

**Marc Anduze**  
**RT – LLR**

**- Ecole 2013 -**  
**Du détecteur à la mesure**  
**Fréjus, 12-18 mai 2013**



**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

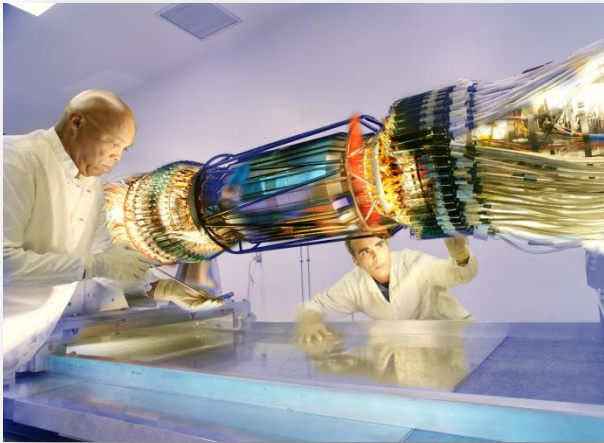
1. La fabrication
2. L'intégration des détecteurs
3. L'installation sur site
4. La métrologie

# Introduction : les détecteurs

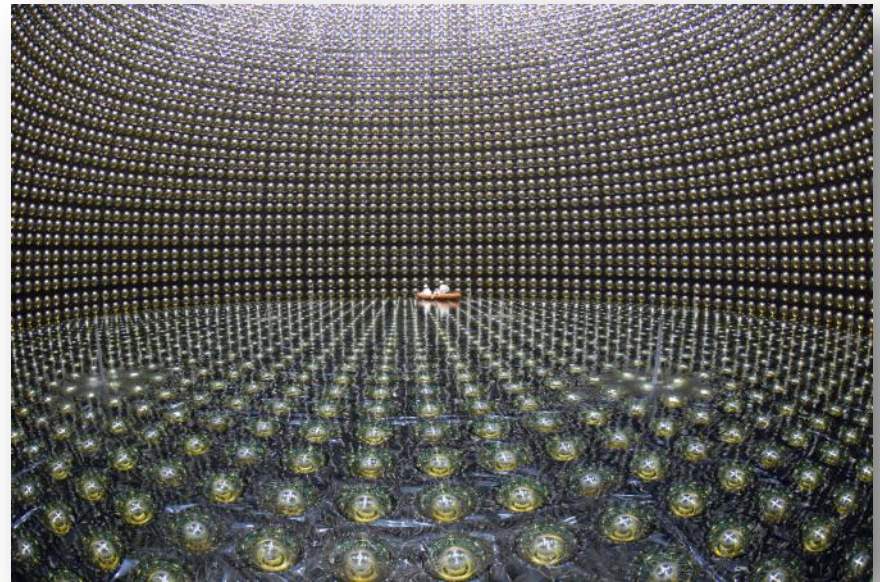
Les développements de détecteurs se caractérisent par une **très grande diversité**

## 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 :

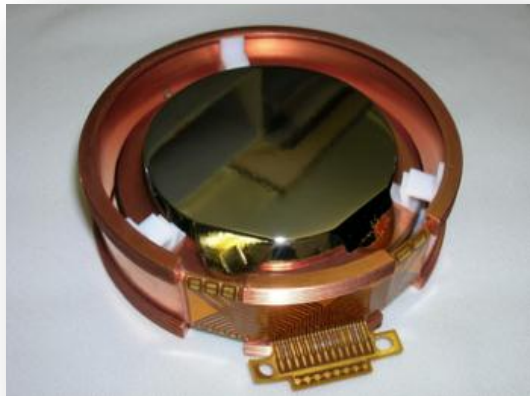
Très large palette de matériaux et de **systemes de détections** :



*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)**

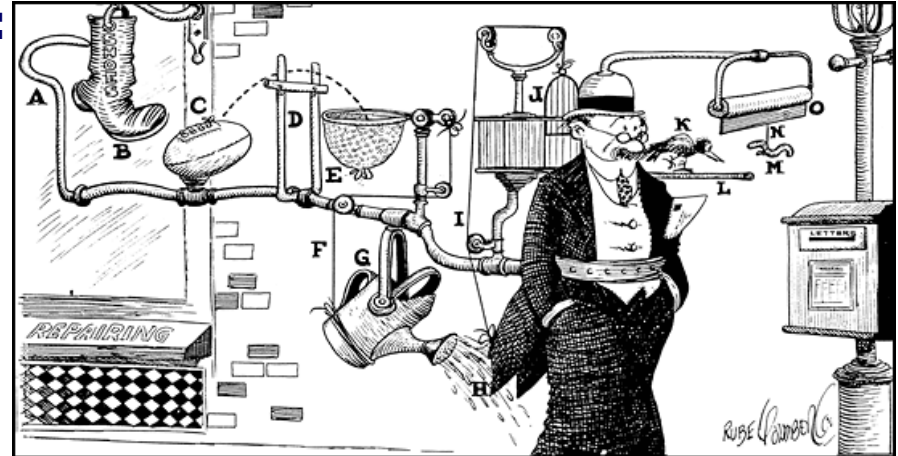


- Etudes en **statique linéaire, non-linéaire**
- Les études dynamiques se limitent souvent aux petits mouvements autour de la position d'équilibre ⇒ **vibrations**
- **Etudes thermiques** (régulation) et **thermomécaniques** (influence de la température sur le comportement mécanique)

# la Mécanique à l'IN2P3

- **Des compétences très diverses :**

- Mécanique/Thermique
- Automatismes/Mécatronique
- Cryogénie/Vide/Fluide
- Matériaux (composites)
- ...

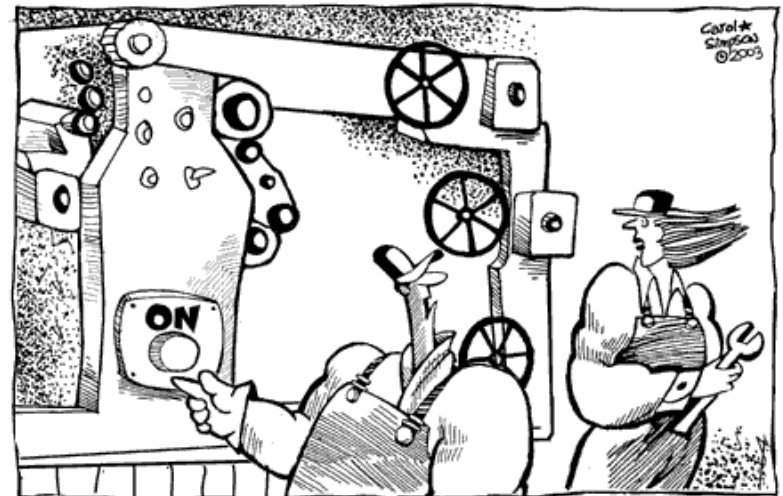


- **Des métiers :**

- Bureaux d'études
- Calculs/Simulations
- Réalisations : Ateliers

- **Des réseaux métiers IN2P3 :**

- Réseau calcul
- IAO/CAO mécanique
- Réseau R&D mécanique



*"This machine is perfectly safe...  
 As long as you never press this button."*

# 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**

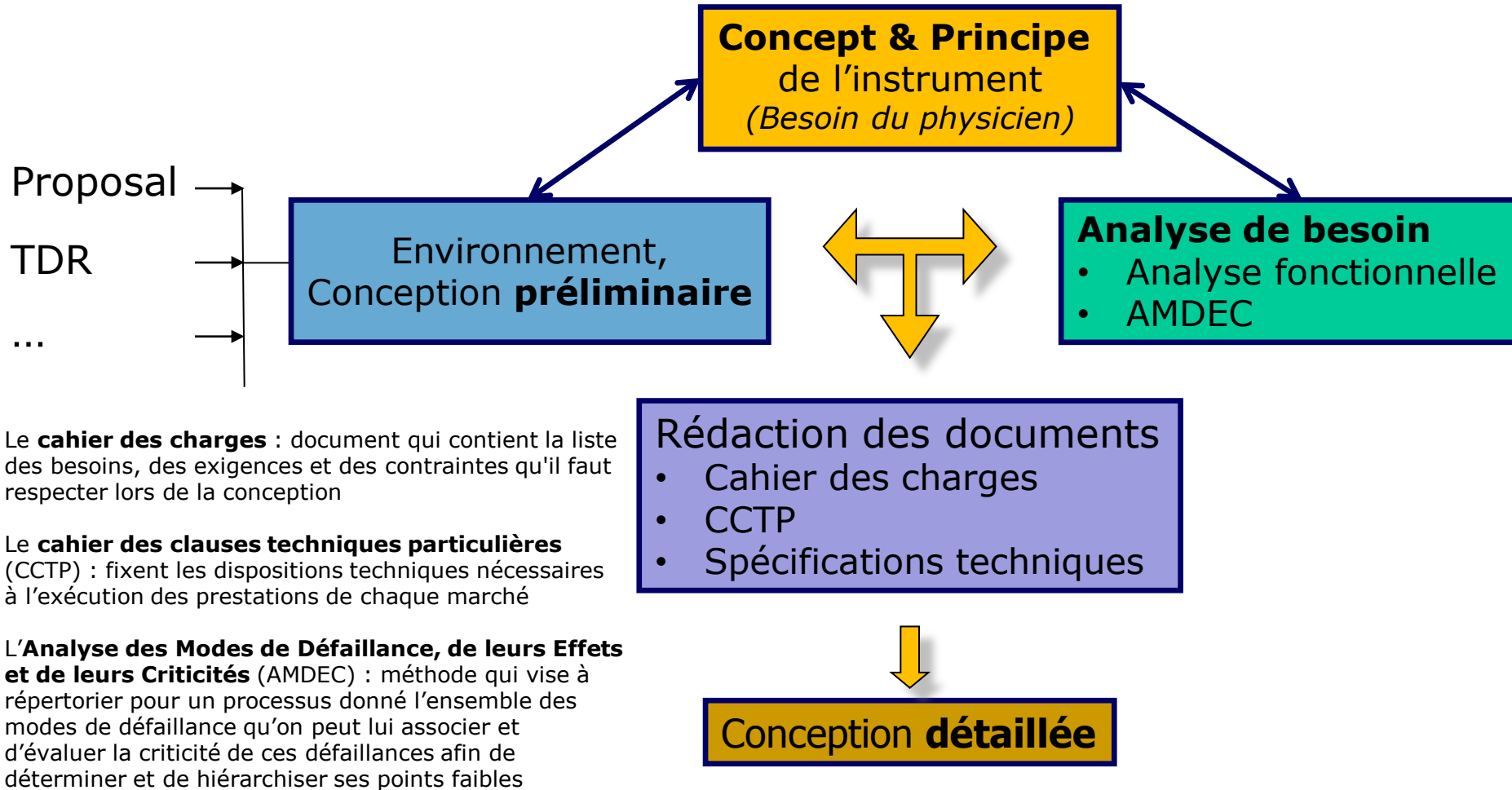
## Evolution des outils logiciels :

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

# Définition du besoin

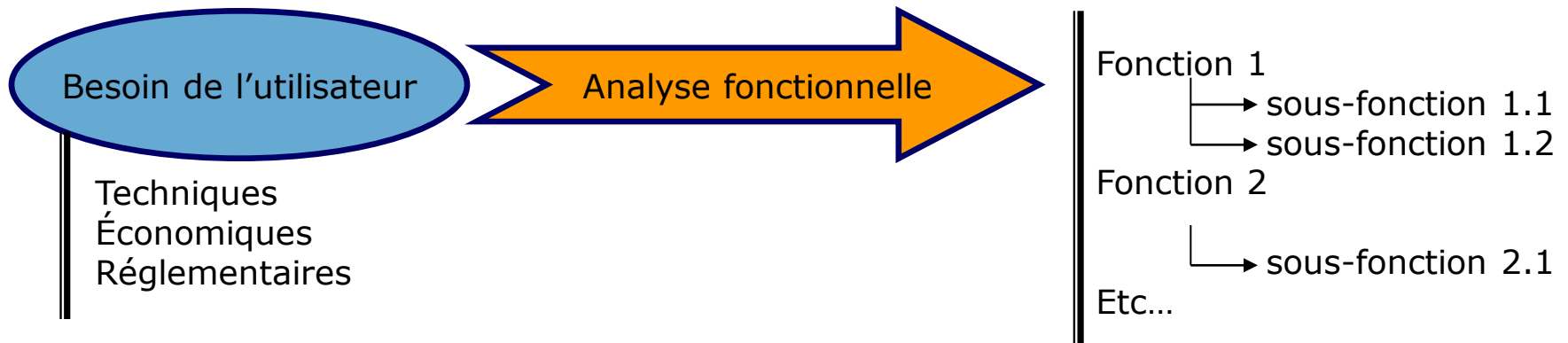
C'est une **étape essentielle** de la conception

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



# Analyse fonctionnelle

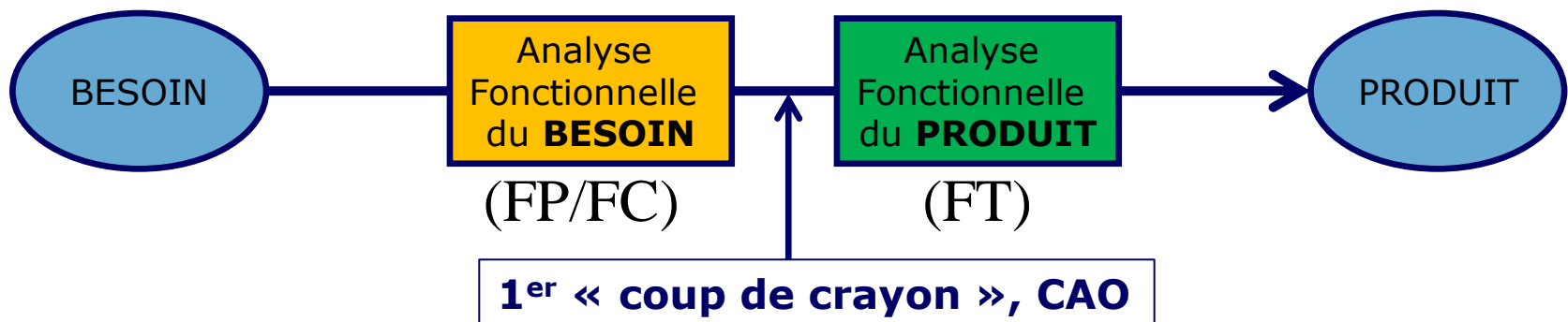
- Démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les **fonctions** du **produit** (matériel, logiciel, processus, service) attendues par l'utilisateur (AFNOR NF X 50-151).
- Elle permet de traduire le **besoin** en fonctions
  - **Besoin** : insatisfaction qui 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 produit a t-il été crée? » (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 ? »

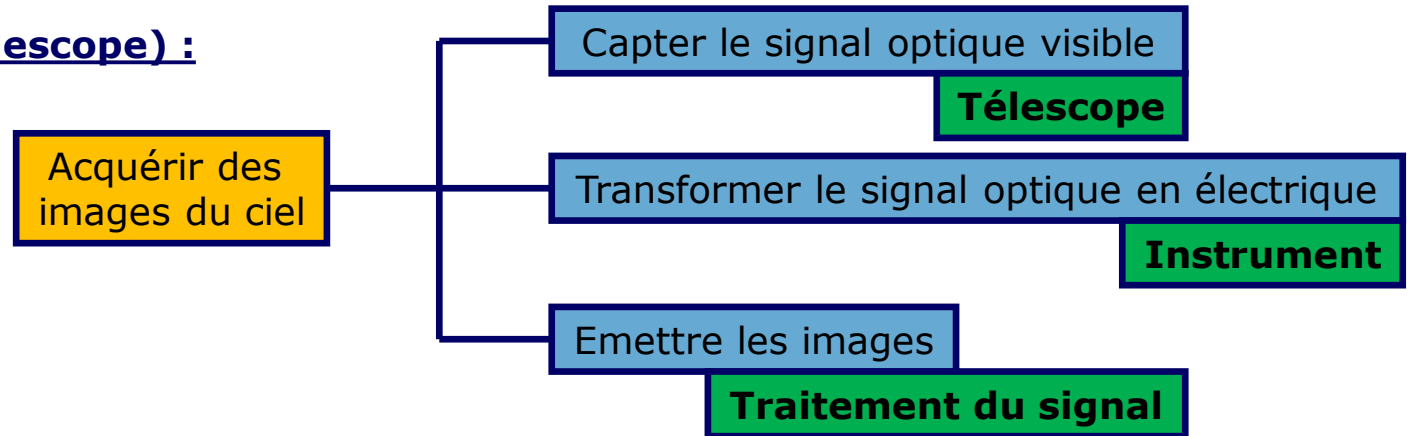


# L'Analyse fonctionnelle : Arborescence

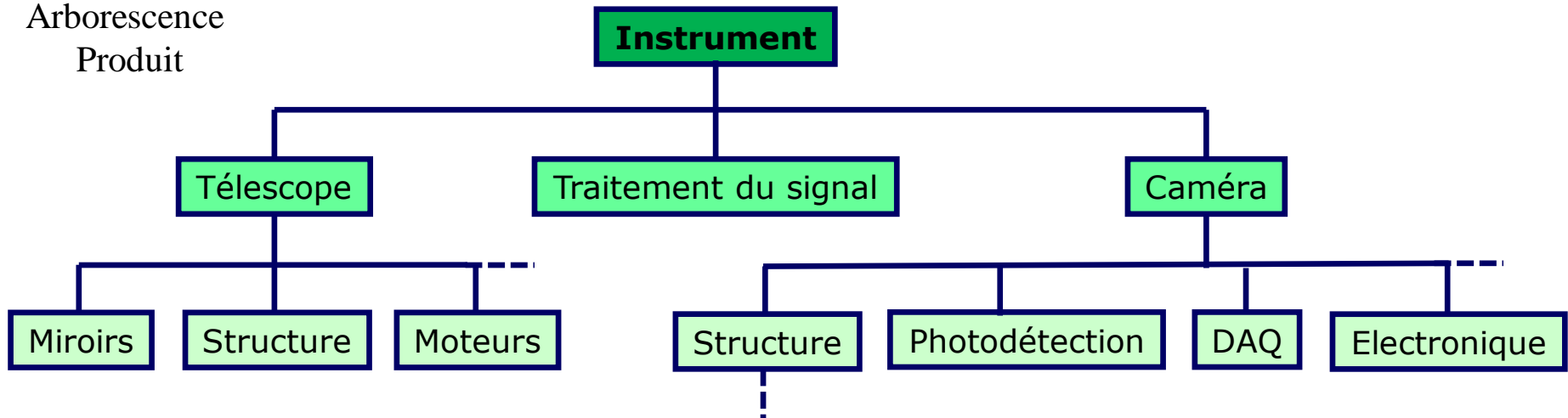
**Ordonner** : l'organisation arborescente des fonctions s'obtient en respectant la logique des deux questions « **pourquoi ?** » et « **comment ?** »

**Exemples (MST télescope) :**

Arborescence  
Fonctionnelle



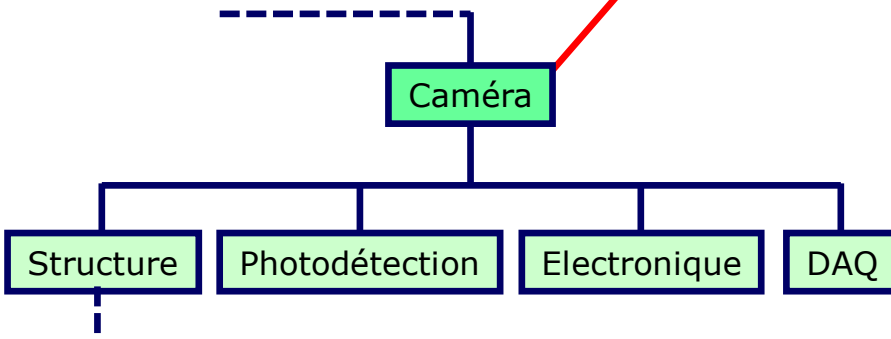
Arborescence  
Produit



# Analyse fonctionnelle : Product Breakdown Structure (PBS)

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

**Exemple:**  
MST T lescope : 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 **analyses 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 :**

