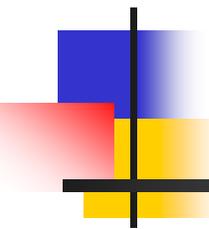


Du détecteur à la mesure



Mécanique des détecteurs

Roscoff

13 au 21 Juin 2007

Michel RAYMOND

1ère partie

1. Introduction et généralités
2. La conception mécanique
 - i. L'analyse du besoin (Analyse fonctionnelle)
 - ii. Conception et dimensionnement

2ème partie

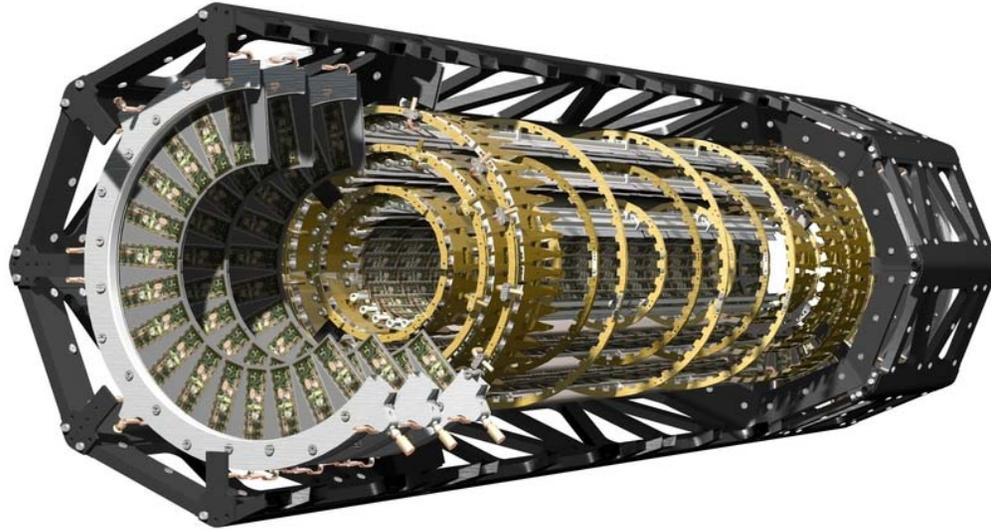
1. L'intégration des détecteurs
2. L'installation sur site
3. Les mesures dimensionnelles

Introduction

A l'image des détecteurs eux-mêmes, la mécanique des détecteurs se caractérise par une très grande diversité :

- Dimensionnelle :
 - masse de quelques kg à > 100 tonnes
 - quelques cm à plusieurs dizaines de mètres
- Technologique :
 - très large palette de matériaux
 - application à de nombreux domaines techniques tels que le vide, la cryogénie, la mécanique des structures
- De métiers :
 - Conception
 - fabrication/intégration
 - installation sur site
- Contexte et environnement :
 - Accélérateurs et collisionneurs
 - Espace
 - Environnement « naturel » (océan, glace, ...)

Introduction (2)



- Détecteur à pixels pour ATLAS
 - Détecteur de trace le plus proche du point d'impact ($R_i \sim 55$ mm)
 - 1.4 m de long, 0.5 m de diamètre
 - 15 kW à dissiper \Rightarrow **criticité du refroidissement**
 - Taux de radiation très important
 - **Matériaux composites, collage, brasage**

L'essentiel des fonctions mécaniques dans un détecteur de particules consiste à supporter et positionner les composants actifs.



- ✓ Stabilité
- ✓ Précision
- ✓ Pas (ou peu) de mécanique du mouvement



Etudes en **statique**

Les études dynamiques se limitent aux petits mouvements autour de la position d'équilibre \Rightarrow **vibrations**

La conception

Des lères idées ... au lancement des fabrications

Analyse du besoin

Analyse fonctionnelle, AMDEC, rédaction des spécifications
Groupe de travail, échanges importants

Conception des formes

CAO, choix des matériaux et technologies à mettre en oeuvre

Dimensionnement

Notes de calculs, éléments finis, codes

Tests et essais

Caractérisation, réception, ...

