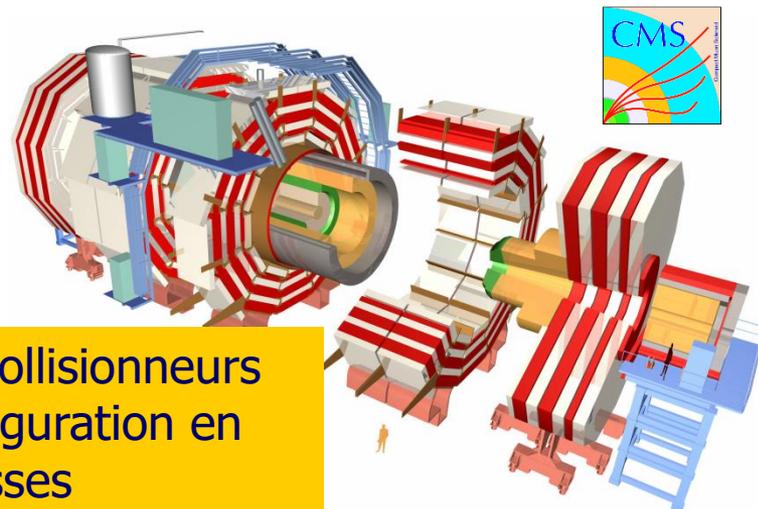
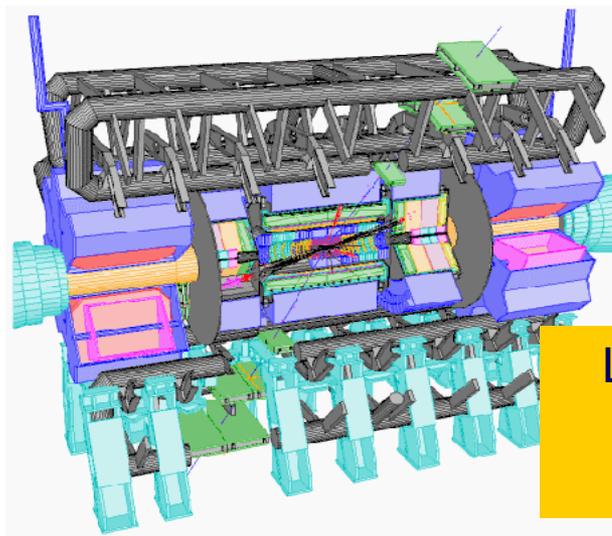


# La mesure de position

## 2-Précision de mesure

- Sur les composants
- Sur le détecteur complet

**Position**



Les expériences sur collisionneurs  
présentent une configuration en  
poupées Russes

- **Application d'une méthodologie "boite par boite" (sous-détecteurs)**
- **3 points de référence au minimum par boite (généralement +)**



**Savoir positionner chaque système par rapport au faisceau**

# Problématique des grandes dimensions

- **Pour les objets de grandes dimensions :**

Utilisation d'instruments de mesure adaptés :

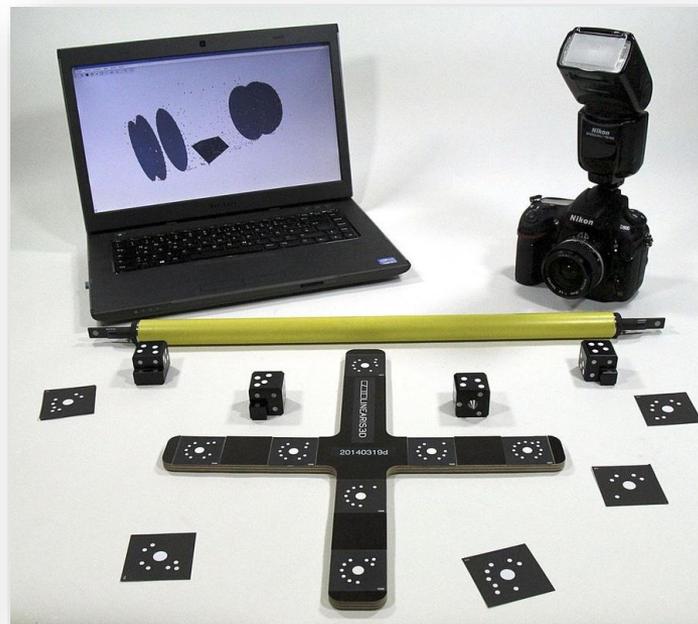
Tachéomètres (topométrie), caméras (photogrammétrie)