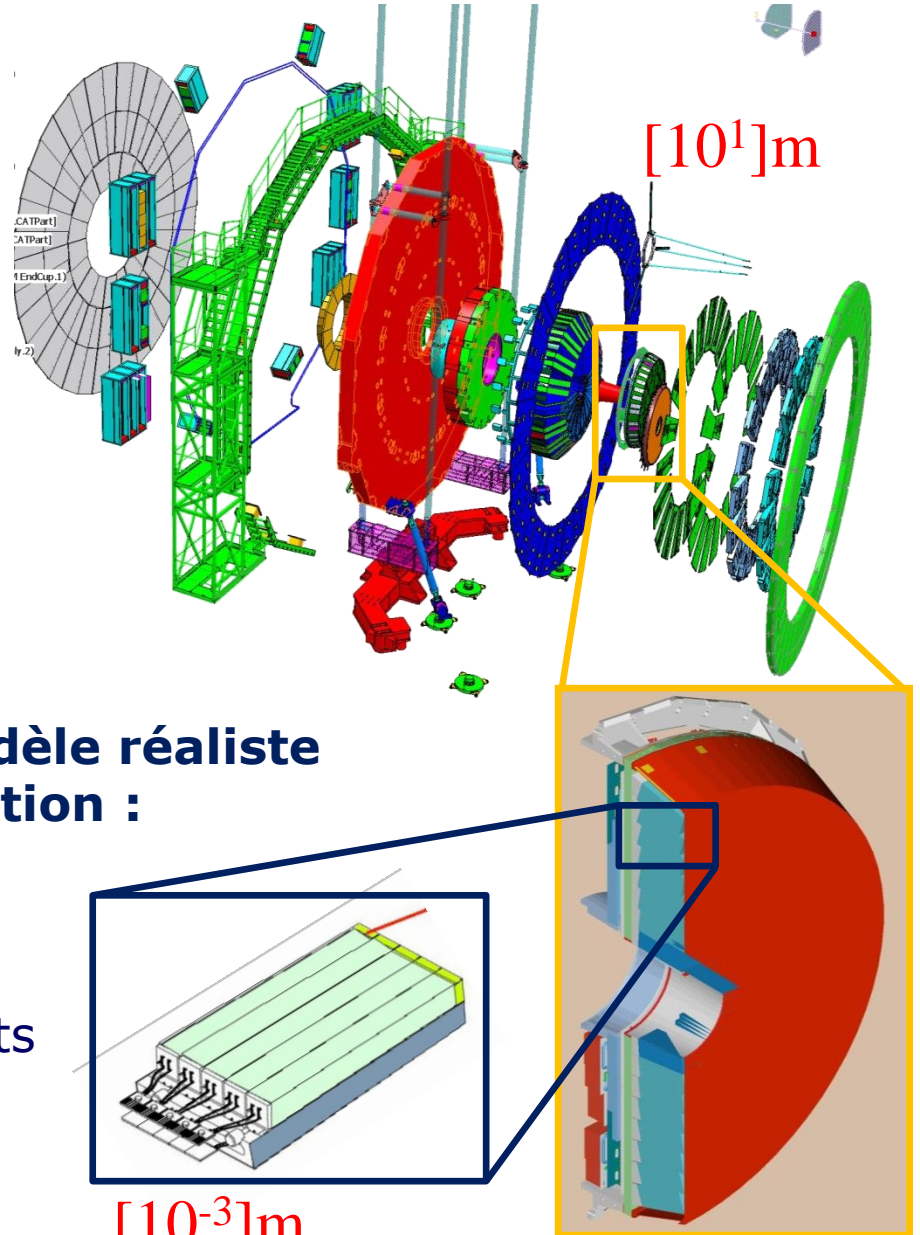
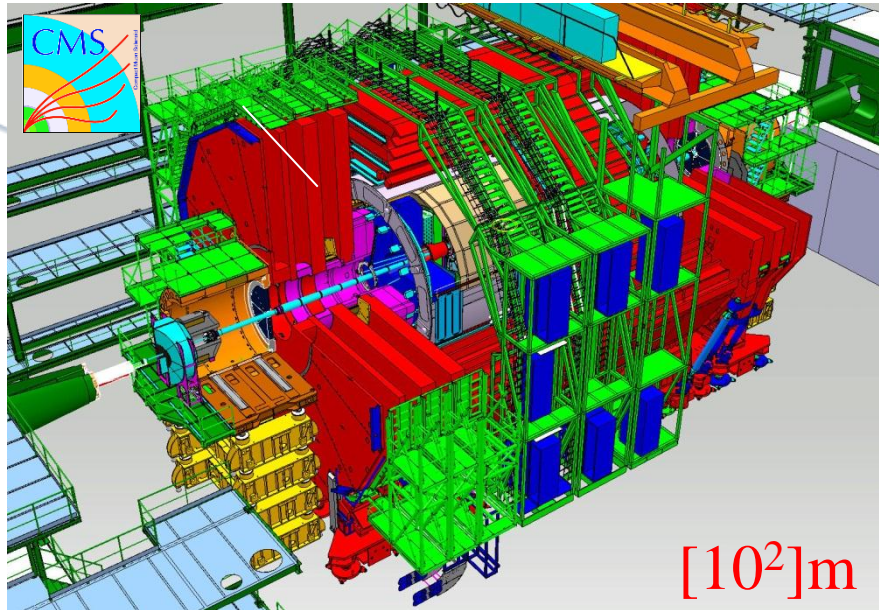
1- Le fondement de l'Analyse Fonctionnelle étant d'éviter les oublis, l'exhaustivité est indispensable s'agissant des bases de l'Analyse Fonctionnelle besoin. n'oublier aucune situation de vie, aucun élément de l'environnement, aucune fonction....

**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' 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

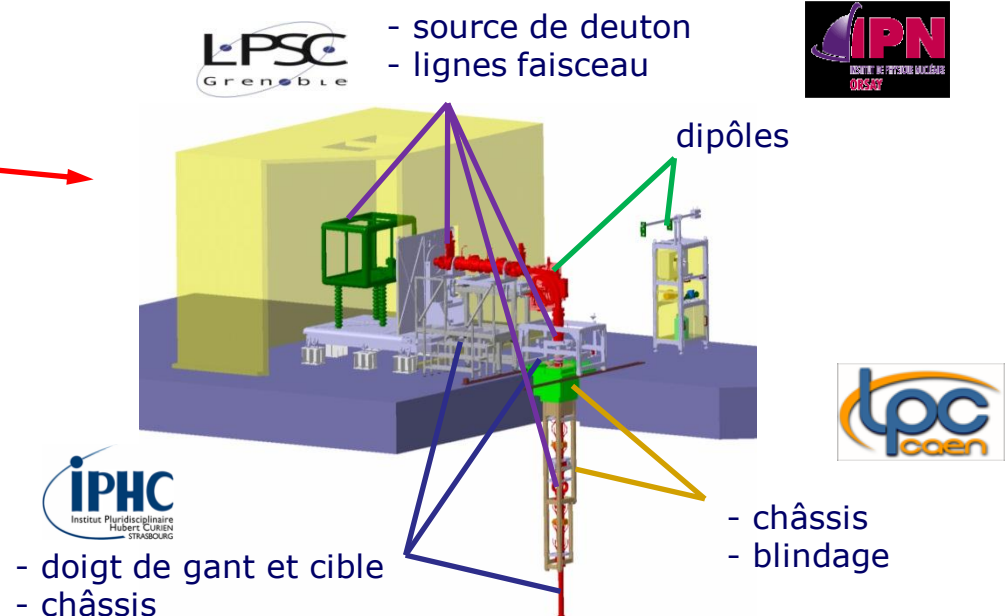
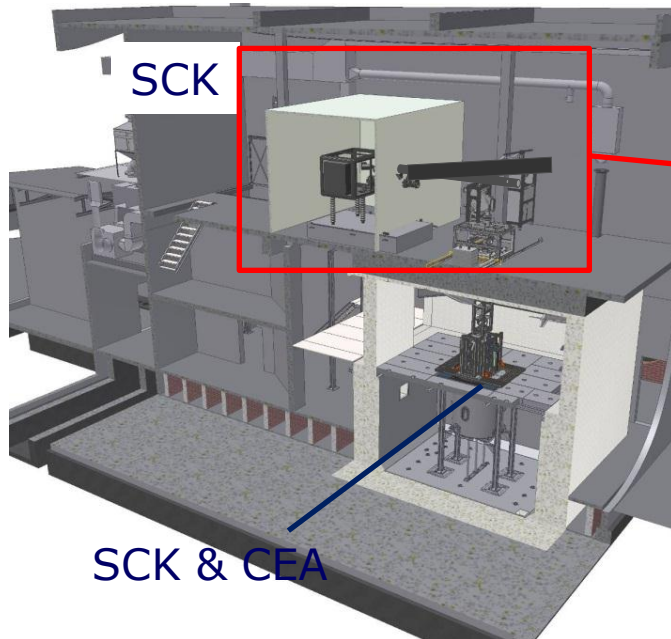
# CAO 3D : échanges/collaborations plus poussées

**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

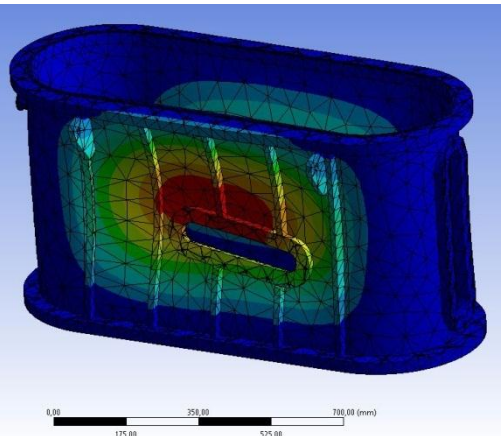
**Objectif :** analyser les comportements mécaniques, thermiques, fluidiques, d'objets **soumis à des sollicitations** afin de dimensionner correctement les détecteurs dans leur environnement

## 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)*

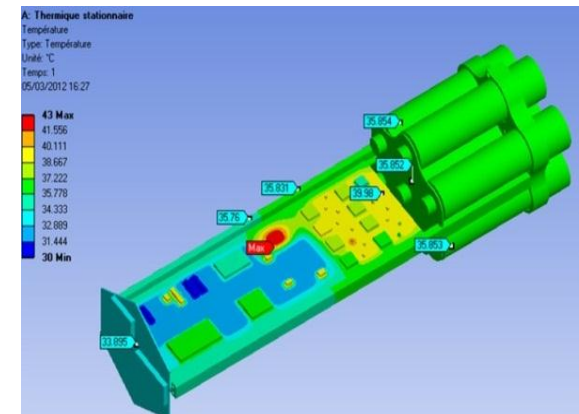


**ANSYS 14**



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 :

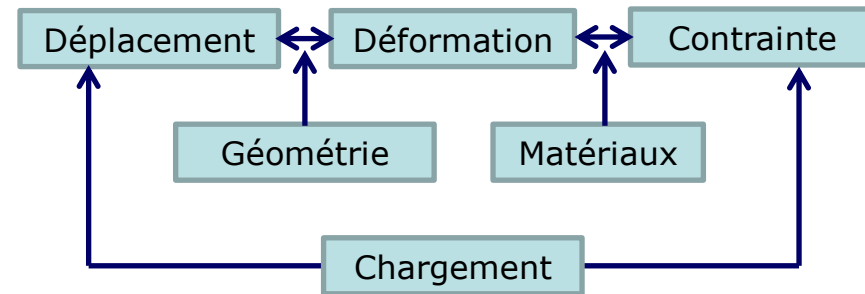
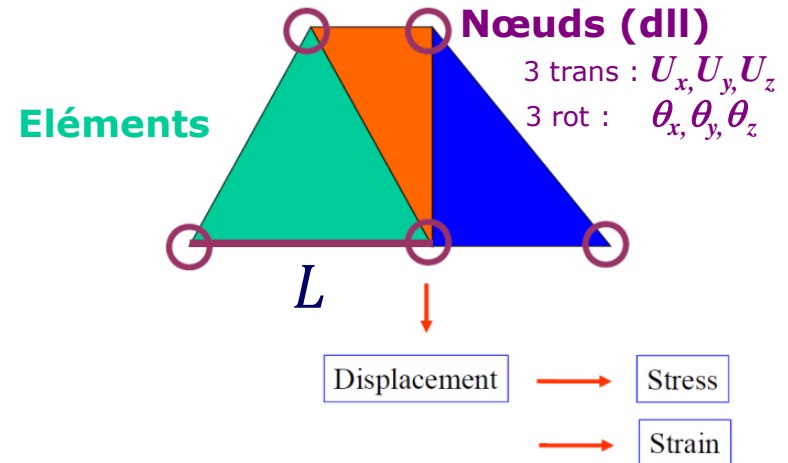
- Déformations :  $\{\epsilon\} = [A] \cdot \{U\}$

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

suivant les principes :

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

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

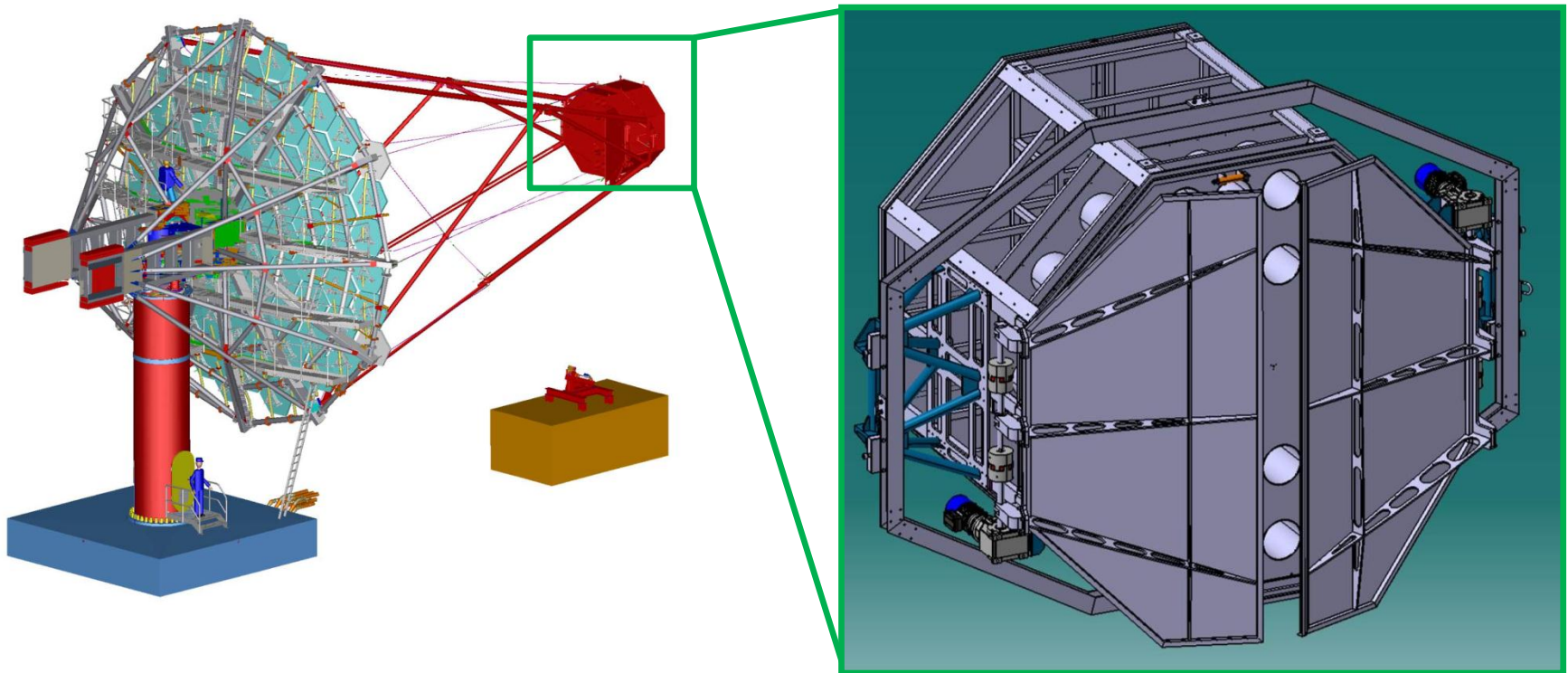


# Le dimensionnement : exemples

## ex 1 : statique non-linéaire & thermomécanique

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

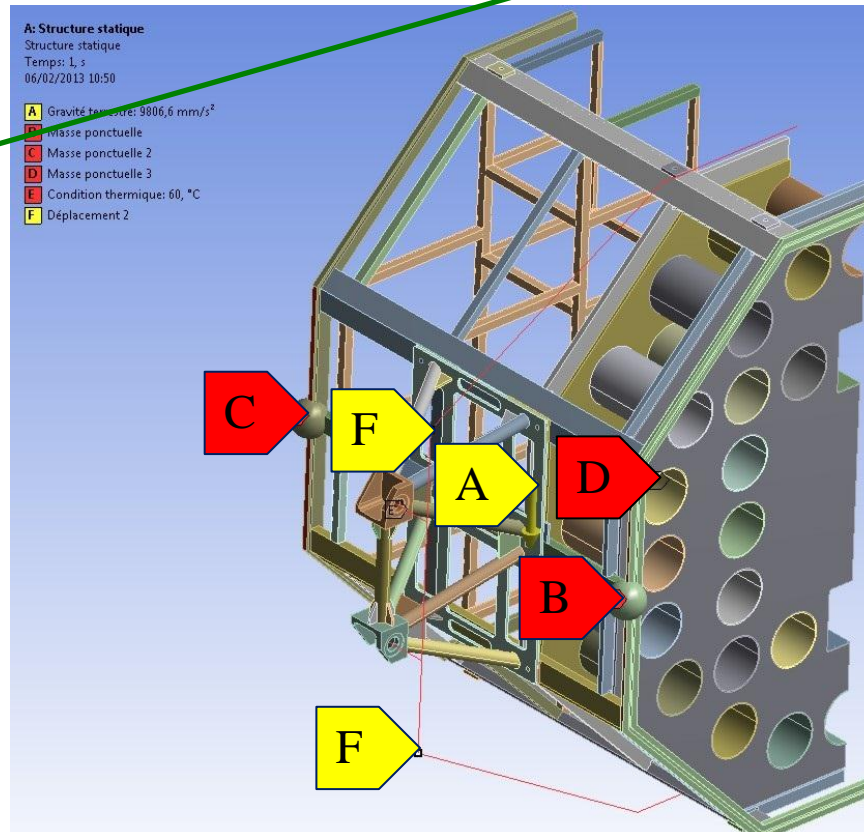
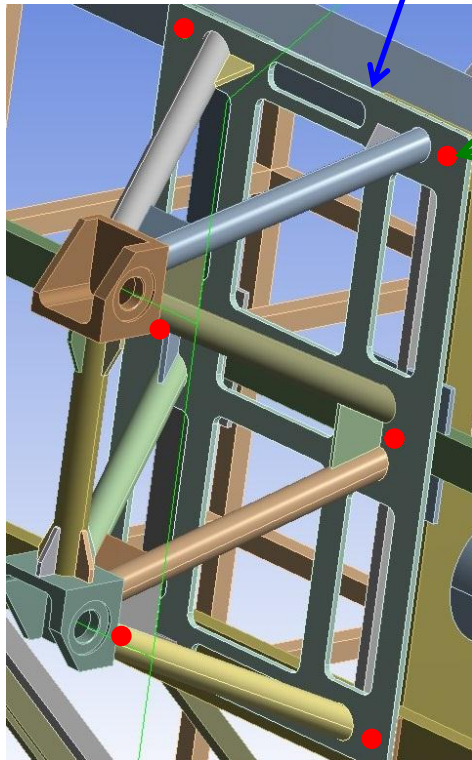
**Problématique** : Prédiction des contraintes liées à la dilatation différentielle entre la caméra aluminium et le cadre acier du télescope lors des variations de température annuelle ( $-20^{\circ}\text{C}$  à  $+60^{\circ}\text{C}$ )