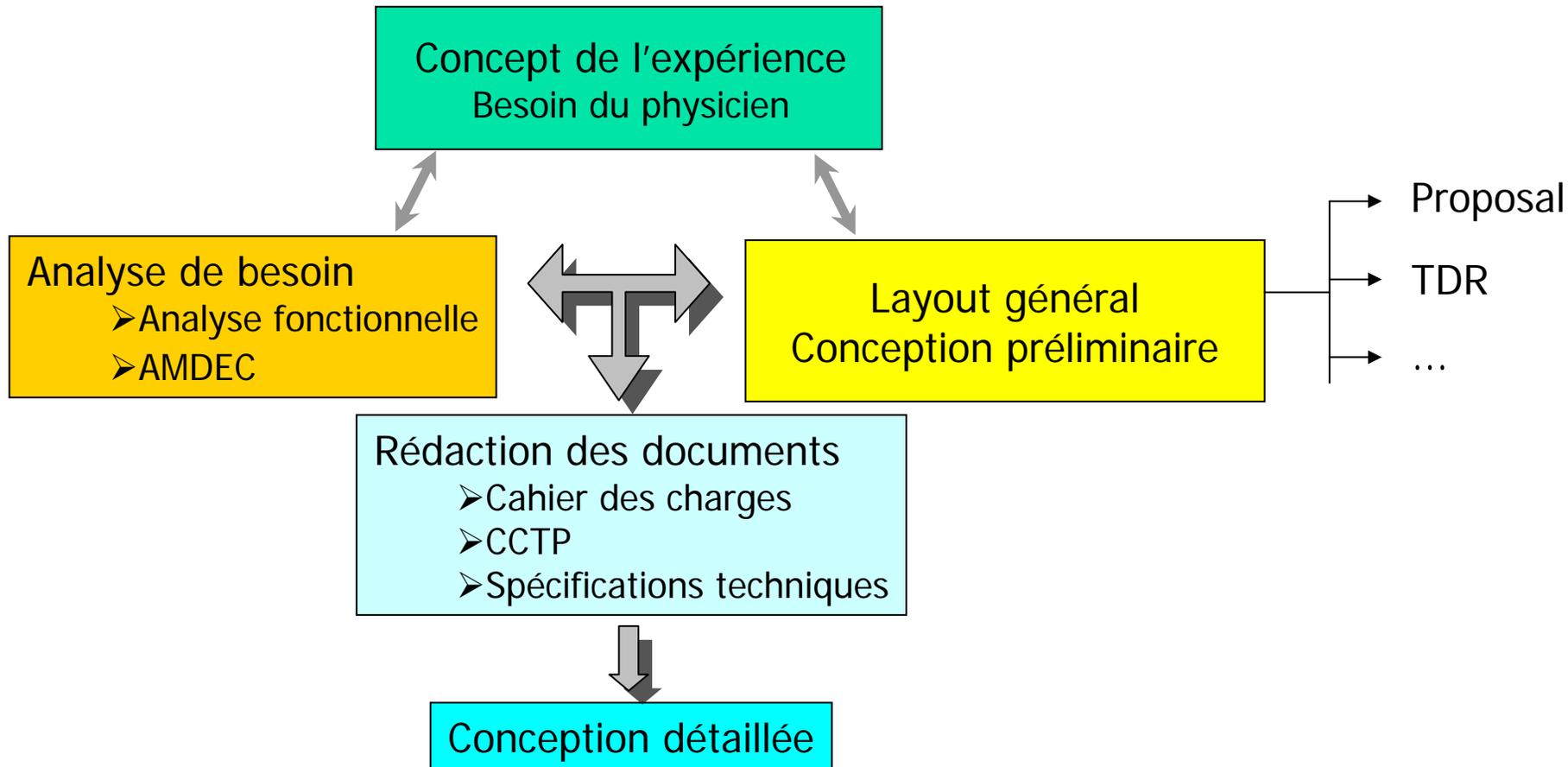
Dossier de fabrication

Réalisation des plans de fabrication
Cahier des charges pour la sous-traitance (marchés, ...)

Définition du besoin

Etape essentielle de la conception

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



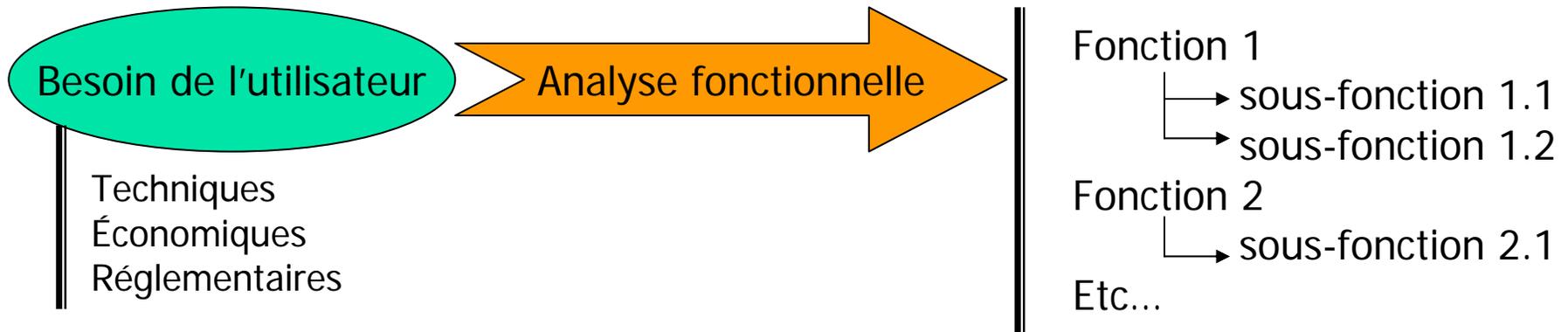
Analyse fonctionnelle

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

Une **fonction** est l'action d'un élément constitutif d'un système exprimée **exclusivement** en terme de **finalité**, *sans aucun a priori de solutions*.



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.



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

Analyse fonctionnelle : mise en oeuvre

Diverses méthodes de mise en oeuvre de l'analyse fonctionnelle,
 → qui tendent au même résultat

1ère étape : **Analyse fonctionnelle du besoin**

1.1 - Déterminer le profil de vie

1.2 - Recenser les fonctions principales

1.3 - Recenser les fonctions contraintes

→ Définition de l'architecture globale du produit et de ses principaux composants.

Profil de vie

Recense toutes les situations de la vie du produit



La phase d'utilisation est toujours celle qui focalise le plus d'intérêt

Mais les contraintes les plus sévères sont souvent rencontrées lors

- du stockage : température, humidité, empoussièrément
- du transport : température, vibration, chocs, pression
- de l'installation : manutention, chocs, positionnement

Pour chaque situation, les contraintes d'environnement et les contraintes fonctionnelles sont énumérées de façon exhaustives. Elles doivent également être caractérisées \Rightarrow grandeurs chiffrées

Fonctions principales

Fonctions pour lesquelles l'objet est créé

Correspond à une relation entre 2 (ou plus) éléments extérieurs avec le produit

Il faut nommer les fonctions et lister les principales caractéristiques

FP1 : Faire une trace sur un support

Phase : utilisation

Utilisateur

Support



Caractéristiques = nature du support

nature de la trace (encre ?, temps de fixation ?, couleur ?)