**Méthodes indirectes qui demandent des compétences de spécialistes (géomètre)**

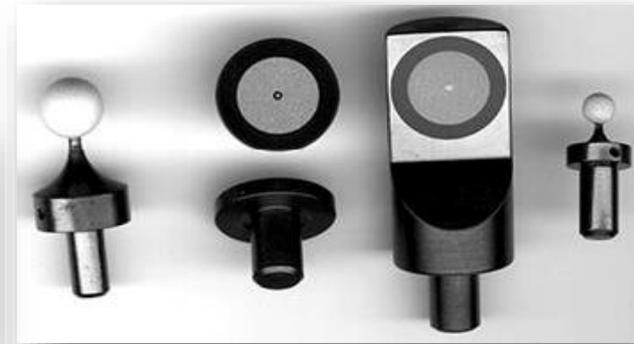
$\rho \sim 100\mu\text{m}$



*Tachéomètre  
(angles + distances)*



*Caméra de photogrammétrie*



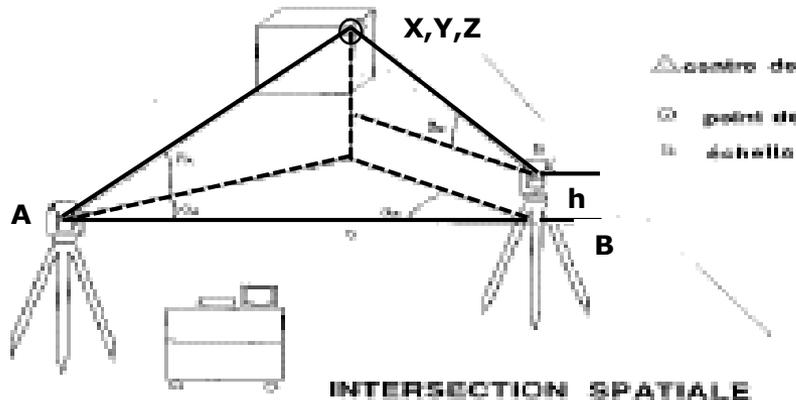
*Cibles*



*Cible codée (N°)*

Mesure de la **position** et des **dimensions** des objets sur la surface terrestre.

- L'usage de théodolites permet de déterminer des distances entre points caractéristiques et/ou les coordonnées de ces points dans un réseau 3D
- Utilisation de méthodes issues de la géodésie, triangulation,...



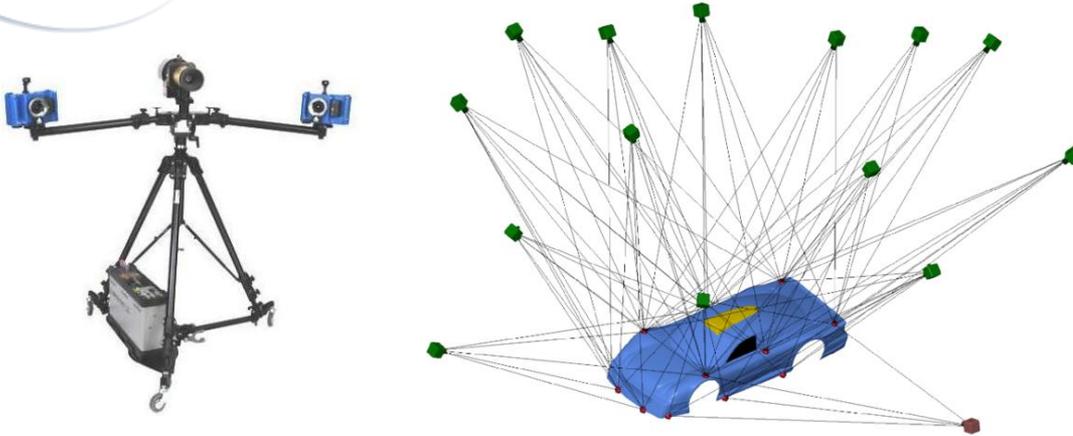
Mesure d'angles et de distances

- Angles : 0,3 mgon (mgrade)
  - Distances : 0,2 mm
  - 1 sigma XYZ : 0,3 mm
- (La précision dépend de la configuration)

Moyens **coûteux** en **personnel** et en **temps**

# La photogrammétrie

- La Photogrammétrie digitale est une technique de mesures 3D



Traitement  
des images 2D

Calcul  
Géométrique

Au moins, 2 images depuis 2 positions différentes. On ne mesure pas l'objet mais son image 2D ...



Formes 😊

Dimensions 😞

## MISE à L'ECHELLE

Nécessité d'utiliser des barres calibrées et/ou des distances connues sur l'objet



Formes 😊

Dimensions 😊

# La photogrammétrie : exemple de calcul géométrique

- **Relèvement** = permet de connaître la position spatiale de la caméra à partir de points connus,
- **Triangulation** = intersection de lignes spatiales à partir des positions connues des caméras, calcul de la position spatiale de tous les nouveaux points.

➔ **Positions et coordonnées approchées**

**Ex :** les anneaux du Yoke de CMS

Ø 14 m, sommet à 18 m du sol,

**Spéc :** tolérances de construction : 5 mm immobilisation la + courte possible.

Immobilisation 4h30

540 points

260 images

(kodak DCS 460)



Range of the differences in XYZ compared to the theoretical co-ordinates

Delta X max = from +2.0 to -1.7 mm

Delta Y max = from +2.7 to -2.3 mm

Delta Z max = from +1.0 to -1.8 mm

Range of distances point to Z mean planes\*:

from +1.0 to -1.0 mm

Maximal difference between the measured distance separating the Z planes, along Z axis for X=Y=0 and the theoretical one:

0.3 mm



Cibles



# Pour résumer ...

... la mécanique sur détecteur :