# 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)

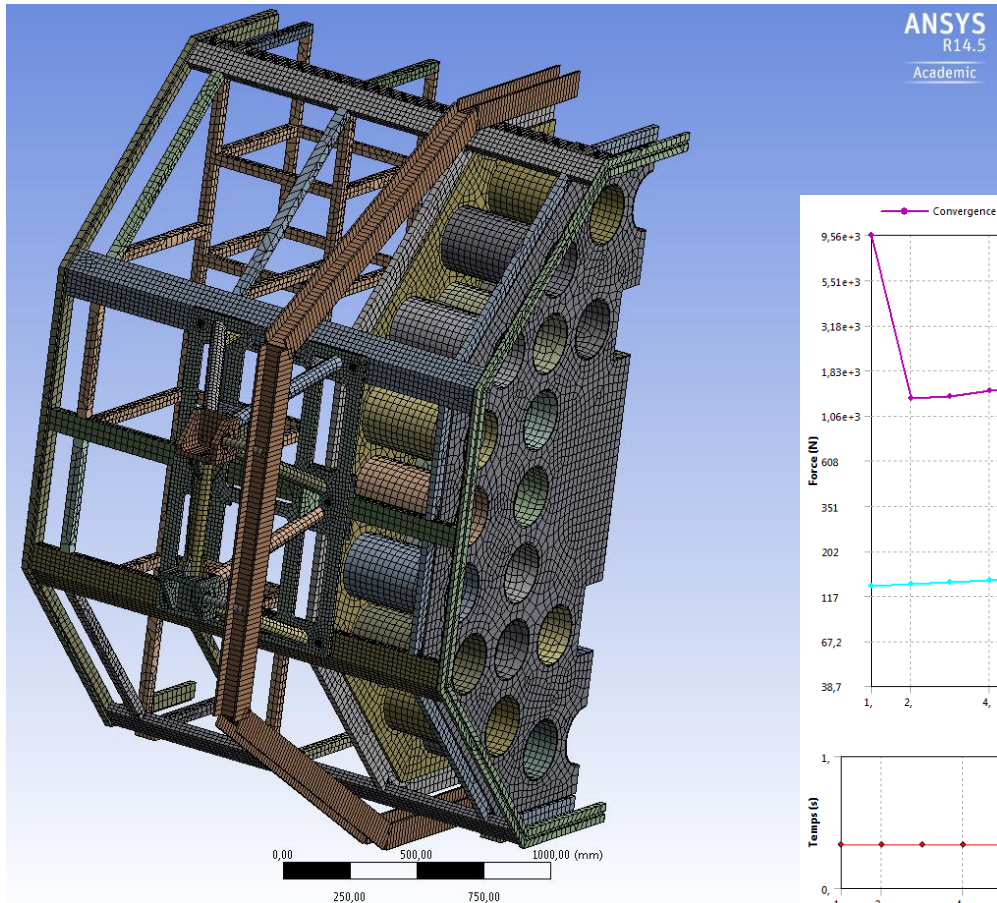


- A** Gravity -Z (0°)
- B** Point mass : 140 Kg
- C** Point mass : 45 Kg
- D** dead mass : 400 Kg
- E** Thermal conditions :  
ΔT = 0°C  
ΔT = -30°C (10→-20)  
ΔT = +50°C (10→60)
- F** Displacement :  
X = 0  
Y = free  
Z = 0



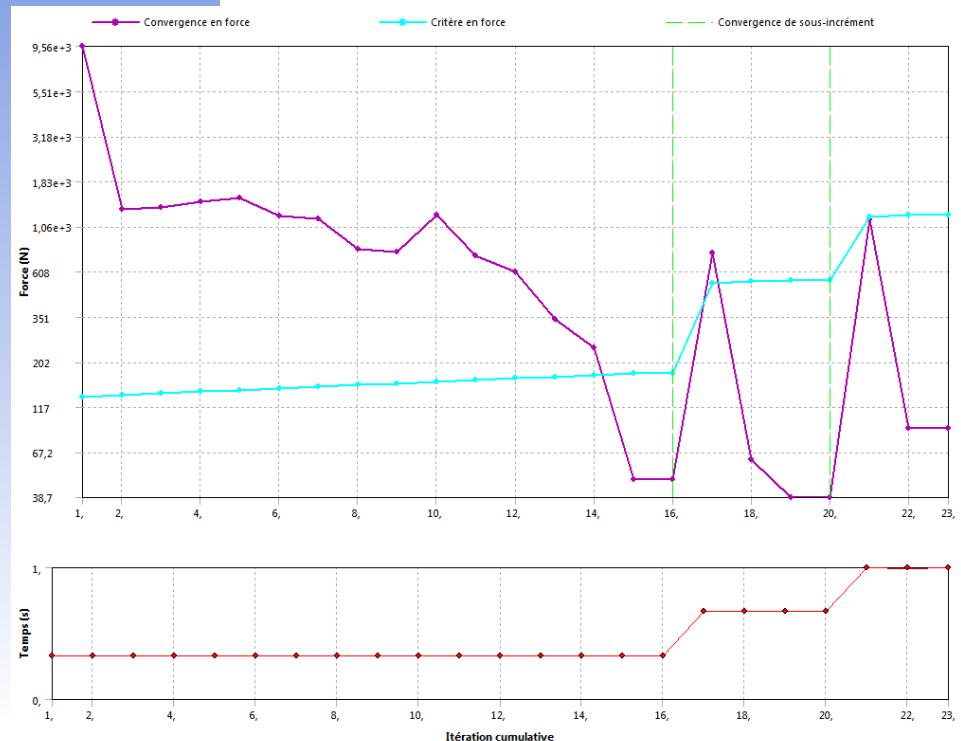
# Ex 1 : maillage & solver

- **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

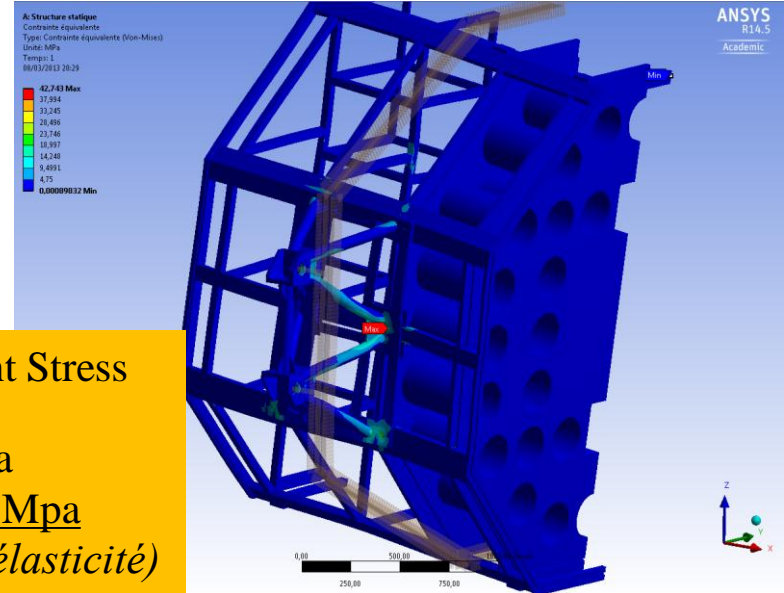
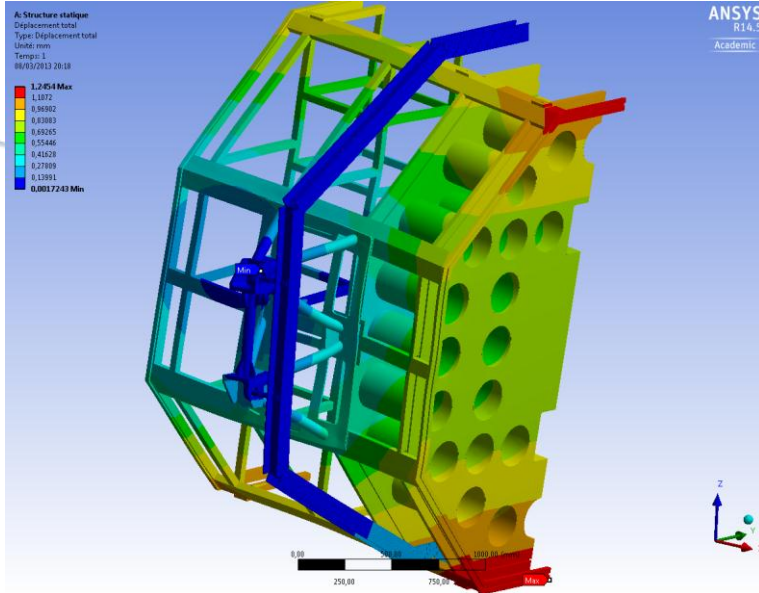


```
----- END ANSYS STATISTICS -----
```

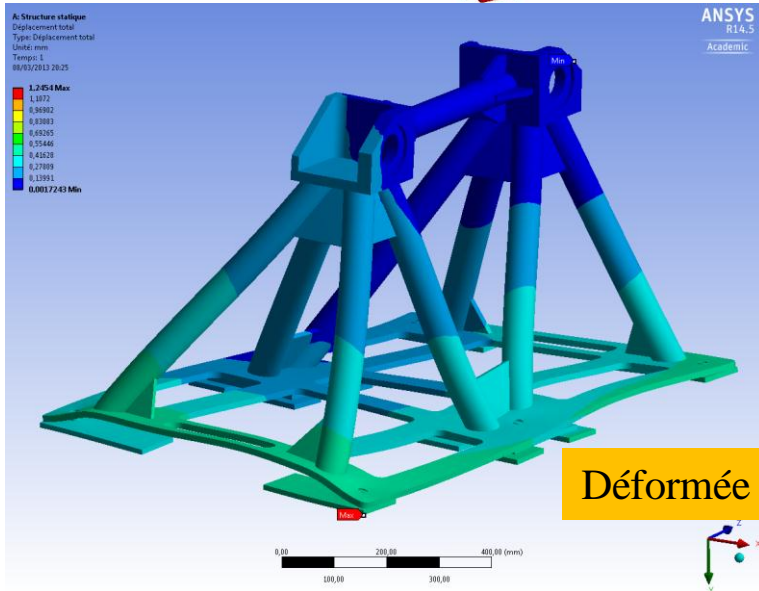
ANSYS RUN COMPLETED			
Release 14.5	UP20120918	WINDOWS x64	
Database Requested(-db)	512 MB	Scratch Memory Requested	512 MB
Maximum Database Used	345 MB	Maximum Scratch Memory Used	5308 MB
CP Time (sec) =	6259.181	Time =	18:01:00
Elapsed Time (sec) =	7195.000	Date =	02/11/2013



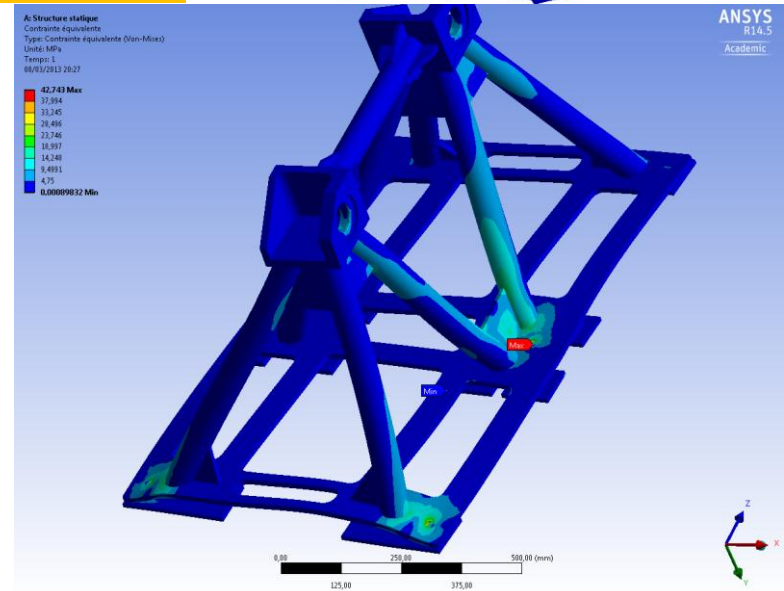
# Ex 1 : résultats ( $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ )



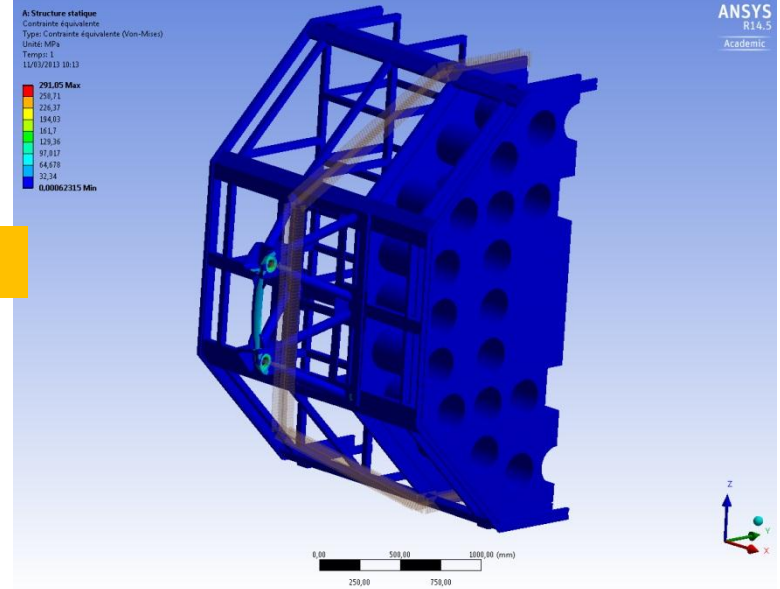
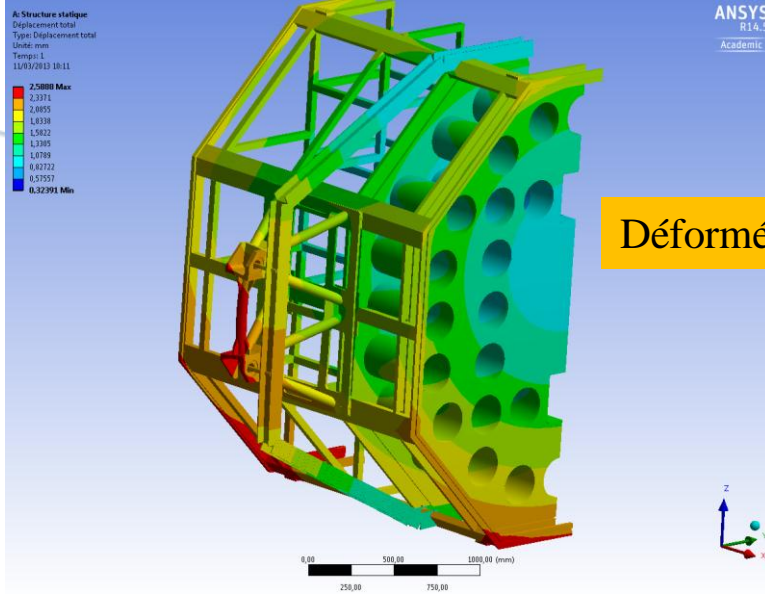
Equivalent Stress  
 (green)  
 $\sigma < 43 \text{ Mpa}$   
 $< \sigma_e \sim 220 \text{ Mpa}$   
 (limite d'élasticité)



Déformée ~ 1,25 mm

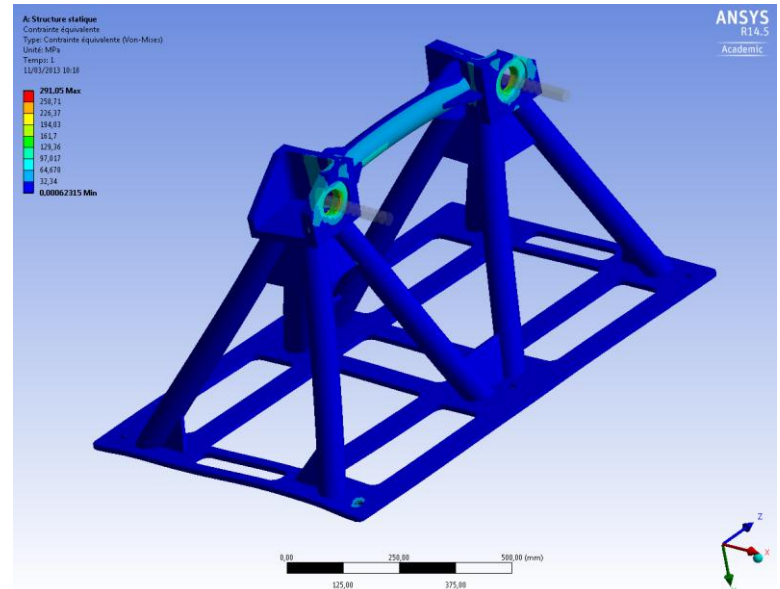
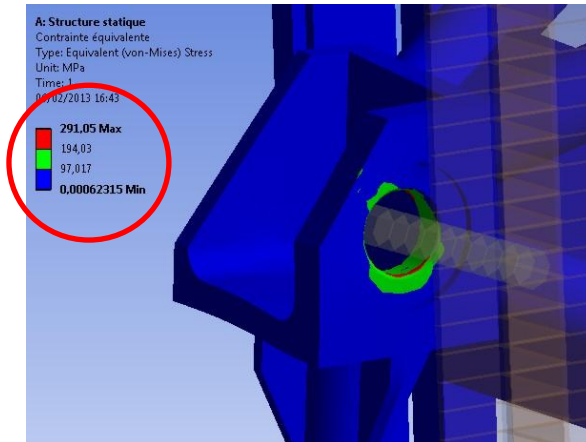


# Ex 1 : résultats ( $\Delta T = +50^\circ\text{C}$ )



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

**DANGER !**  
**À modifier !**

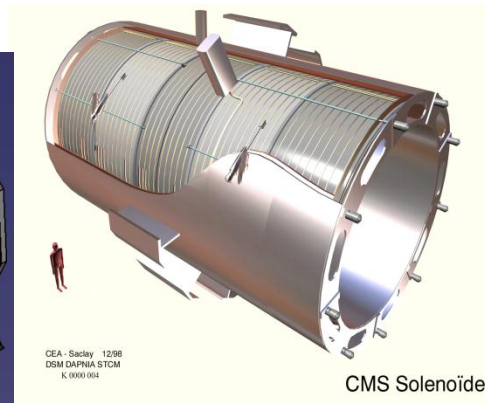
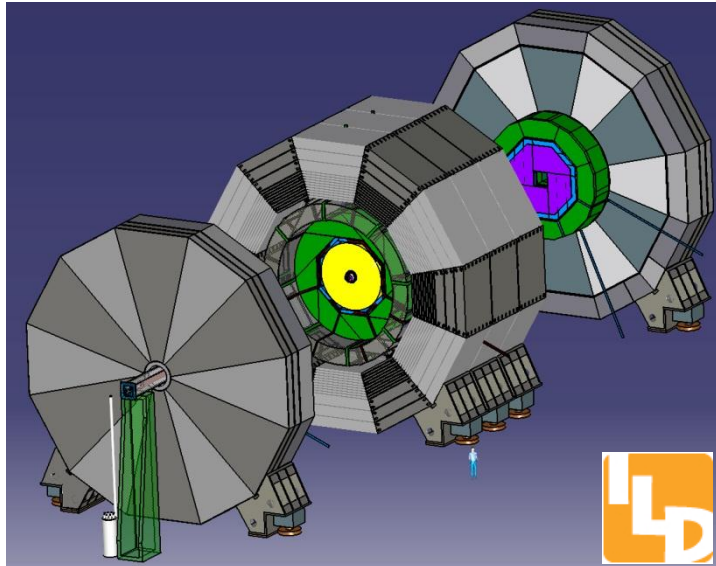


## Ex 2 : comportement sismique d'une structure de détecteur

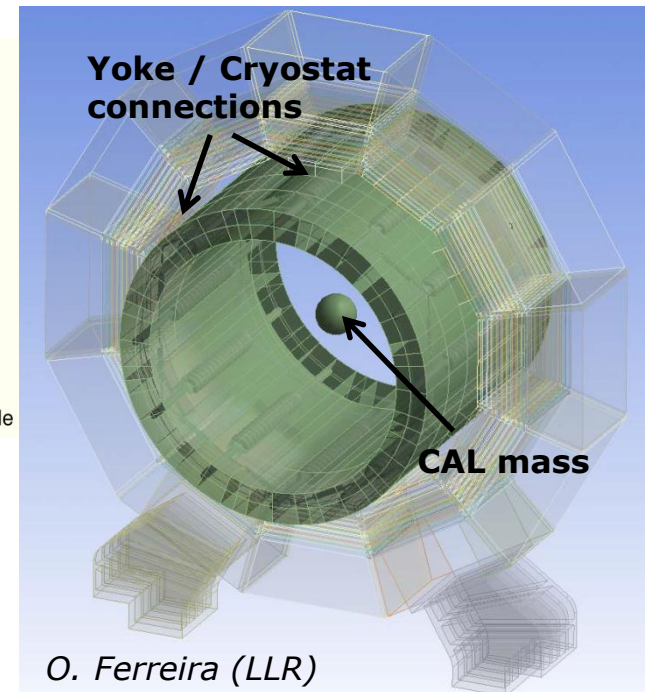
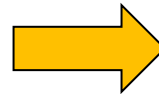
### Projet ILD : détecteur pour le futur collisionneur linéaire ILC