largeur de la trace, etc

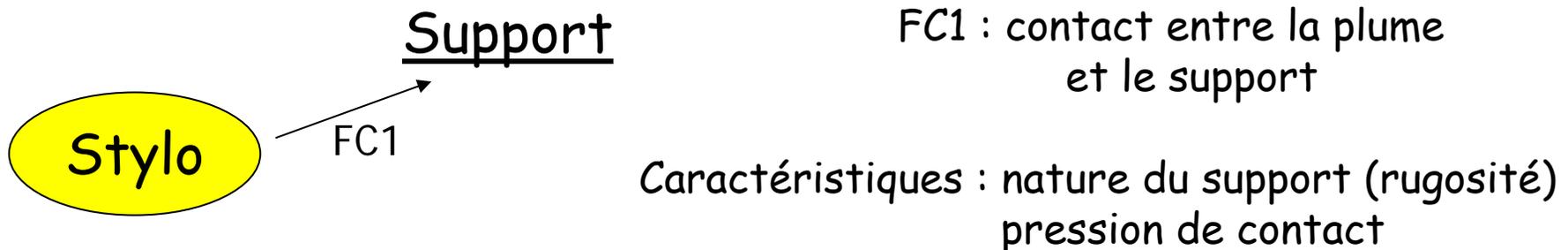
Fonctions contraintes

Fonction imposée au produit par son environnement

Correspond à une relation entre le produit et un élément du milieu extérieur

Il peut s'agir de :

- contrainte imposée par l'action d'un élément du milieu extérieur,
- contrainte d'interface avec un produit existant,
- exigence particulière (de l'utilisateur).



Analyse fonctionnelle : mise en oeuvre

Diverses méthodes de mise en oeuvre de l'analyse fonctionnelle,
 → qui tendent au même résultat

1ère étape : **Analyse fonctionnelle du besoin**

1.1 - Déterminer le profil de vie

1.2 - Recenser les fonctions principales

1.3 - Recenser les fonctions contraintes

→ **Définition de l'architecture globale du produit et de ses principaux composants.**

2ème étape : **Analyse fonctionnelle du produit**

Les fonctions précédentes vont donner lieu à des **fonctions techniques** reliant les divers composants pressentis.

2.1 - Chiffrer les contraintes

2.2- Critère de flexibilité sur une contrainte : **négociable ou non**

Application à un cas réel

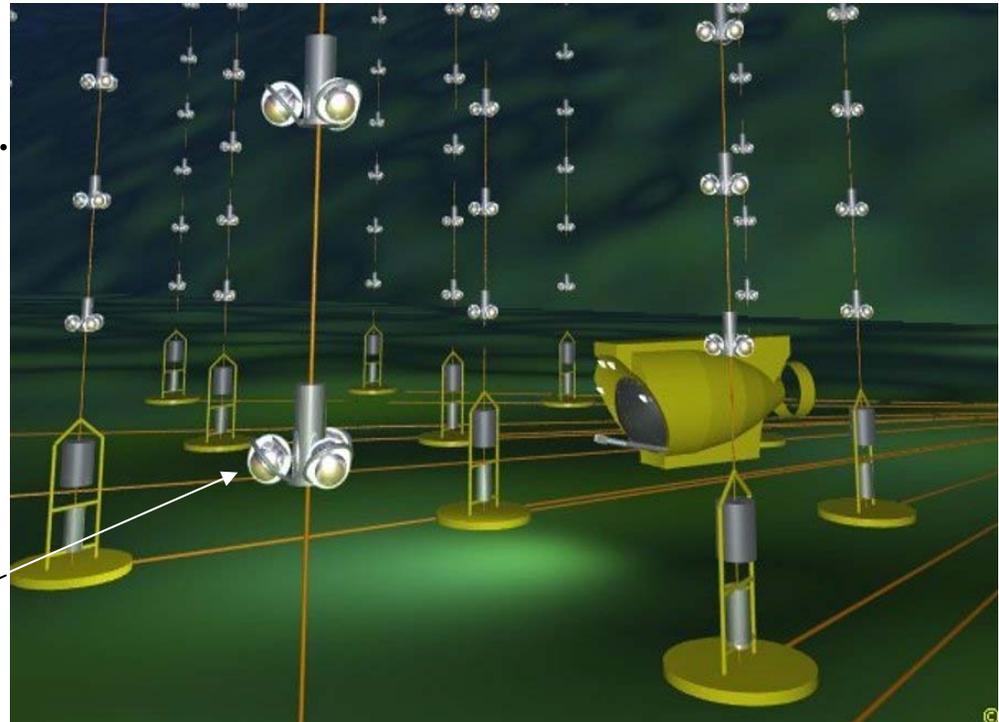
Expérience : Antarès, télescope pour la détection de neutrinos de hautes énergies

Architecture :

Réseau de lignes de mouillage équipées de photomultiplicateurs.
Détection des particules par effet Cherenkov

Produit :

Support de modules optiques



Particularité : milieu marin, 2500 m de fond

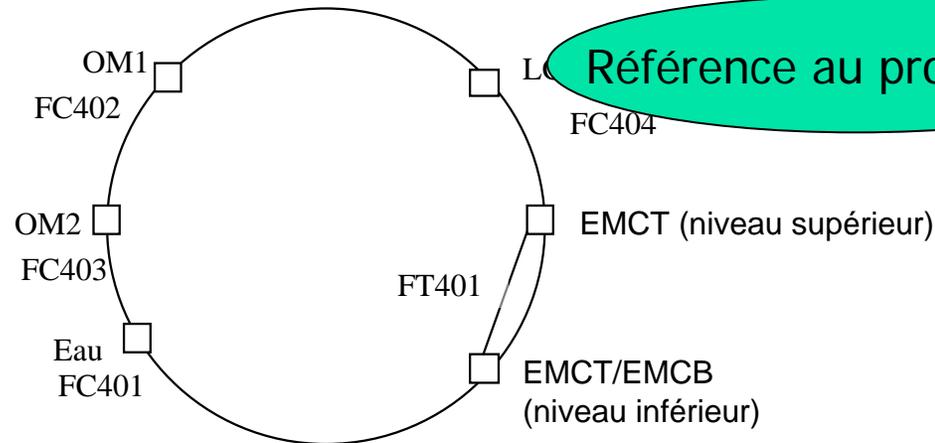
Application : définition des fonctions

Optical Module Frame

Phases utilisation
 déploiement
 récupération

Fonctions techniques

FT401 : L'OMF doit permettre la transmission des efforts entre les extrémités des câbles EMCT (niveau supérieur) et EMCB ou EMCT (niveau inférieur).