**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



CMS Solenoïde



O. Ferreira (LLR)

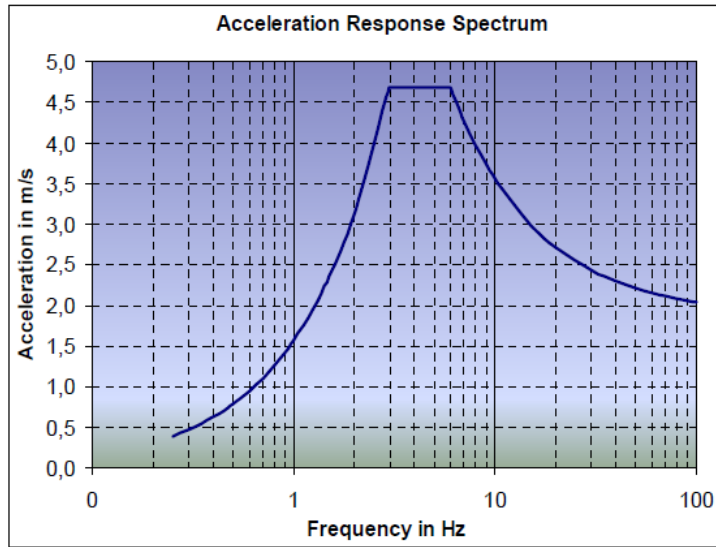
# Ex 2 : modélisation & conditions limites

## • Simplifications :

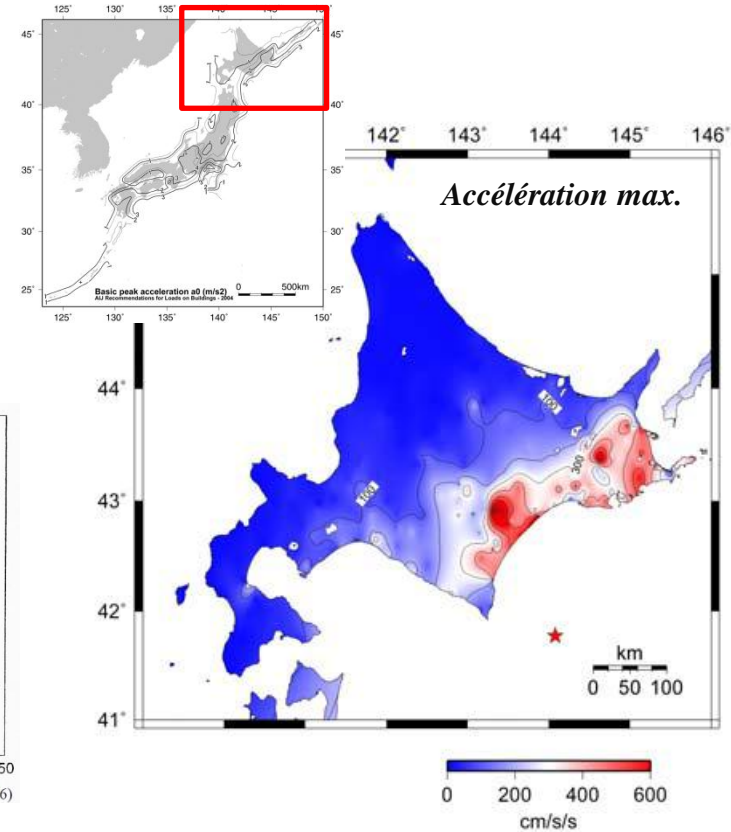
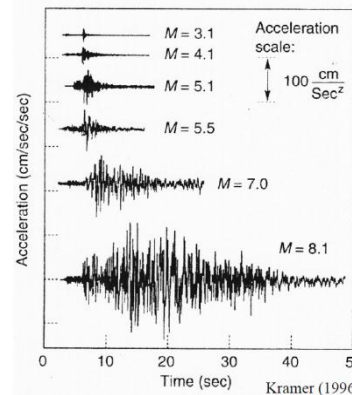
- « à la CMS » : **Anneau central du Yoke** supporte les éléments internes (cryostat, bobine, calorimètres)
- Modélisation des CAL comme une **masse virtuelle**
- La bobine est attachée au cryostat par des ressorts
- **Connexions radiales** entre le Yoke et le cryostat

## • Cas de charges :

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



AIJ - 1993

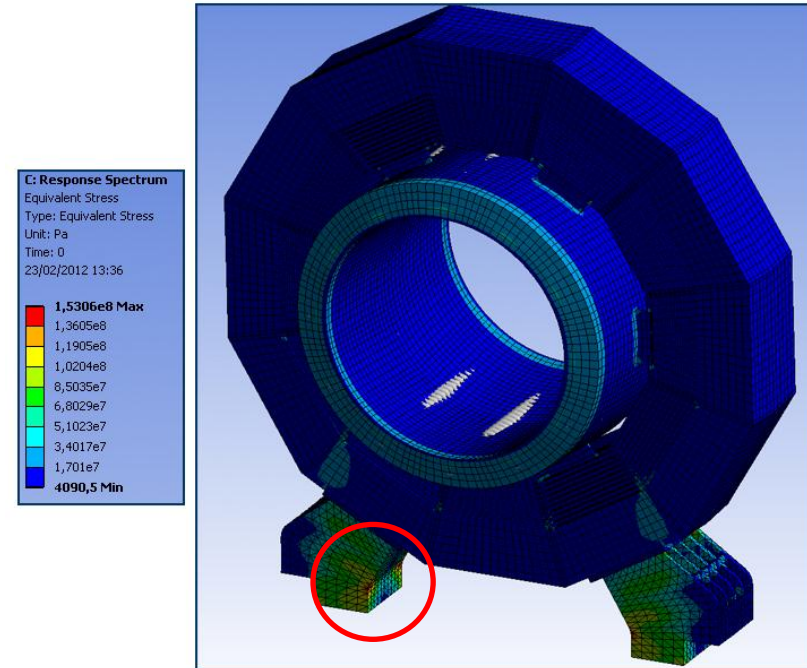
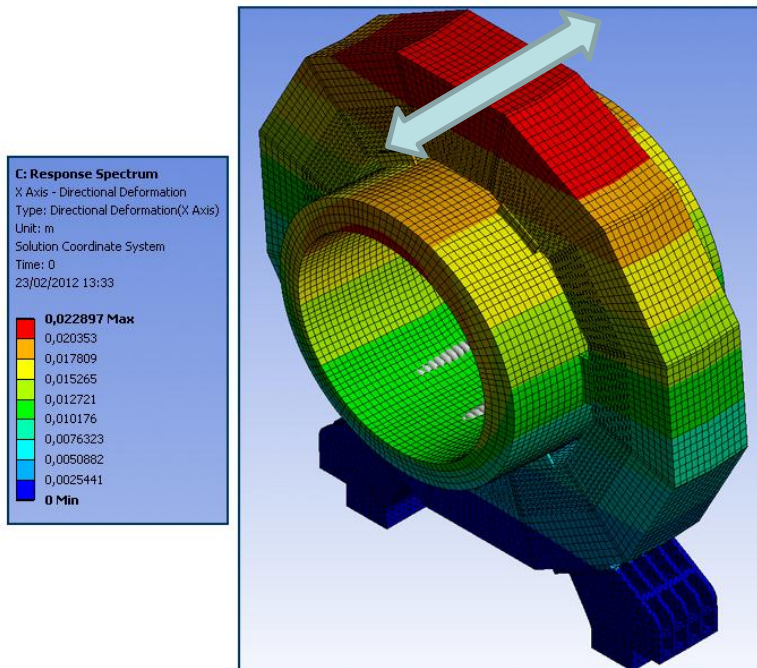


## Parameters for acceleration spectrum :

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

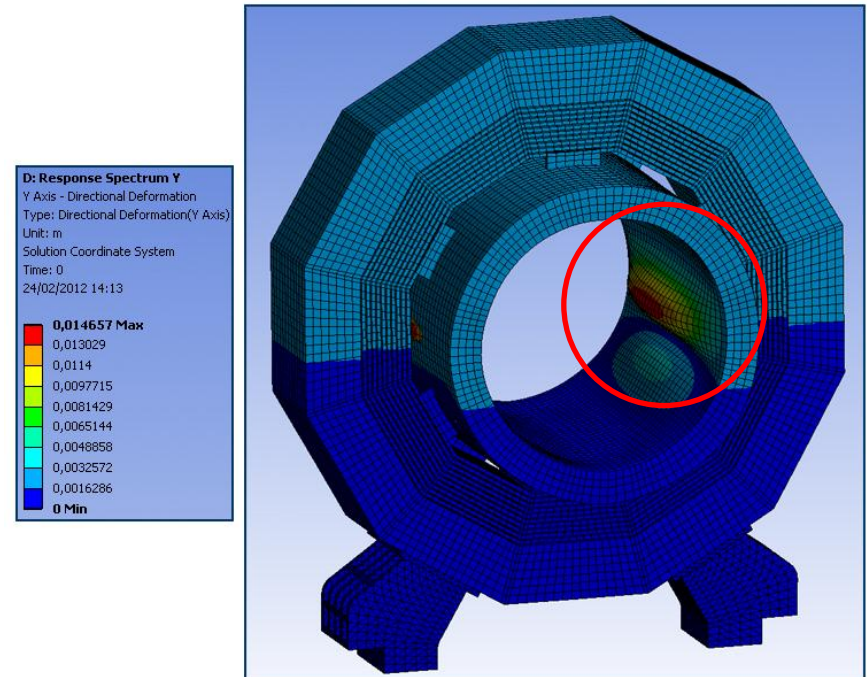
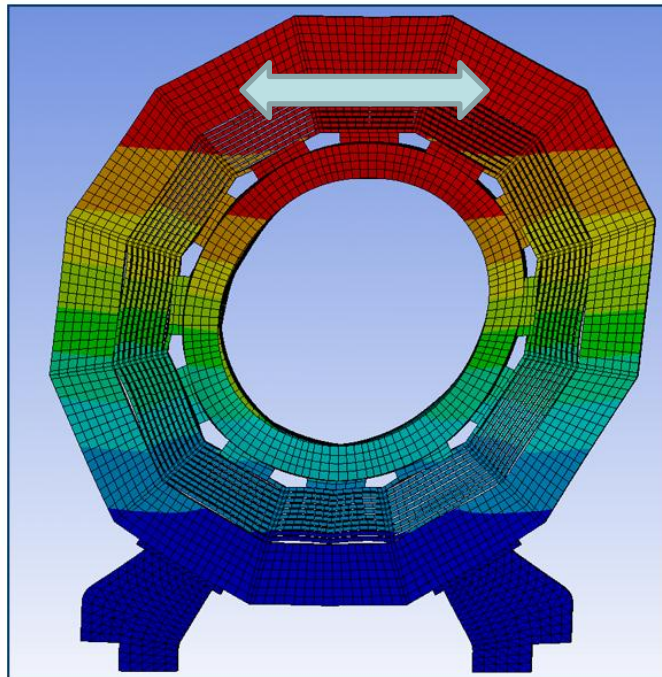
## Ex 2 : Résultats

- analyse RS en appliquant les cas de chargement le **long de l'axe du faisceau** :
  - Oscillation de la structure suivant son 1<sup>er</sup> mode propre
  - Déplacement maximum de 23 mm. La rigidité peut être amélioré en assemblant les 3 anneaux entre eux.
  - Contrainte maxi au niveau des pieds de la structure : 153 Mpa



## Ex 2 : Résultats

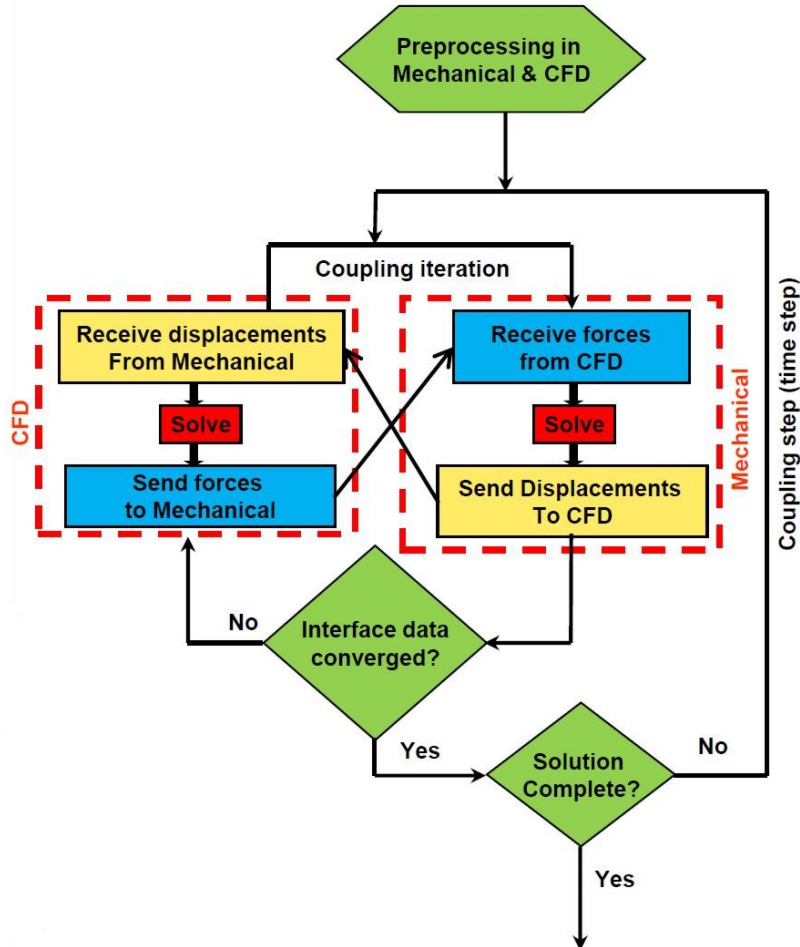
- **Le spectre d'accélération est maintenant appliqué perpendiculairement :**
  - Déplacement plus faible (de l'ordre de 5mm), la structure du Yoke est beaucoup plus rigide dans ce sens.
  - L'impact est plus prononcé sur l'interface des CAL internes (~15mm) : prise en compte nécessaire pour concevoir les rails de supports



# Le dimensionnement : vers les calculs multi-physiques

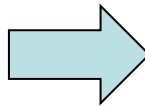
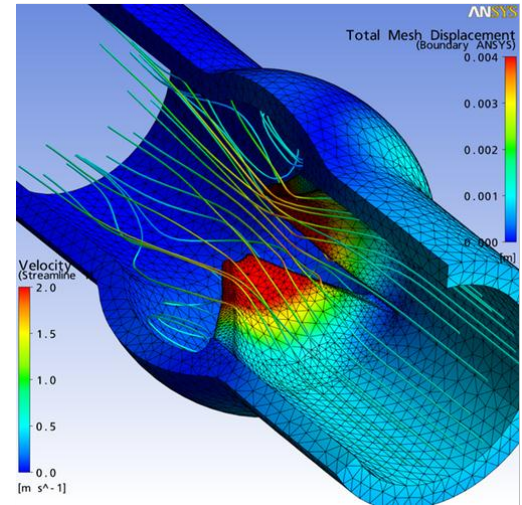
- Analyse du comportement d'un modèle dépendant de plusieurs domaines de physique : **calculs couplés** nécessaires

Description d'un calcul couplé avec ANSYS

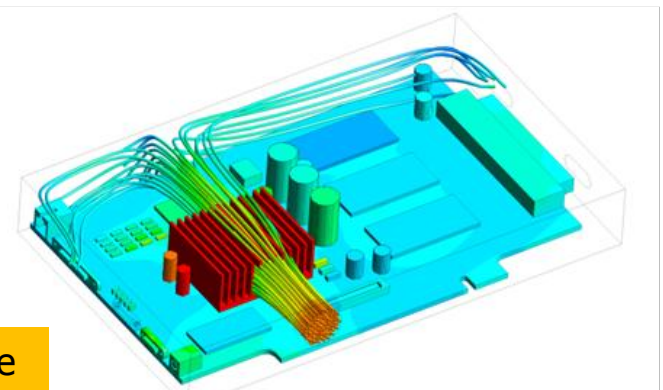


Interaction fluide-structure

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 (Boeing)*

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 :

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

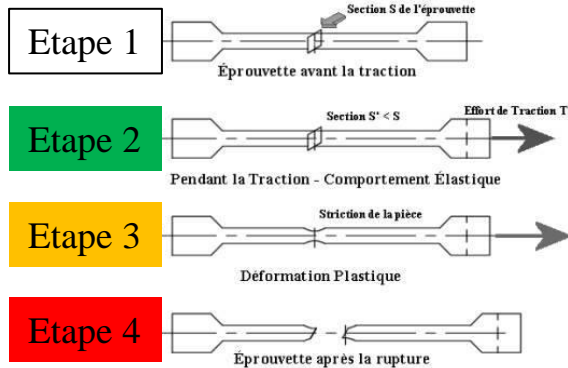
	Air	Eau	Al	LAr	Fe	Pb	W
Z	-	-	13	18	26	82	74
$X_0$ (cm)	30420	36	8,9	14	1,76	0.56	0.35

- 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 ;

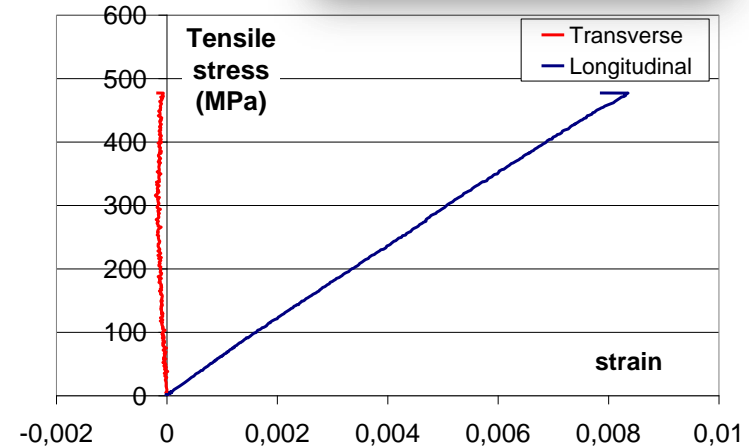
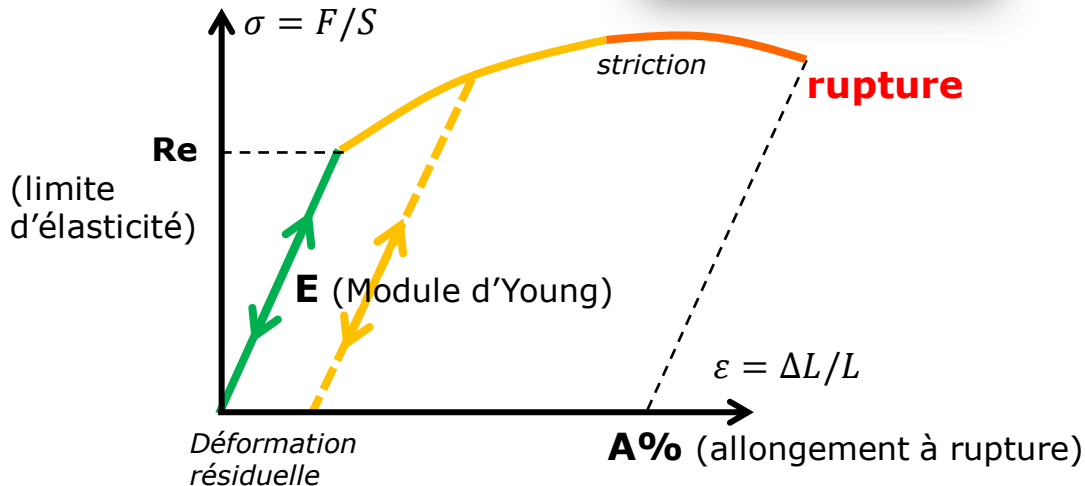
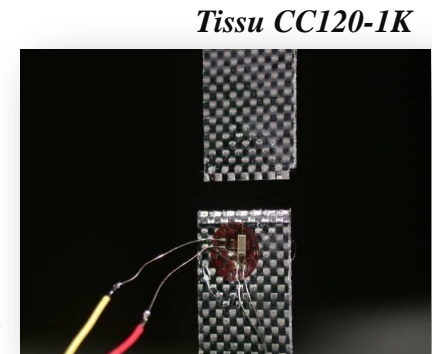
# lois de comportement des matériaux