Référence au profil de vie

Fonctions de contact

FC401 : L'OMF doit résister à la pression et à la corrosion.

FC402 : L'OMF doit assurer le maintien et le positionnement fonctionnel du OM1.

FC403 : L'OMF doit assurer le maintien et le positionnement fonctionnel du OM2.

FC404 : L'OMF doit maintenir le conteneur LCM (ou ACM).

Caractérisation des fonctions

Optical Module Frame

FC 402 : L'OMF doit assurer le maintien et le positionnement fonctionnel du module optique OM1

FC 403 : L'OMF doit assurer le maintien et le positionnement fonctionnel du module optique OM2

	Niveaux	Commentaires
<p>Maintien du module optique Géométrie du module optique : sphère de diamètre 17 pouces, en 2 hémisphères Matériau du module optique : verre Caractéristiques mécaniques du MO : Déformation en service (sous 256 bars) ? Pression maxi de serrage ? Efforts statiques dus au module optique : Masse Flottabilité Variation de l'effort de maintien sur 3 ans < 2% Contrainte de champ angulaire pour la réception des photons : angle libre Respect de l'uniformité de réponse : aimantisme des matériaux Evolution possible du nombre et de l'orientation des modules optiques</p>	<p>A définir A définir 23 kg 18 daN 20 + π</p>	
<p>Positionnement fonctionnel Respect de l'orientation spécifiée Permanence du positionnement initial sur 3 ans Minimisation des sollicitations hydrodynamiques : diminution de la traînée, Diminution des risques de vibrations, Continuité de la déformation de la ligne Reprise d'effort des câbles OMC Effort de traînée s'exerçant sur un module optique : à 0,2 m/s, à 1,5 m/s,</p>	<p>F=1,5 N F=82,5 N</p>	

Le résultat...



Le produit final reflète la prise en compte des fonctions développées dans l'analyse

- Maintien des modules optiques
- Maintien du conteneur de l'électronique
- Maintien de l'hydrophone de positionnement
- Maintien de la sphère de calibration
- Intégrité de la ligne
- Gestion des câbles
- Traînée minimisée
- ...

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'AF étant d'éviter les oublis, l'exhaustivité est indispensable s'agissant des bases de l'AF-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'AF-produit, que l'on étudie rarement dans ses moindres détails.

La conception

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

1- 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

2- 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

La conception (2)

La conception s'appuie sur la définition du besoin et doit répondre à l'ensemble du besoin (cf. les commentaires sur le profil de vie)

Le rôle de l'ingénieur (pas seulement en mécanique) est d'apporter la plus grande valeur ajoutée possible à son produit :

- Par des **propositions** qui ne correspondent pas toujours à l'image la plus spontanée ou la plus naturelle
- Par un **apport de technicité** : la conception ce n'est pas du « dessin », encore moins un simple exercice de géométrie, au-delà de la forme il y a :
 - ✓ le dimensionnement
 - ✓ la prise en compte des sollicitations « parasites »
 - ✓ le choix des matériaux, etc...
- Par l'intégration, le plus tôt possible, de la faisabilité des pièces
- Par l'application, et donc la connaissance, **des normes et réglementations** en vigueur,
 - ⇒ peu applicable aux détecteurs eux-mêmes
 - ⇒ essentiel dans la conception des outillages

La conception (3)

La conception doit intégrer très tôt la faisabilité des pièces

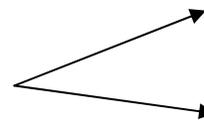


Nécessité d'un **dialogue fort** entre concepteur (BE) et fabricant (atelier)
(pas de bureau des méthodes dans nos structures)

Prise en compte du procédé de fabrication au regard du nombre de pièces, du coût, des performances attendues

Exemples :

Disponibilité des bruts



De nombreuses nuances d'alliages ne sont pas disponibles sous toutes les formes

Profilés introuvables bien que normalisés

Obtention des tolérances vis-à-vis du procédé de fabrication

Usinage : 0,1 à 0,01 mm/m

Soudage : 1 mm/m est déjà très exigeant

Le dimensionnement (1)

Calcul par éléments finis \Rightarrow Samcef field, Samcef
(logiciel officiel pour l'IN2P3)

Amélioration « récente » des pré et post traitements

- \Rightarrow Mise en œuvre plus immédiate
- \Rightarrow Très intéressant et performant pour la validation des pièces simples
- \Rightarrow Moins intéressant et parfois « dangereux » pour les assemblages ou les domaines autres que la statique linéaire

La bonne connaissance du logiciel n'est pas
suffisante pour aboutir au résultat !



Sujet largement traité dans les écoles thématiques sur le calcul de structure

Exemple : calcul thermo-mécanique en régime transitoire

Calorimètre électromagnétique « End cap » d'ATLAS

Problématique : Prédiction des contraintes durant le refroidissement

Données (issues du dimensionnement initial - 1996)

- 1- Efforts et déplacements à température ambiante (poids propre)
- 2- idem à 90 K : prise en compte des contraintes thermo-mécaniques

Assemblage complexe et hétérogène :

Absorbeurs plomb + inox (760 + 256)

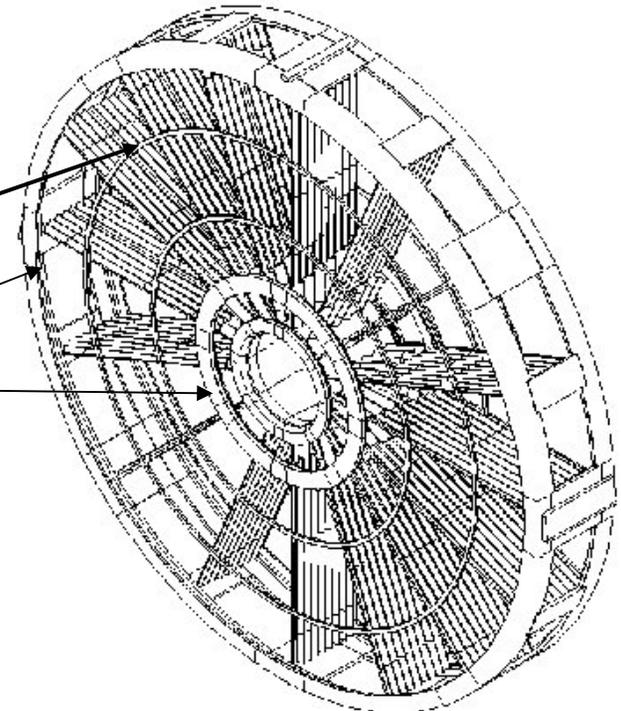
Couronnes structurelles en Aluminium (5)

Couronne en composite verre/époxy (1)

Diamètre : 4 m

Masse : 26 T

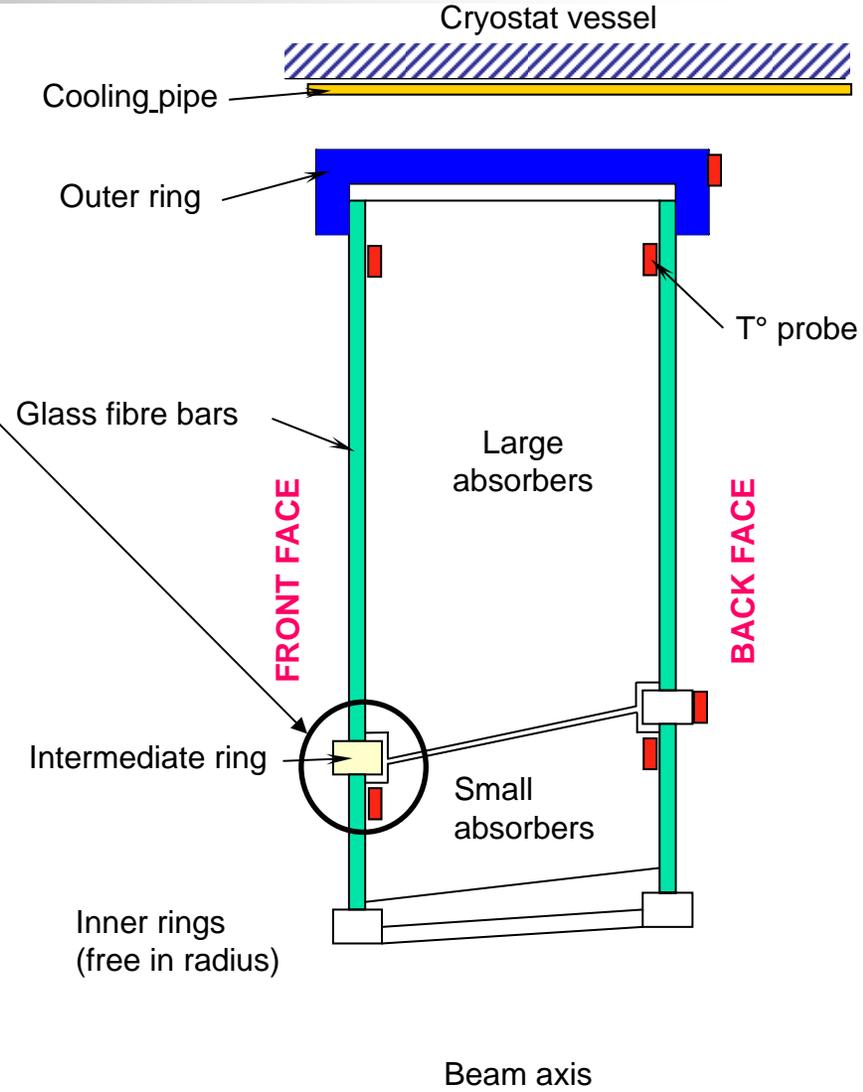
Masse de la structure < 500 kg



Exemple : calcul thermo-mécanique en régime transitoire

Position du problème

- Composant critique = couronne intermédiaire (verre/époxy)
- La couronne est soumise à 3 effets :
 - ✓ Le poids propre
 - ✓ La contraction thermique à la température de l'Argon Liquide
 - ✓ Le gradient de température durant le refroidissement
- L'estimation du niveau de contrainte permet de déduire le gradient thermique acceptable

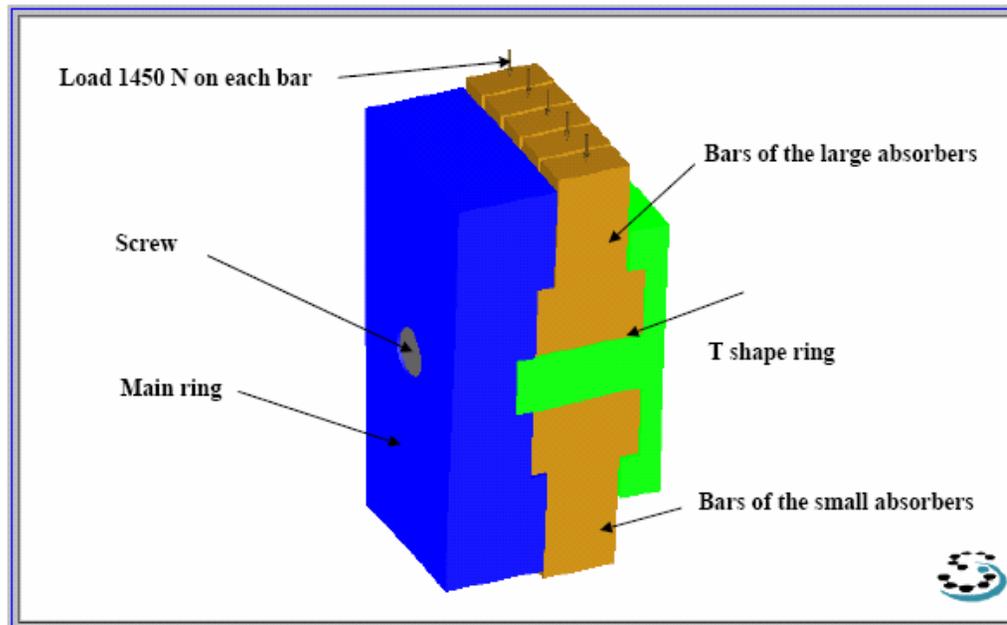


Exemple : calcul thermo-mécanique en régime transitoire

Le modèle global permet d'obtenir les déformations du calorimètre et les efforts radiaux s'exerçant sur les absorbeurs