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)



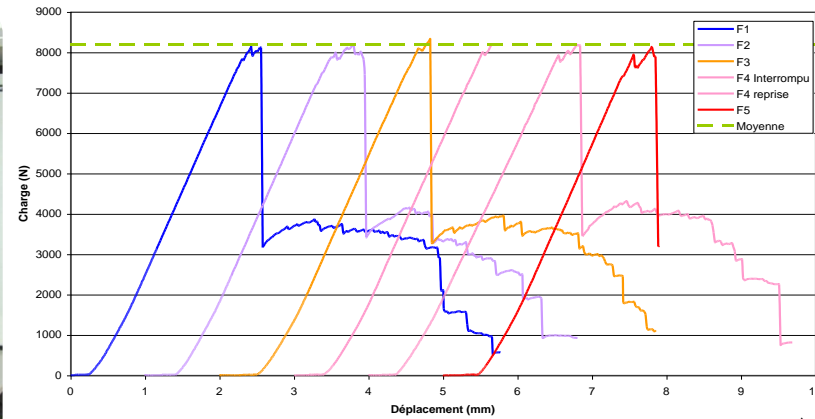
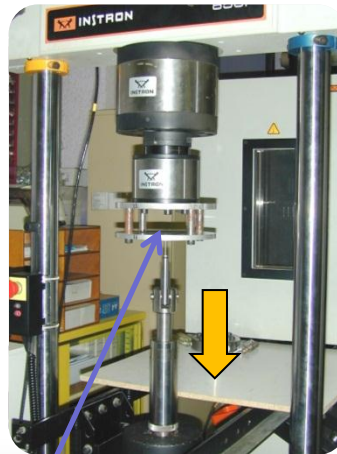
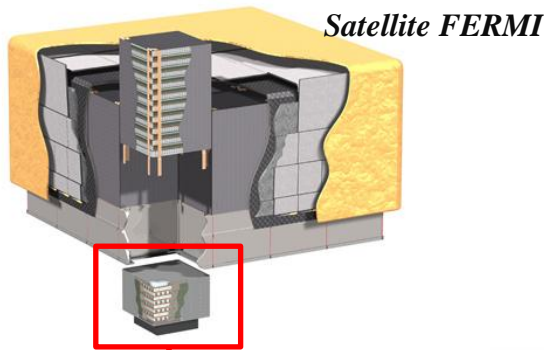
Particularité  
des matériaux  
composites



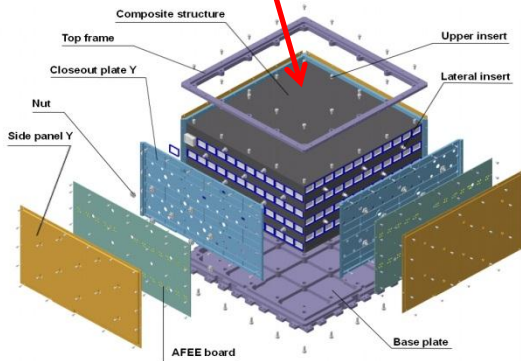
# Les essais mécaniques : validation/qualification

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

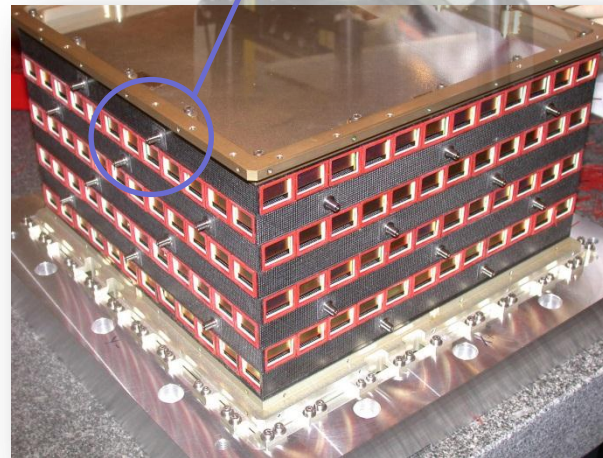
## 1- Caractérisation de l'attache inférieure (insert/composite) : (traction/torsion/flexion)



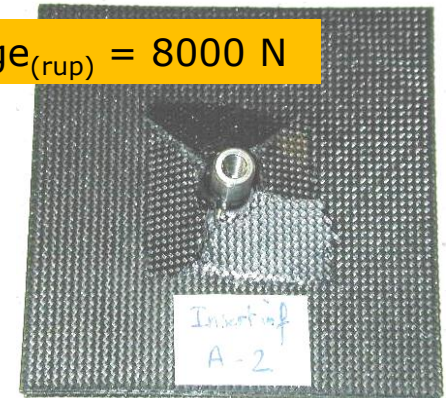
*Résultats de traction (5 éprouvettes)*



*Module ECAL (x16)*



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

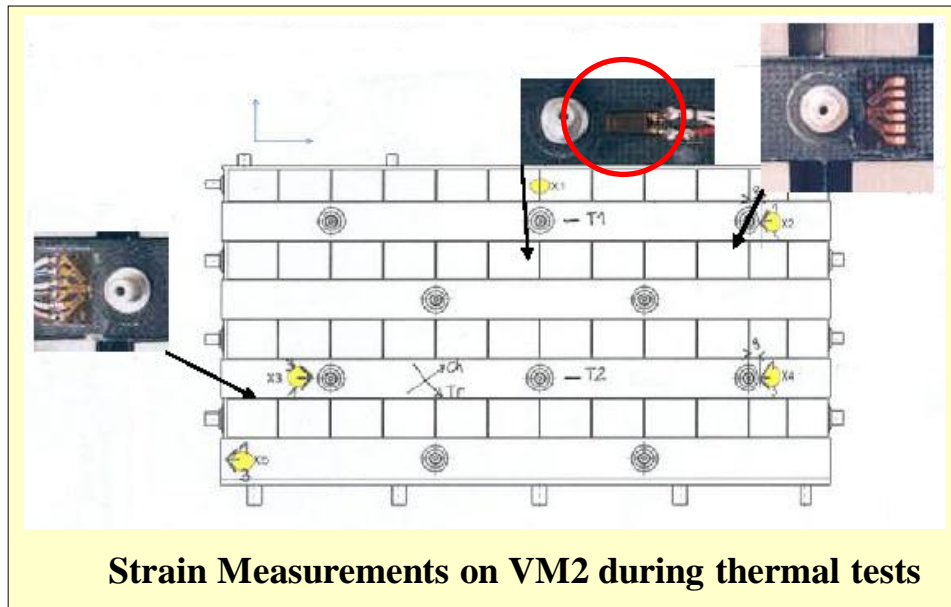


*Éprouvette de test après rupture*

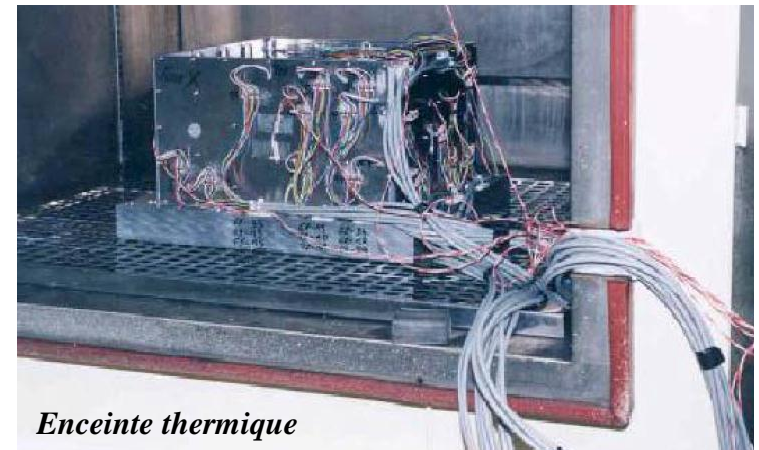
# Les essais mécaniques : validation/qualification

## 2- Tests thermomécanique :

- 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



Enceinte thermique

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

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

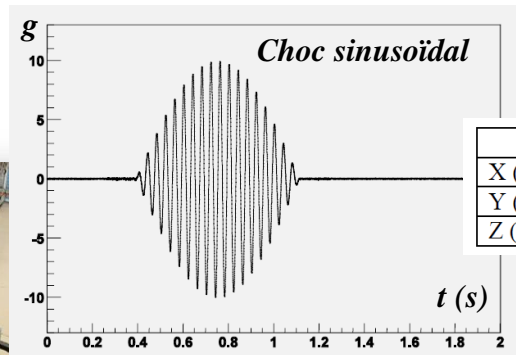
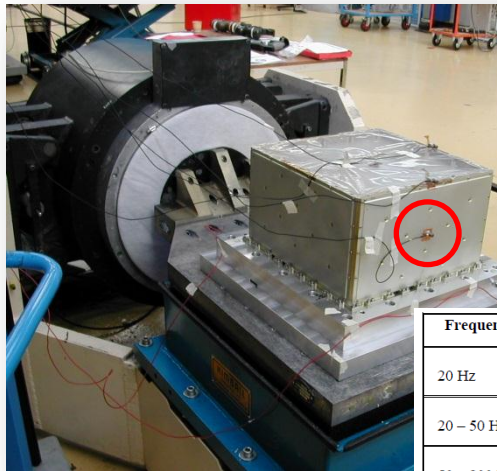
# Les essais mécaniques : validation/qualification

## 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

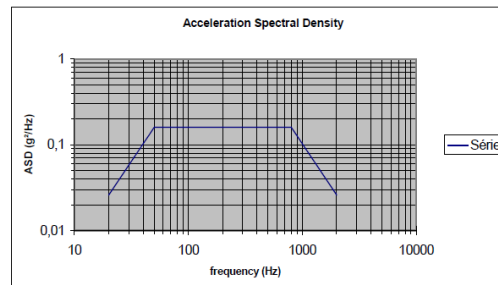


Acceleration  
X;Y : +6,8 g  
Z : +8,5 g

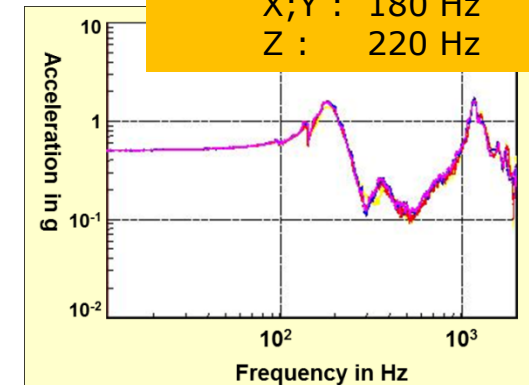
Axis	Frequency	Acceleration	Cycles
X (Transverse)	25 Hz	+6.8	5
Y (Transverse)	25 Hz	+6.8	5
Z (Thrust)	25 Hz	+8.5	5

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

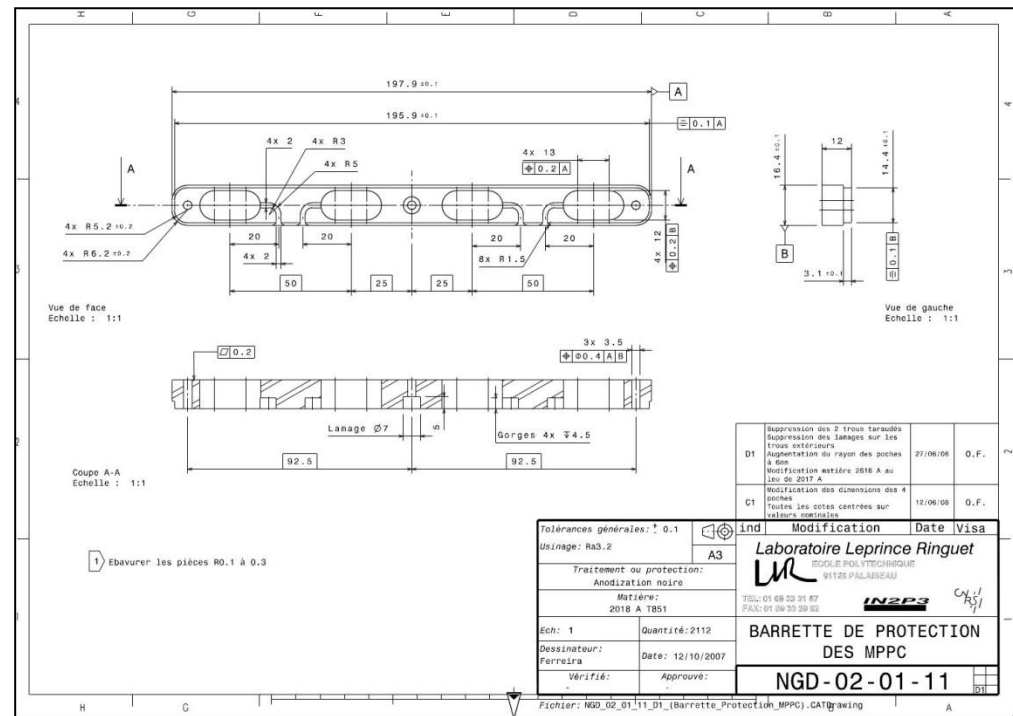




- **Réalisation effective des opérations permettant d'élaborer le produit :**

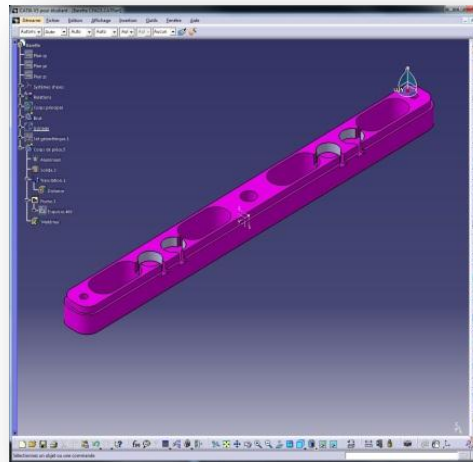
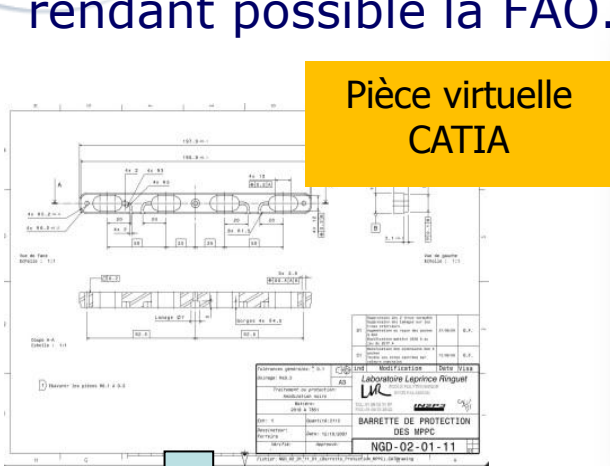
- **L'usinage** : techniques de fabrication de pièces mécaniques basées sur le principe d'enlèvement de matière de façon à donner à une pièce brute la forme voulue. Utilisation de machines-outils et d'outils tranchants qui permettent de grandes précisions dimensionnelles. (tournage, fraisage, rectification, Electro-érosion, ...)
- **Le soudage** : techniques permettant une assemblage permanent entre 2 pièces ;
- **L'emboutissage** : techniques de génération de pièces par déformation de tôles minces.
- ...

La **définition** de la pièce se fait par l'intermédiaire d'un **plan de détails 2D**, qui définit la géométrie, les côtes ainsi que les tolérances dimensionnelles et les commentaires nécessaires

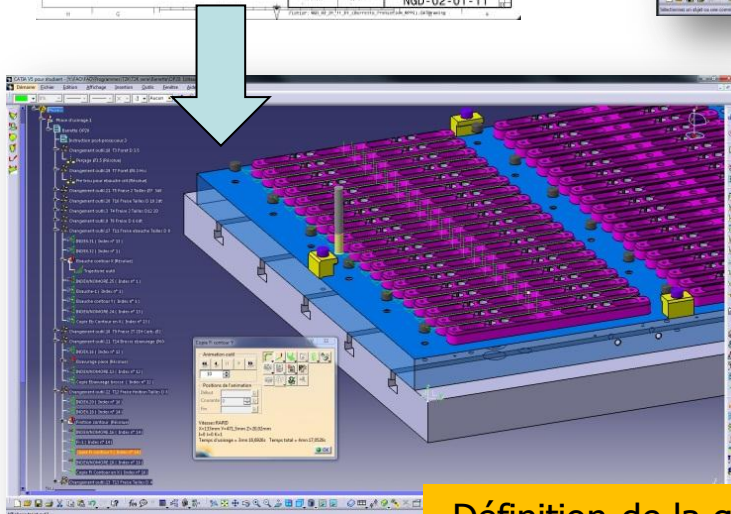


# La Fabrication Assistée par Ordinateur

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



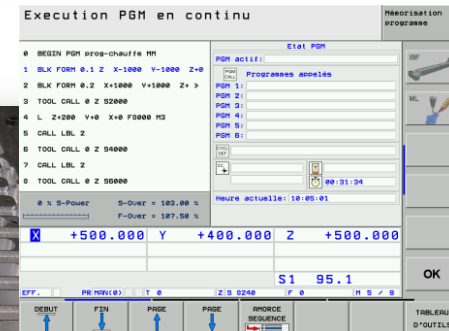
Centre d'usinage



Définition de la gamme & simulations d'usinage



Usinage sur machine



# 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

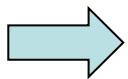
- **Objectif** : rendre le détecteur opérationnel
- **Etat final** : assemblage terminé  
fonctionnalités testées en laboratoire

**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 ⇒ gestion des priorités

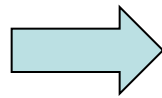
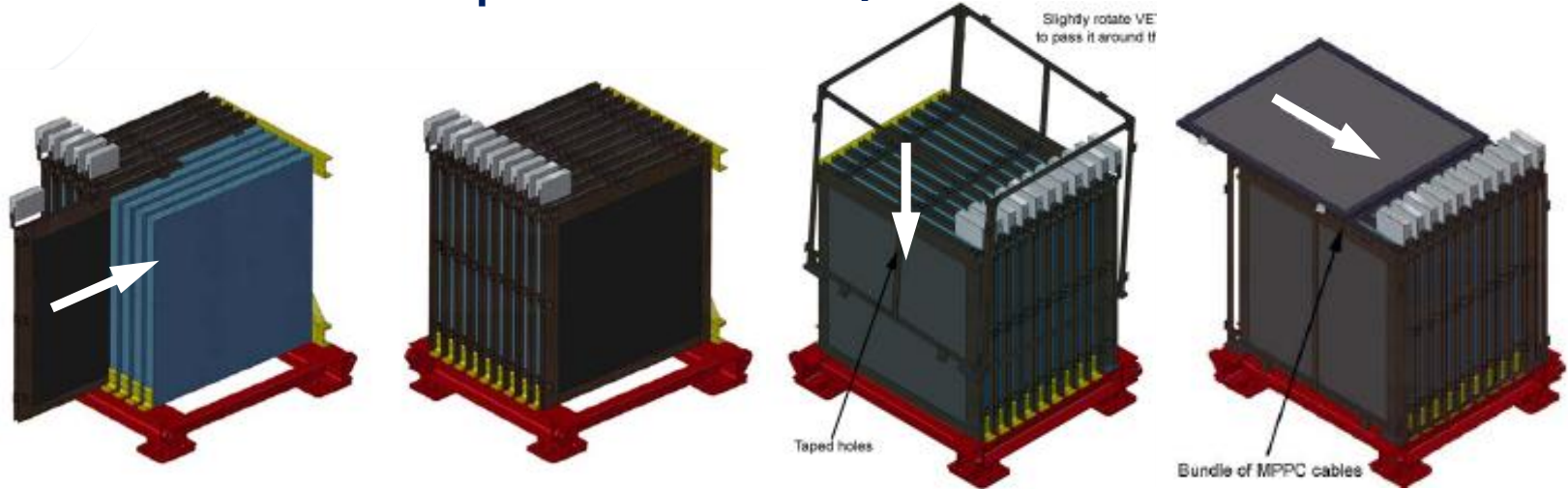
**Malgré tout, en général, la faisabilité est acquise  
le scénario de montage existe dans les grandes lignes**