- ✓ 250 N par barre à 293 K
- ✓ 1450 N par barre à 90 K

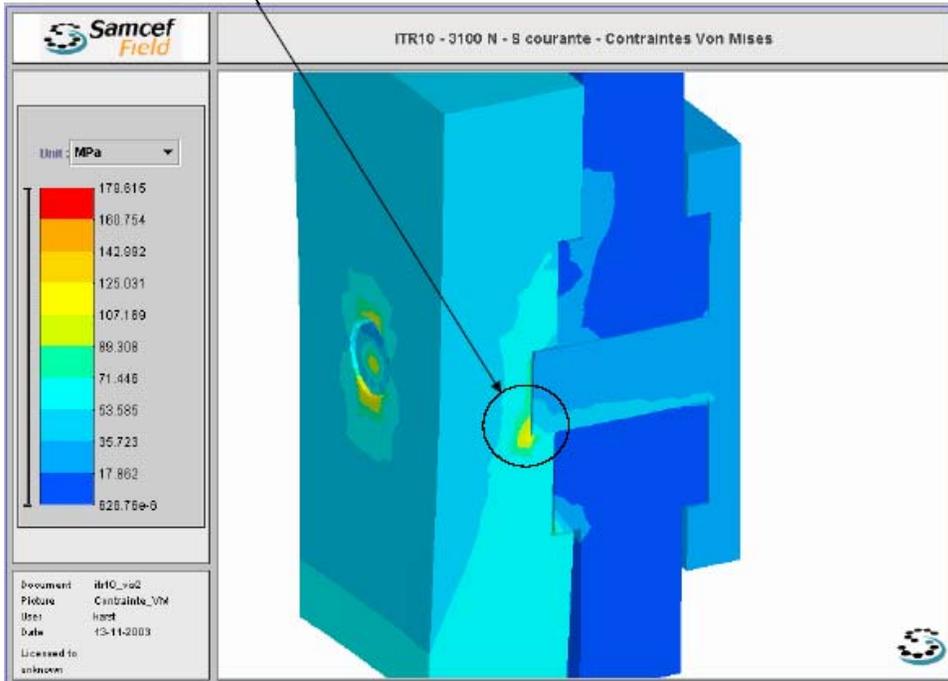
Ces données sont injectées dans un modèle local plus détaillé pour déterminer le niveau de contrainte atteint **dans la zone critique**



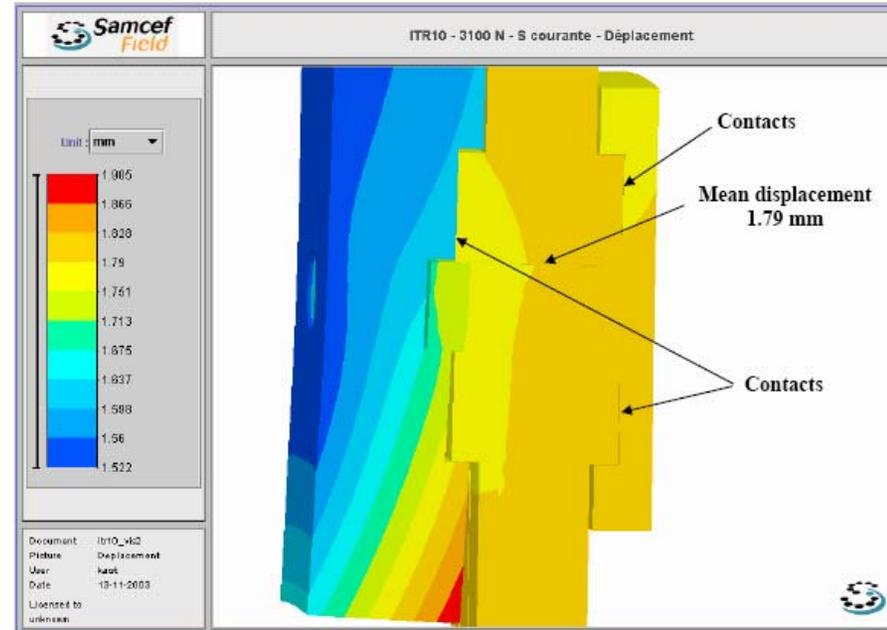
Exemple : calcul thermo-mécanique en régime transitoire

Un effort de 1450 N est appliqué sur chaque barre correspondant à la contraction dans l'argon liquide