**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.**

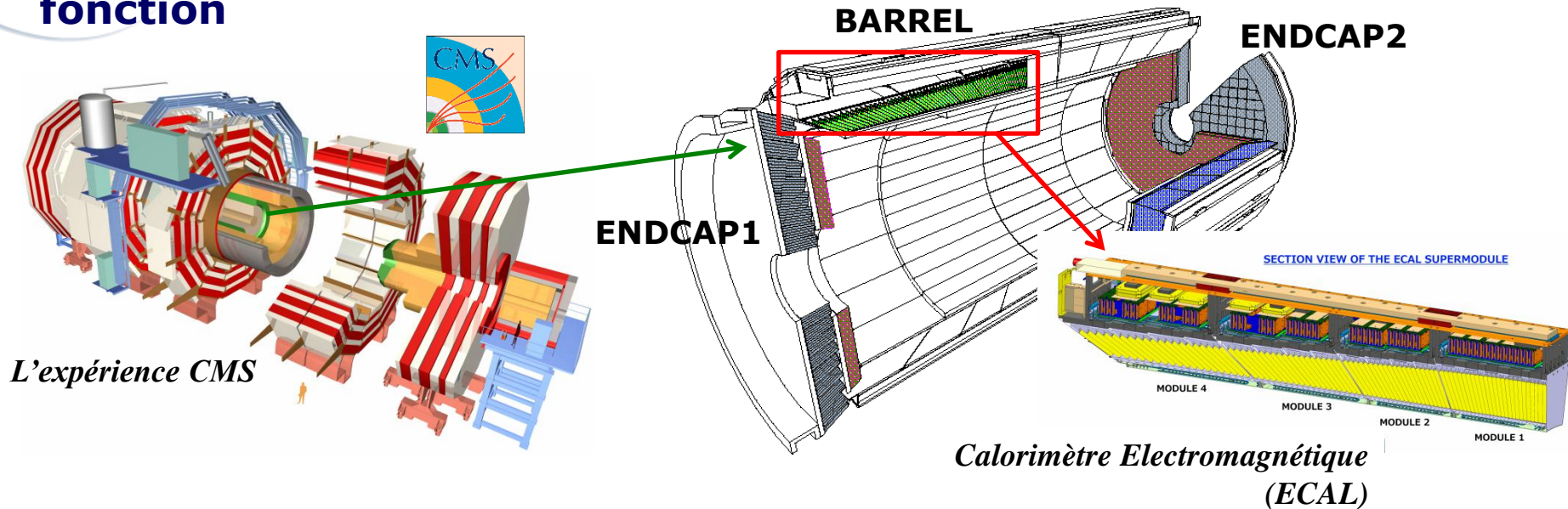
**La conception d'un outillage répond aux mêmes exigences que celle d'un détecteur** ⇒ **les mêmes règles sont applicables (voir 1ère partie du cours)**

## Quelques différences :

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

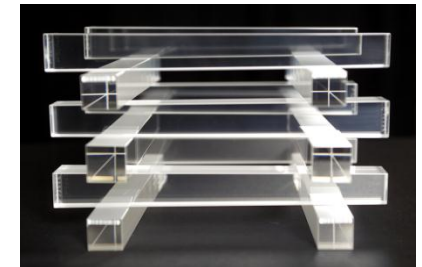
# Exemple : intégration du ECAL de CMS

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



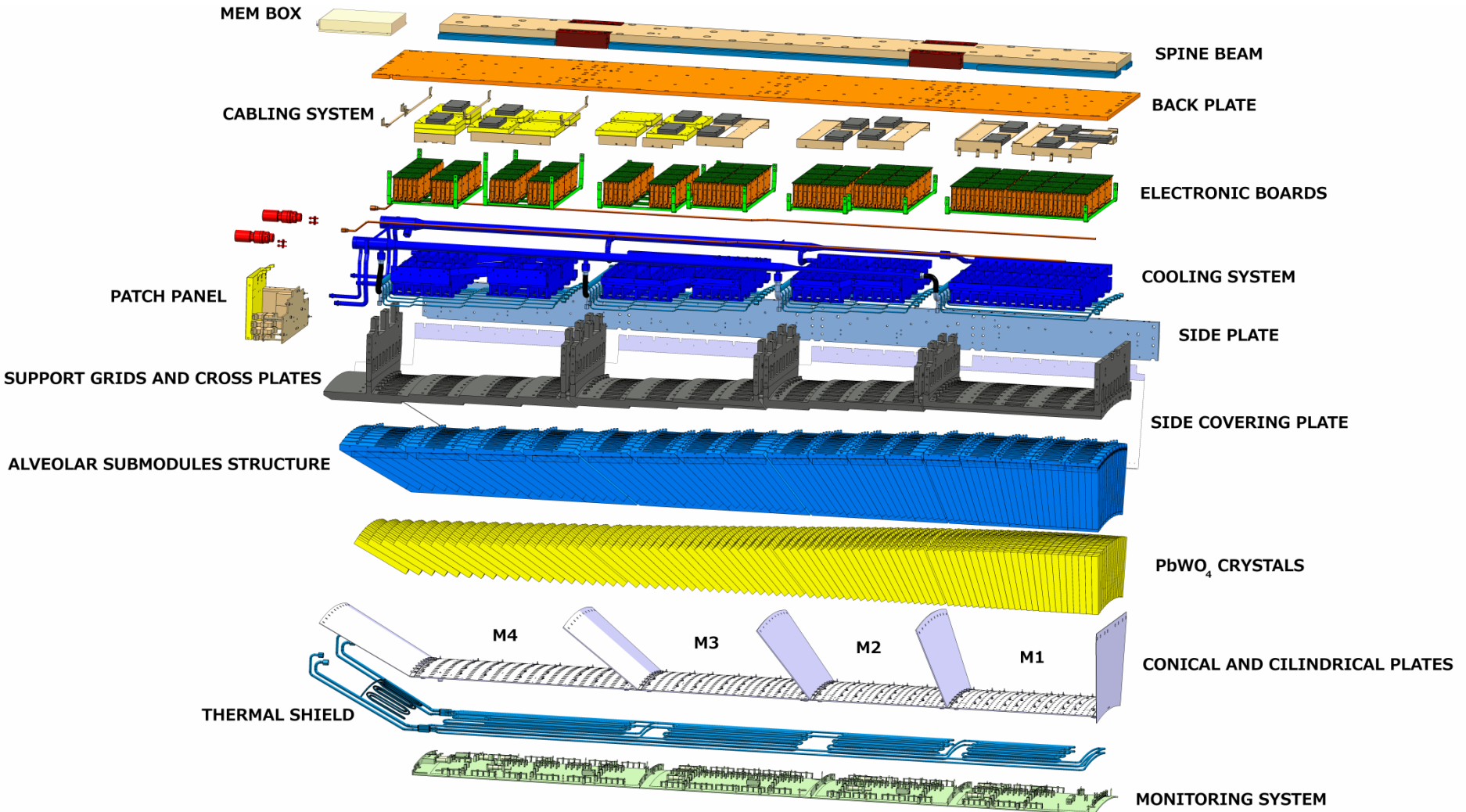
- **Le calorimètre électromagnétique de CMS :**

- ~ 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)

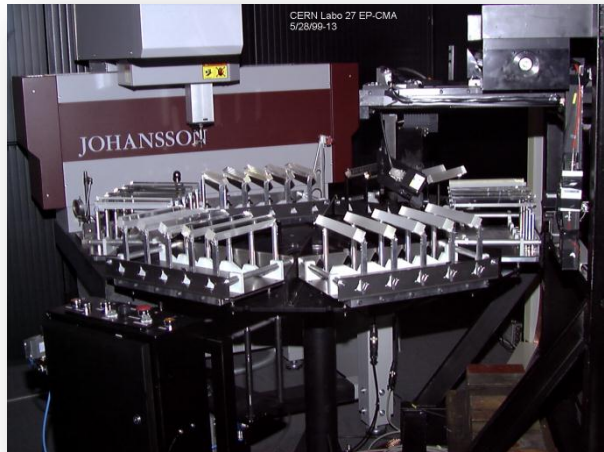


*I.G. Tabares (Cern PH-CMX-DS)*

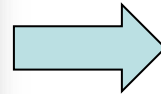


# Intégration Barrel

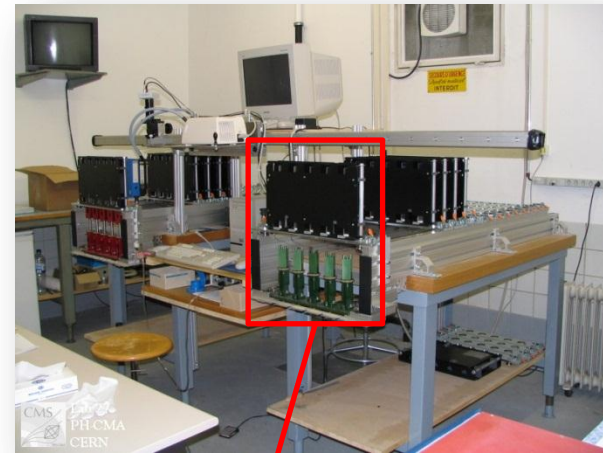
1- Caractérisation des **cristaux** (x61200) :  
 dimensions (21,8x21,8x230 mm<sup>3</sup> ; X<sub>0</sub>=25,8)  
 & propriétés optiques



(05/1999)



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

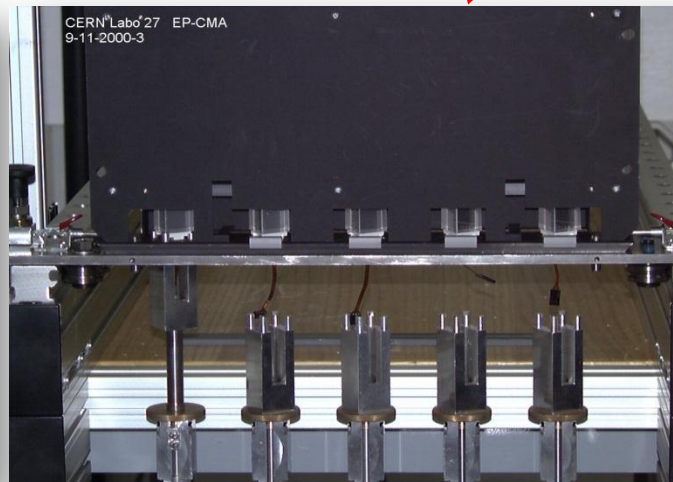


*Machine spéciale  
de collage*

2.a- **dépôt de colle** calibrée

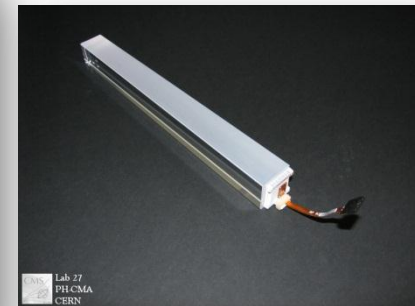


2.b- **Collage**



(11/2000)

*Unité de détection*



# Intégration Barrel

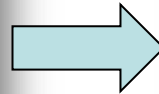
3- Montage des **sous-modules** (x6120) :



CMS  
 Lab 27  
 PH.CMA  
 CERN

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

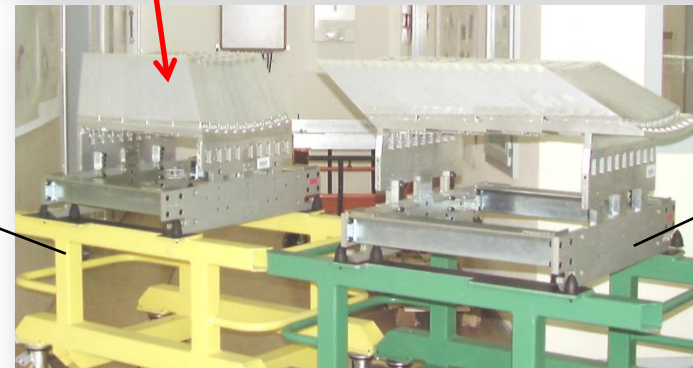
**Robot de manipulation**



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

CMS  
 Lab 27  
 PH.CMA  
 CERN

**Table de transport**



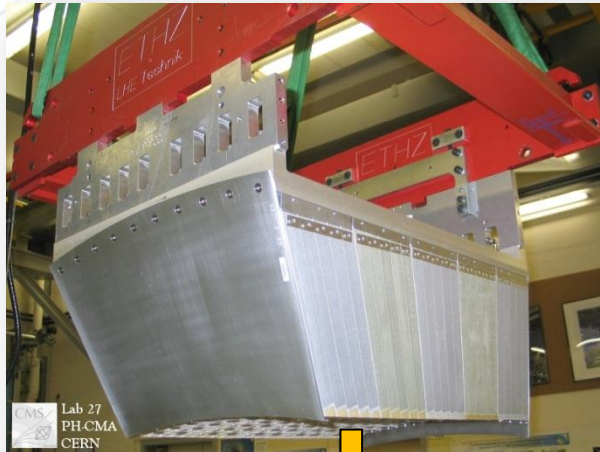
*(04/2002)*

**Support**

*2 types de modules*

# Intégration Barrel

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

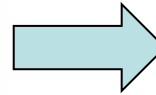


CMS  
Lab 27  
PH.CMA  
CERN



CMS  
Lab 27  
PH.CMA  
CERN

*Structure principale du supermodule*



CMS  
Lab 27  
PH.CMA  
CERN

**Cadre rotatif**

**Support**

*Supermodule*

# Intégration Barrel

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

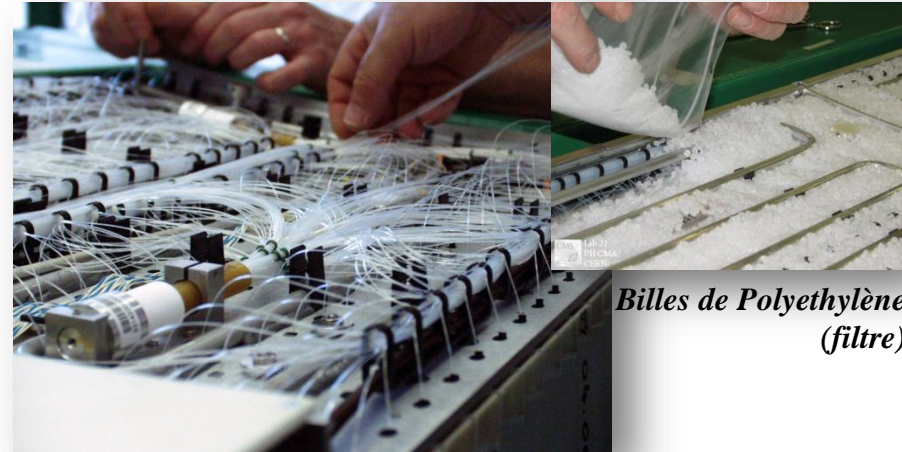


CMS Lab 27  
 PH.CMA  
 CERN

*Plaque d'interface thermique*

(07/2003)

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



*Billes de Polyéthylène  
(filtre)*

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



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



# Intégration Barrel

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



(2004)

*Caisse de transport*

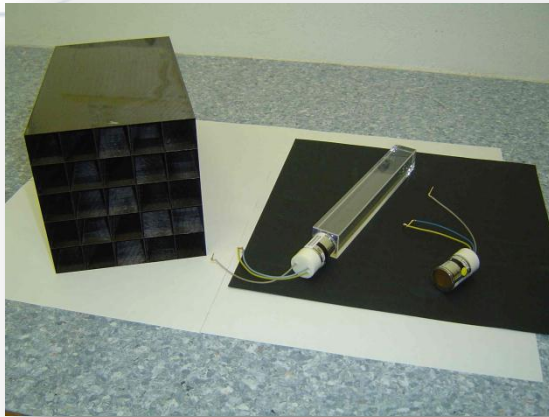


La phase de **transport** ne doit jamais être négligée : elle est **fondamentale** pour la **sécurité** du détecteur (+ **budget nécessaire** !)

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

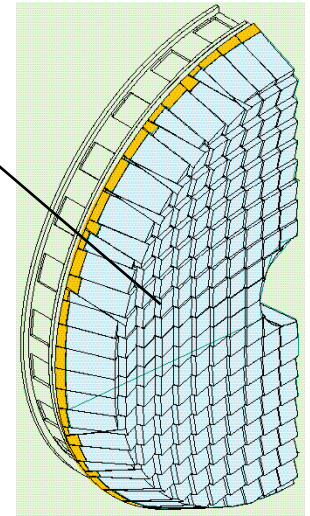
# Intégration Endcaps

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



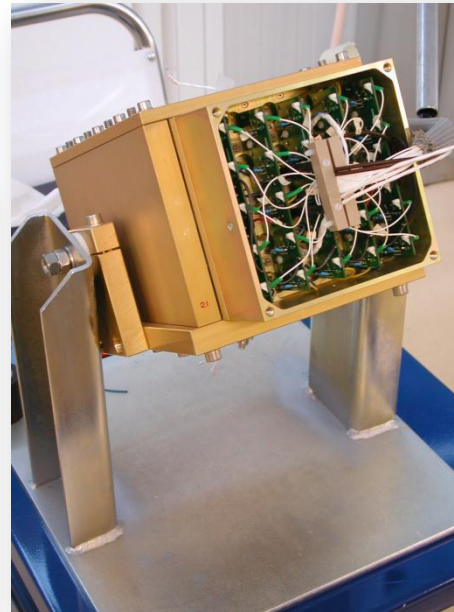
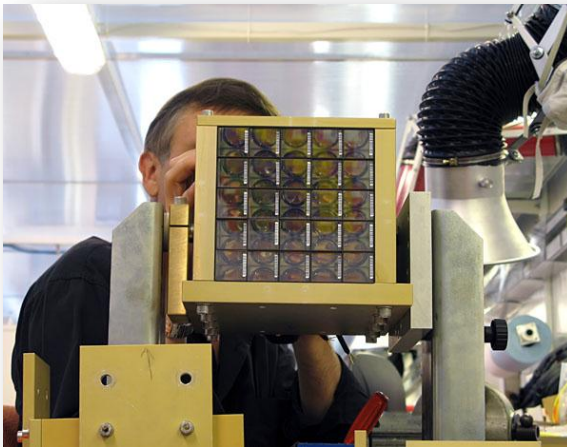
*Structure alvéolaire (25 alv.) et cristal adapté à la géométrie des bouchons*

Supercristal



*“Dee” de 3662 cristaux  
constituent les bouchons*

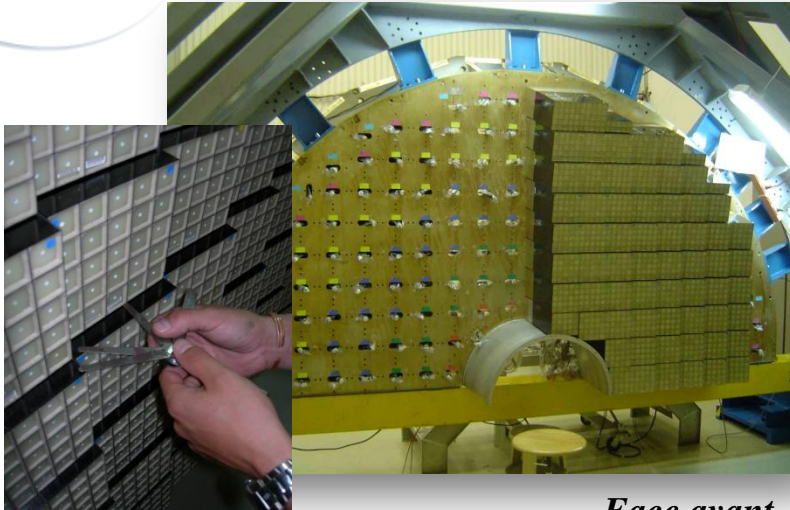
2- Montage des **Supercristaux** (x624):