Zone de concentration de contrainte : **A vérifier**



Du détecteur à la mesure

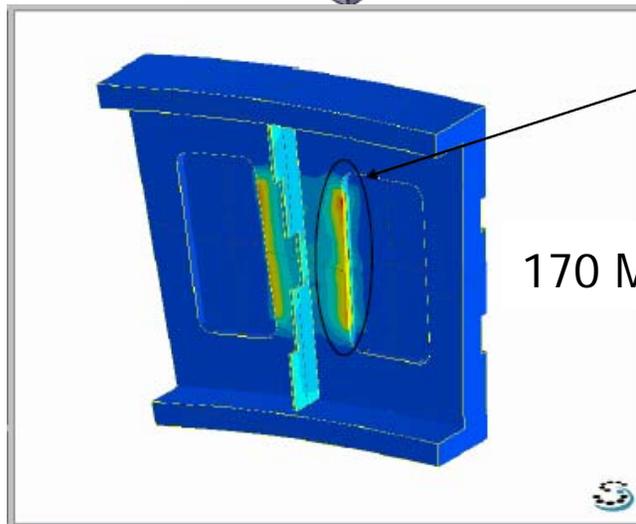
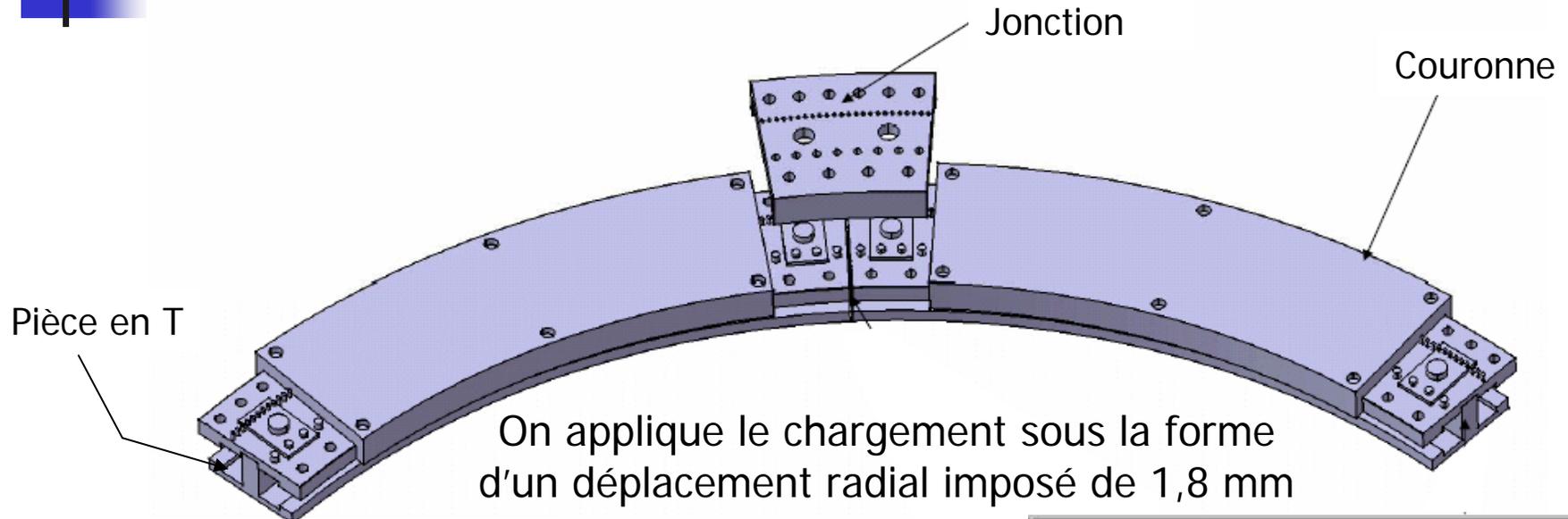


→ Déplacement = 1.8 mm
Contrainte < 100 MPa

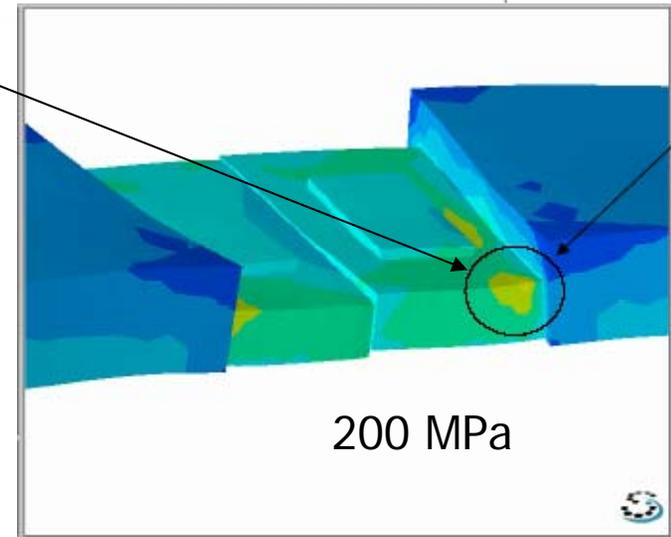


Utilisation des résultats pour
étude de la 2ème zone critique

Exemple : calcul thermo-mécanique en régime transitoire



Du détecteur à la mesure



M. Raymond - Juin 2007

Exemple : calcul thermo-mécanique en régime transitoire

- Couronne en matériau anisotrope → Bonne tenue en compression 300 MPa
 Tenue au cisaillement ?
- Tests spécifiques effectués au labo
 Limite=230 MPa

Détermination du gradient acceptable

La contrainte doit rester à tout instant $< 0,8 \times 230 = 184 \text{ MPa}$
 Calcul de l'effort correspondant = 1600 N par barreau
 = -2 mm au rayon

A température ambiante : effort acceptable = $1600 - 250 = 1350 \text{ N}$
 soit $\Delta R = 1,7 \text{ mm} \Rightarrow \Delta T = 37 \text{ K}$

Dans l'Argon liquide : effort acceptable = $1600 - 1450 = 150 \text{ N}$
 soit $\Delta R = 0,2 \text{ mm} \Rightarrow \Delta T = 9 \text{ K}$