*Outillage de montage*

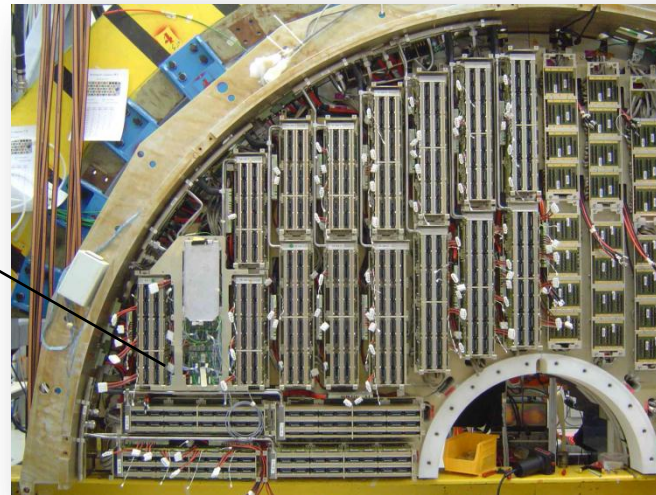
# Intégration Endcaps

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

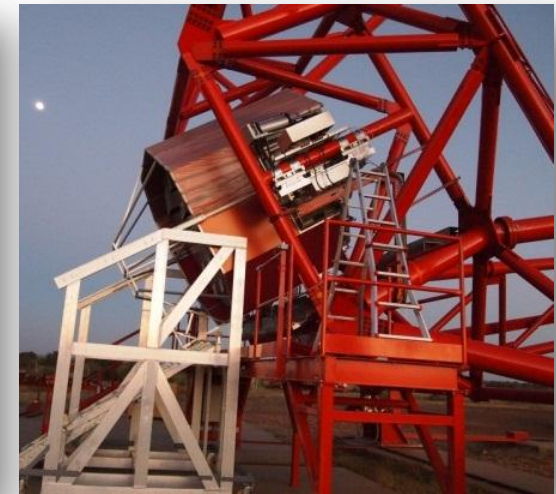
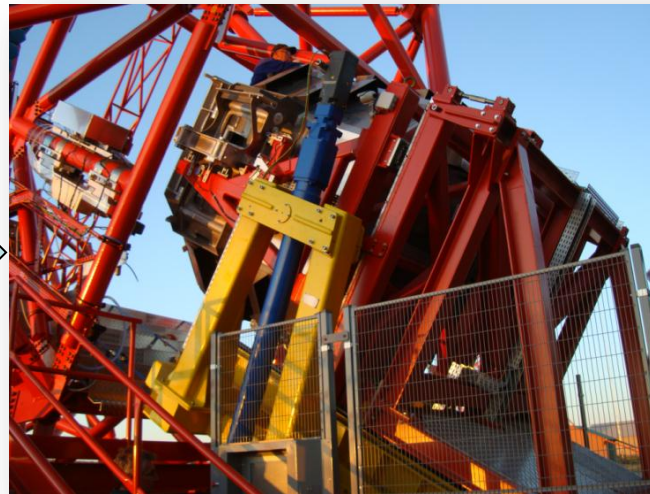
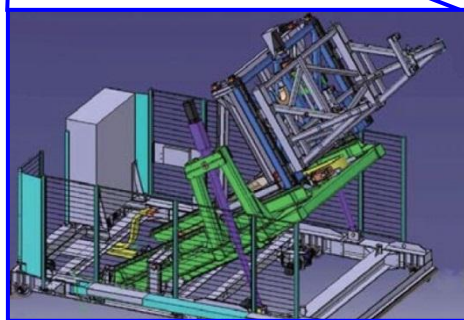
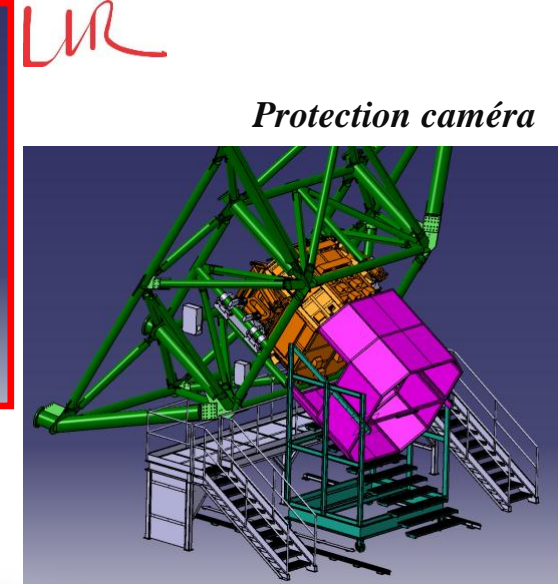
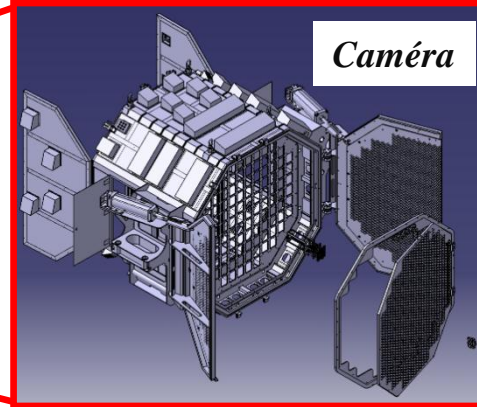
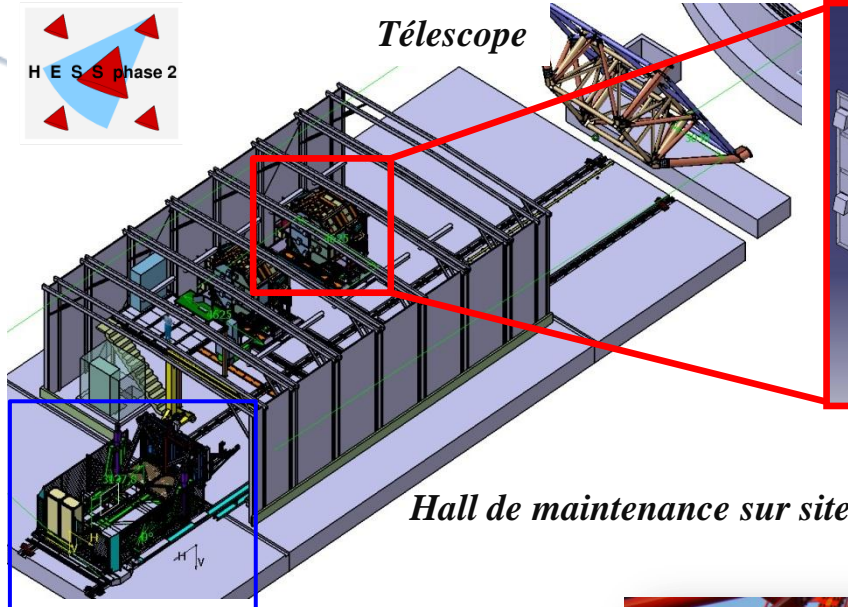
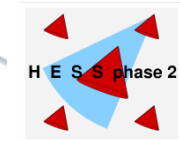
- **Objectif :** Installer le détecteur dans **le site de l'expérience**
- **La méthodologie est proche de celle de l'intégration**
  - Développement **d'outillages spécifiques**
  - Importance des travaux de préparation et de suivi : **procédures, traçabilité**
- **Les contraintes sont plus spécifiques**
  - 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



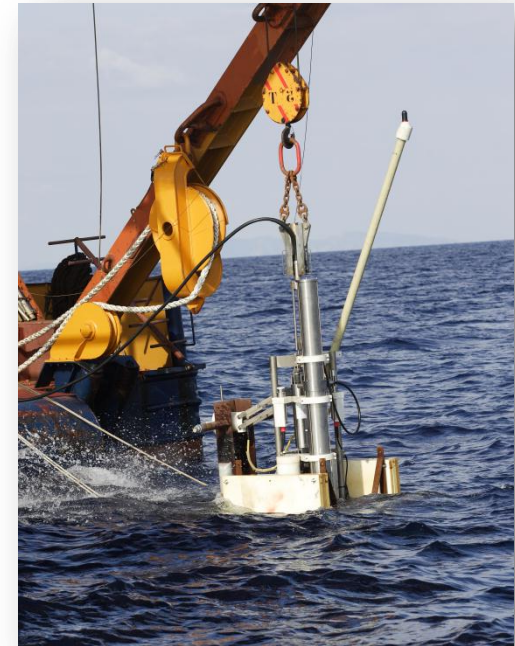
# Simulation des installations sur site : CAO 3D

## 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*



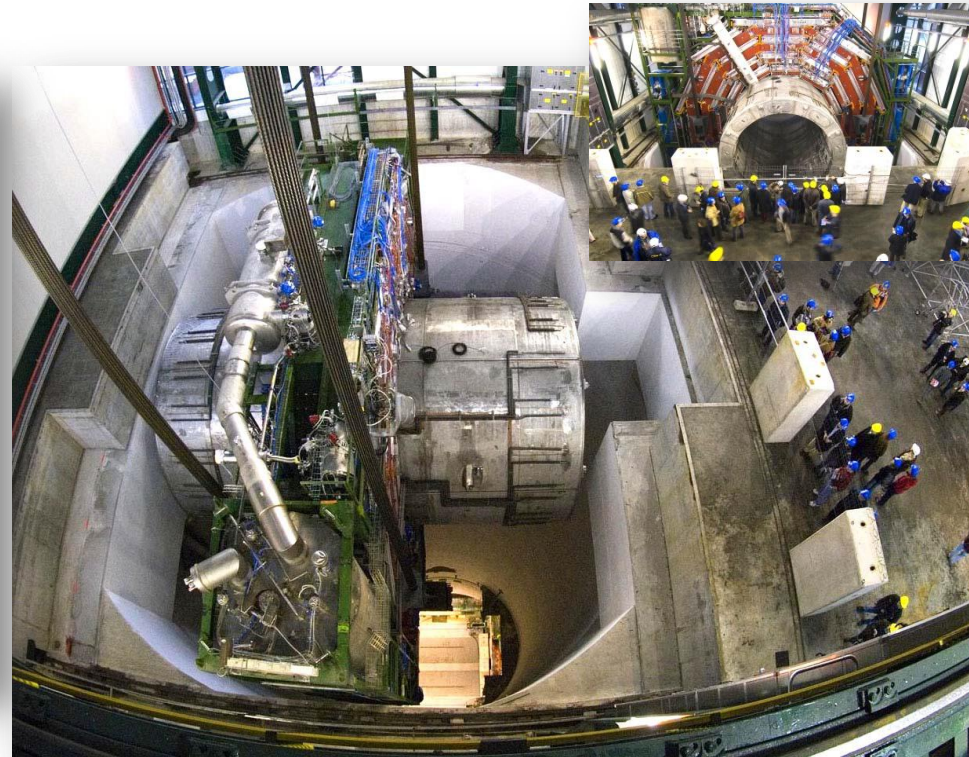
*Lancement le 11 juin 2008  
(Delta II)*

# 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

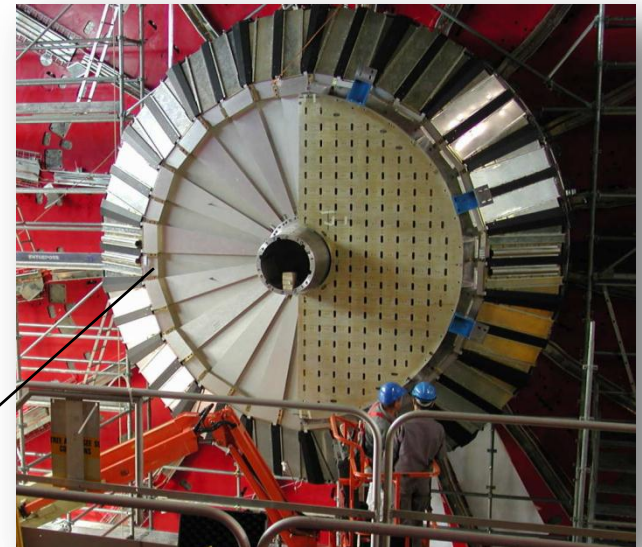


*Patin SM*

**Rail support**



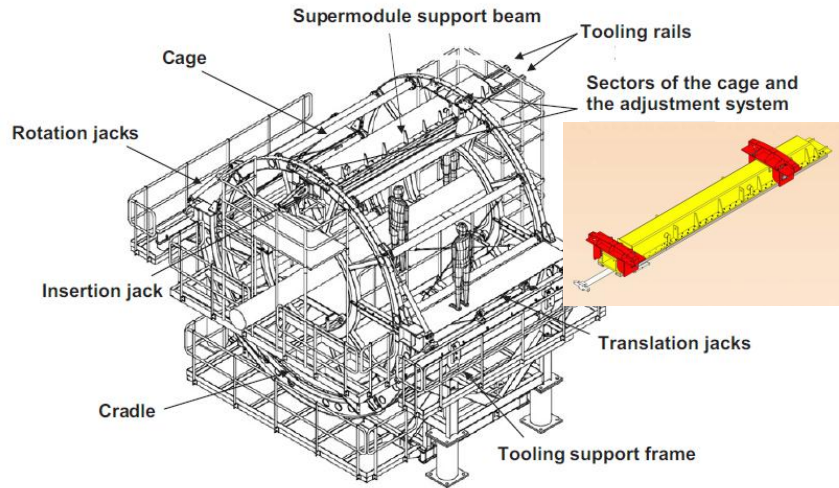
*HCAL (CMS)*



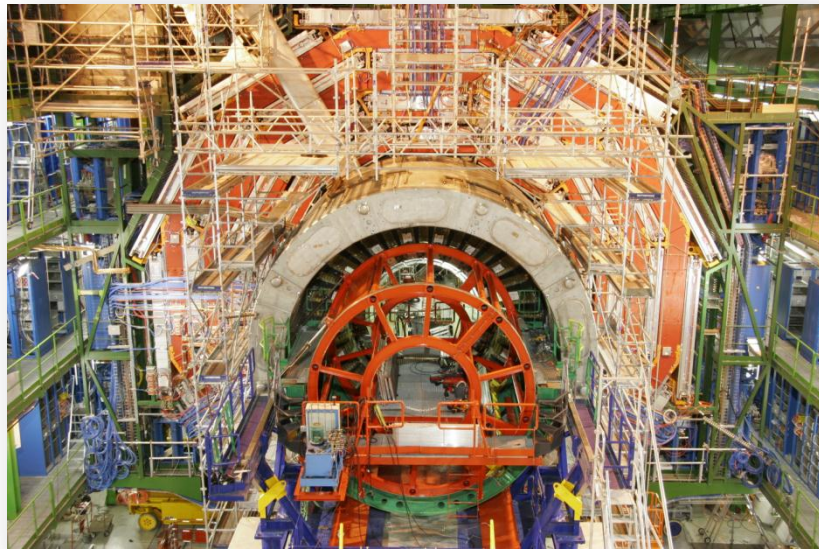
**Couronne interface**

*Endcap CMS*

# Outillage spécifique : enfourneur SM ECAL



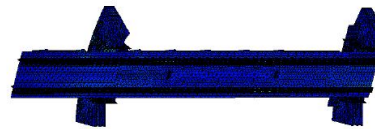
*Outillage enfourneur CEA-DAPNIA (10T)*



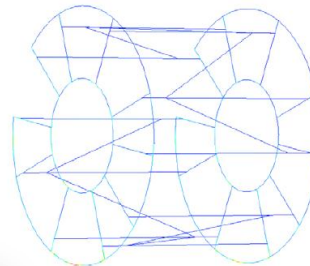
*Outillage dans son environnement*

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

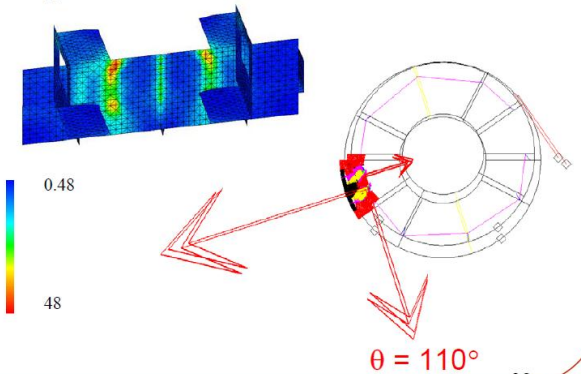
- in the support beam 92 MPa;



- 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



28



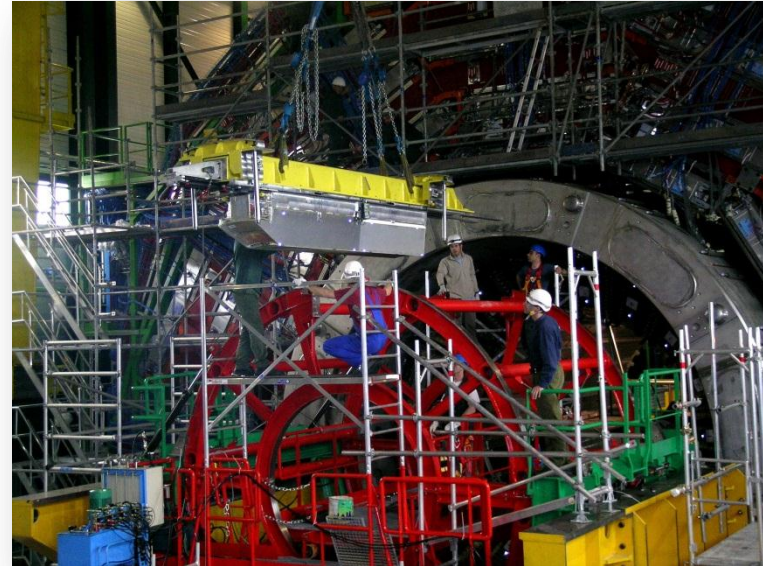
*Transport difficile ?*

# Installation du barrel

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



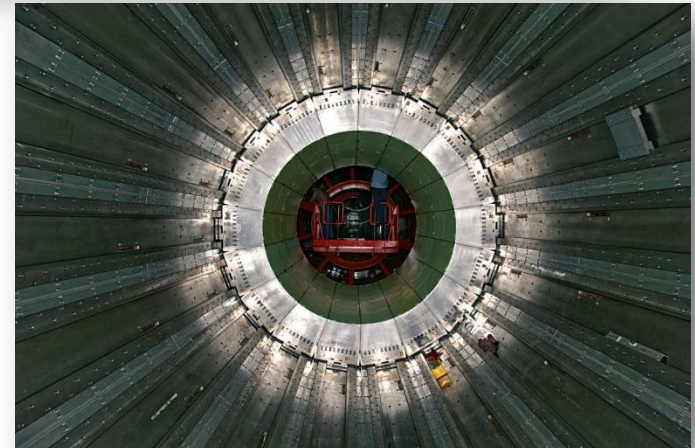
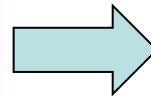
2- le support est fixé sur la **cage cylindrique** **rq:** travail important d'alignement en amont de l'outillage



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



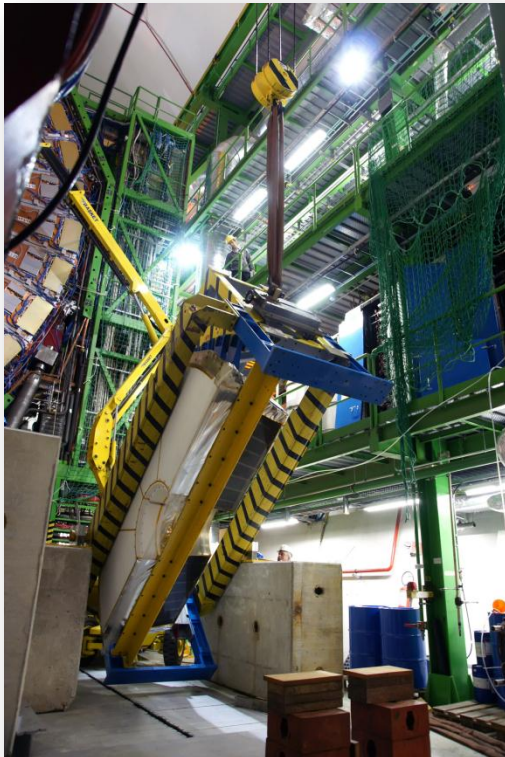
(04/2007)



*Demi-barrel assemblé*

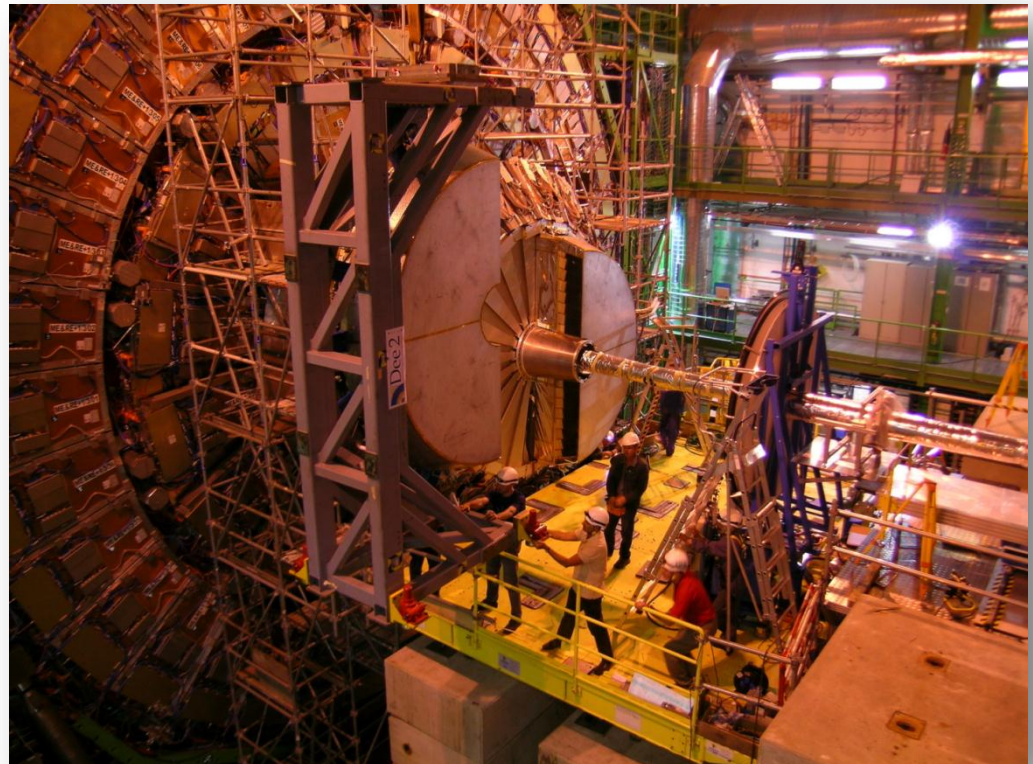
# Installation des Endcaps

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



*Manutention du Dee*

2- Installation du Dee sur son support

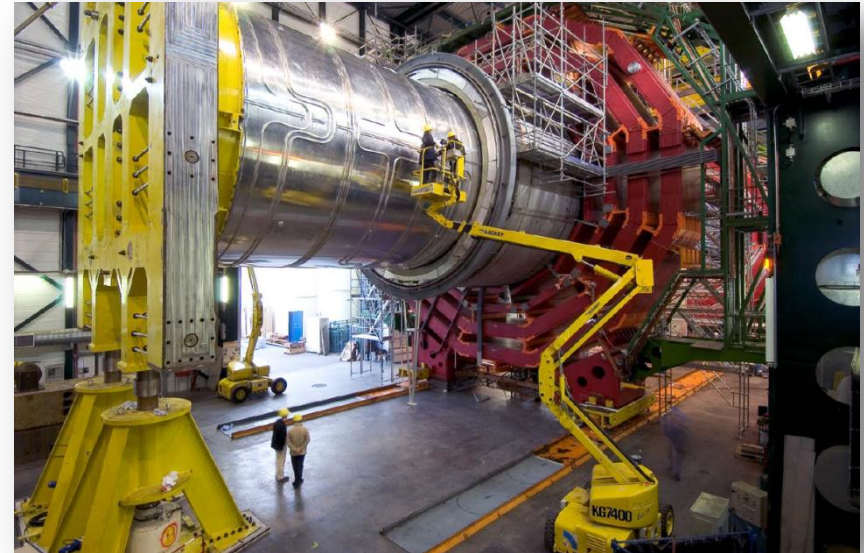


*Mise en place du détecteur*



# Autres exemples d'installation

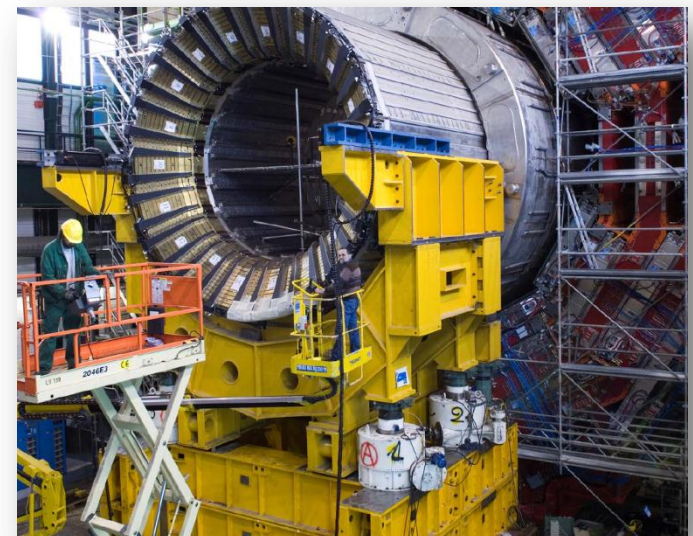
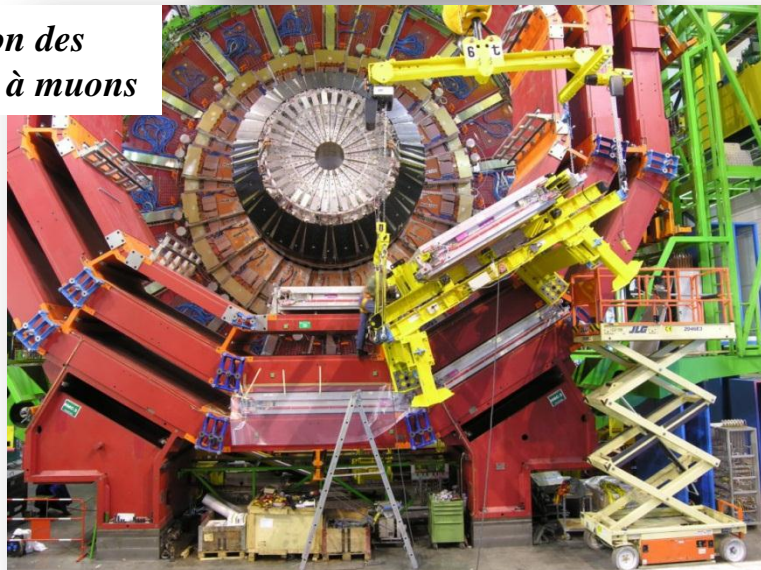
*Outil de support et de rotation de la bobine de CMS*



*Insertion de la bobine dans le cryostat*

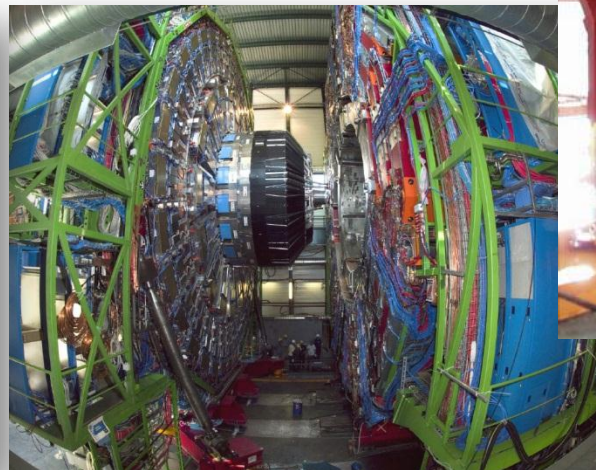
*Insertion du HCAL*

*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 charge (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*

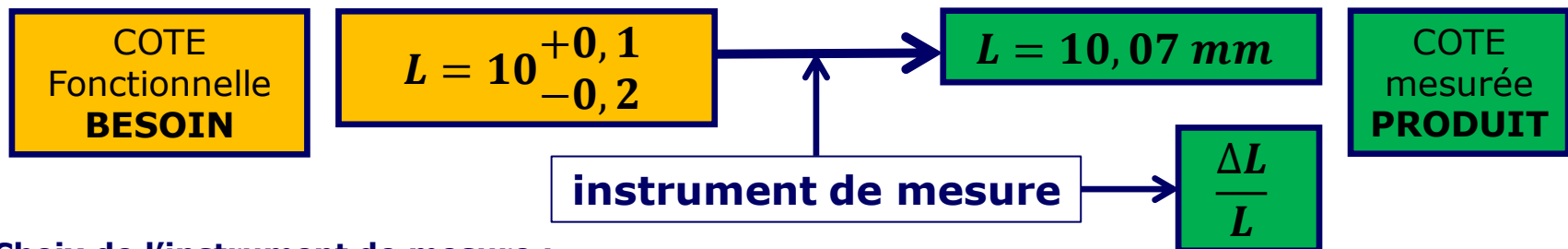
- **La métrologie est la science de la mesure.**  
Le terme désigne également l'ensemble des technologies de mesure.

**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 :

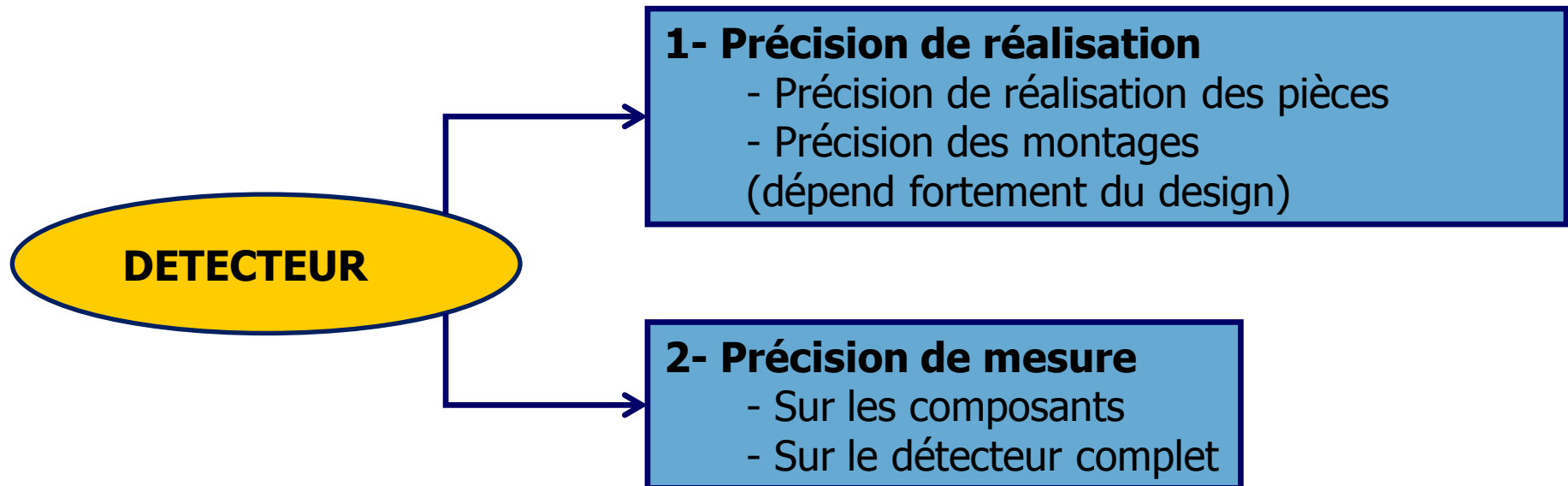


**Choix de l'instrument de mesure :**

- 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

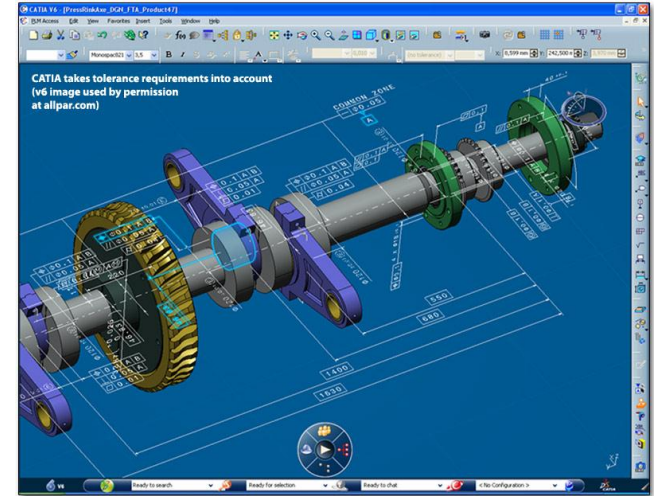


- Les 2 notions sont complémentaires mais différentes, elle nécessite des **spécifications techniques explicites**

# 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****

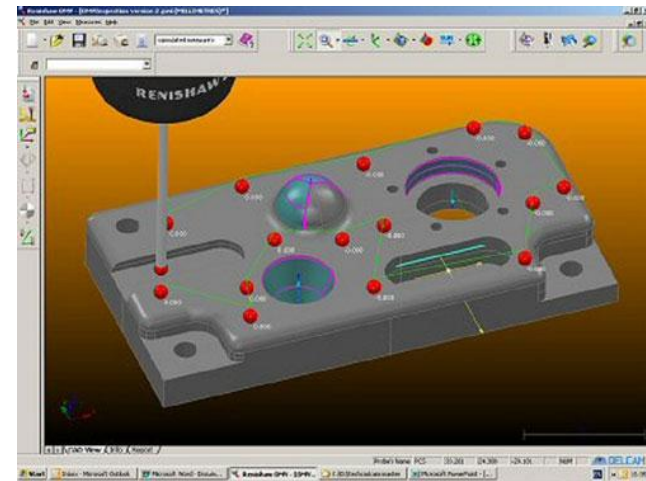
- Reconstruction d'un élément géométrique (ex plan) déterminé à partir de points mesurés sur une surface

- 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

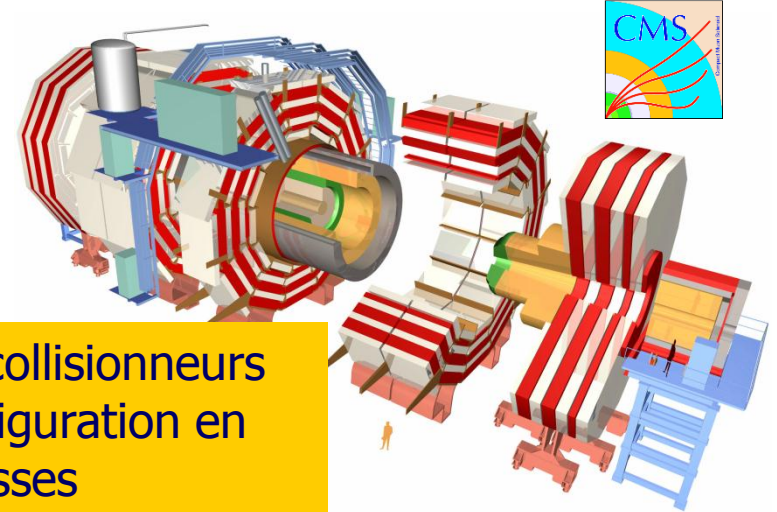
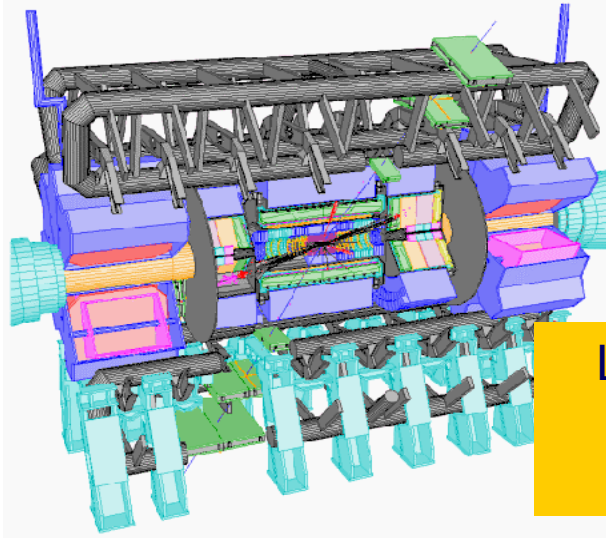


# La mesure de position

## 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)**

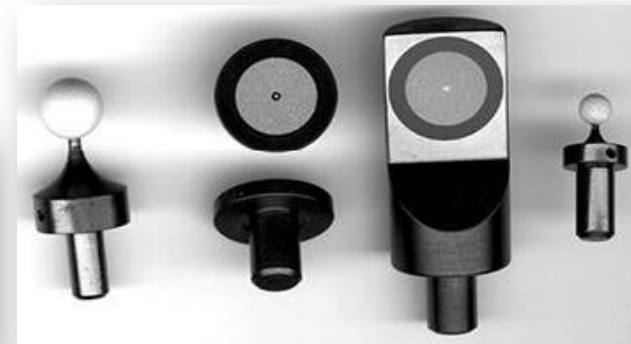
$\rho \sim 100 \mu\text{m}$



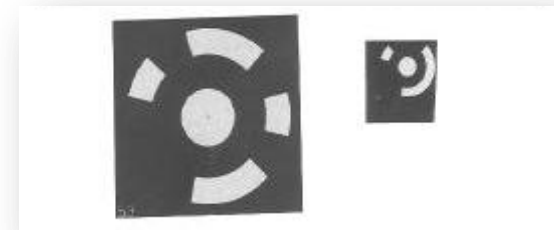
*Tachéomètre  
(angles + distances)*



*Caméra de photogrammétrie*



*Cibles*

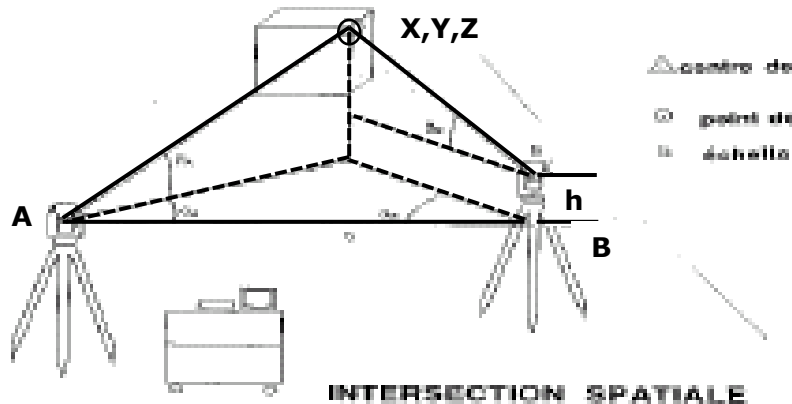


*Cible codée (N°)*



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,...



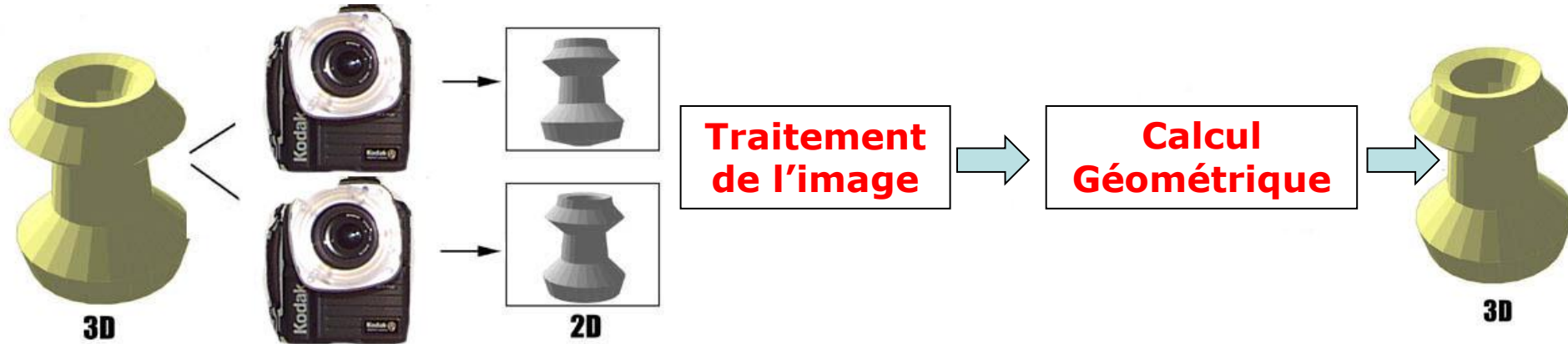
Mesure d'angles et de distances

- 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 3-D



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



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 :