Modèle thermique du cryostat pour valider le refroidissement

Exemple : calcul thermo-mécanique en régime transitoire

Modèle 2D (axisymétrique) du cryostat complet

Estimation des données thermiques (C_p , λ) pour chaque détecteur

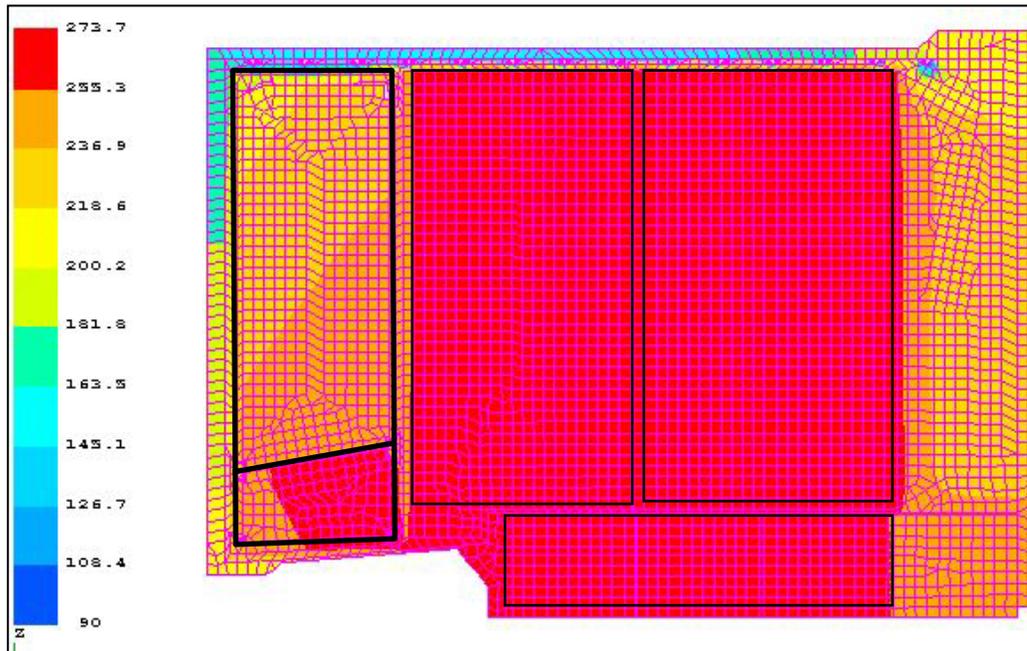
Estimation des puissances cryogéniques

Estimation des coefficients d'échanges



Evolution des températures en fonction du temps

Calcul des gradients dans les zones critiques



Du détecteur à la mesure

L'étude a **invalidé** le système de refroidissement initialement prévu. L'azote diphasique est remplacé par de l'azote gazeux



Puissance cryogénique moindre.
 Pilotage du gradient par la différence de température entrée/sortie.

Le dimensionnement (2)

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 : structures mécaniques, assemblages précontraints

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,...

Le dimensionnement (3)

Principal inconvénient :

Certains codes peuvent être limités dans leur champ d'application

Exemple des matériaux : l'acier toujours, l'aluminium parfois, le titane ou les matériaux composites ... exceptionnellement

→ **Bien vérifier les cadres d'application et les hypothèses de base**

Les calculs sont coûteux, ils doivent donc apporter des résultats et **des conclusions**.

Une **note de calcul détaillée** est indispensable à tout dimensionnement.

Elle doit permettre au lecteur d'apprécier la validité du calcul.

Les essais

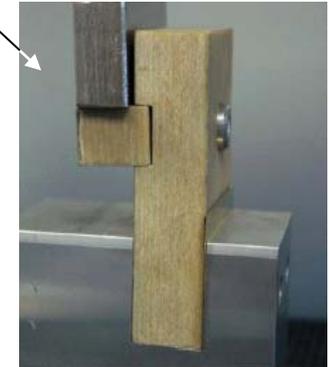
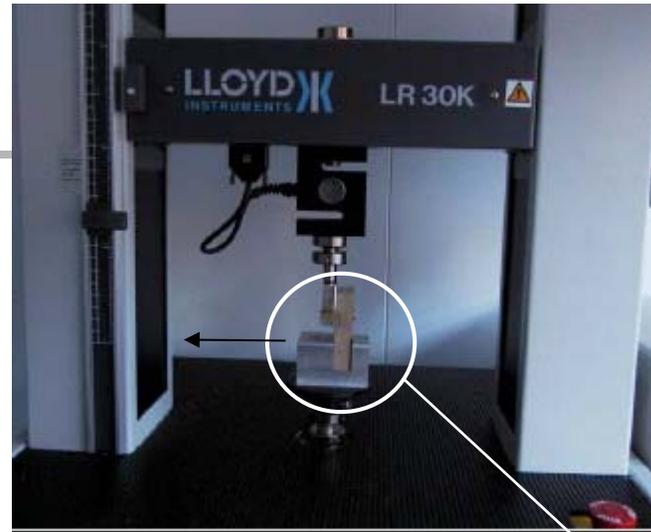
Détermination ou confirmation de caractéristiques mécaniques ou thermiques (Re, frottement, conductivité,...)



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

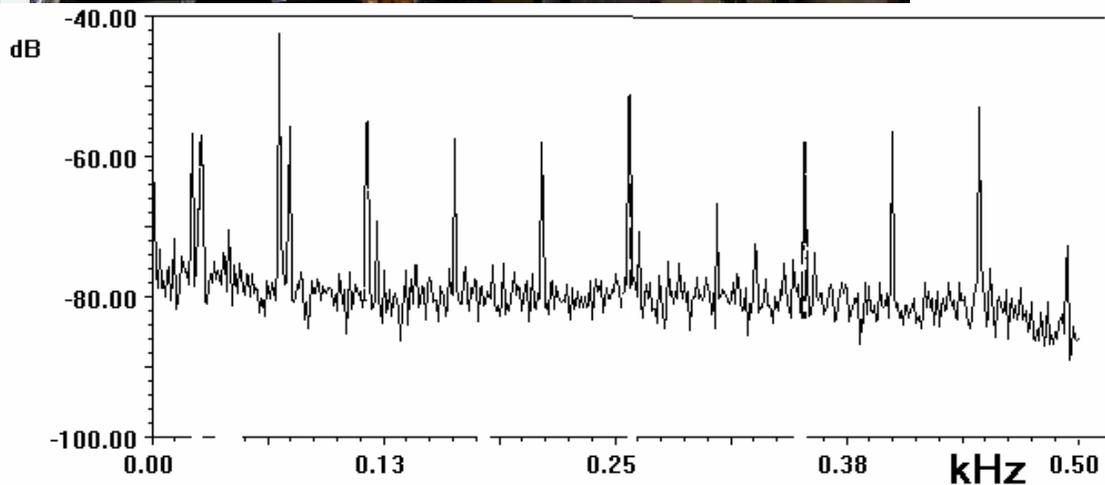
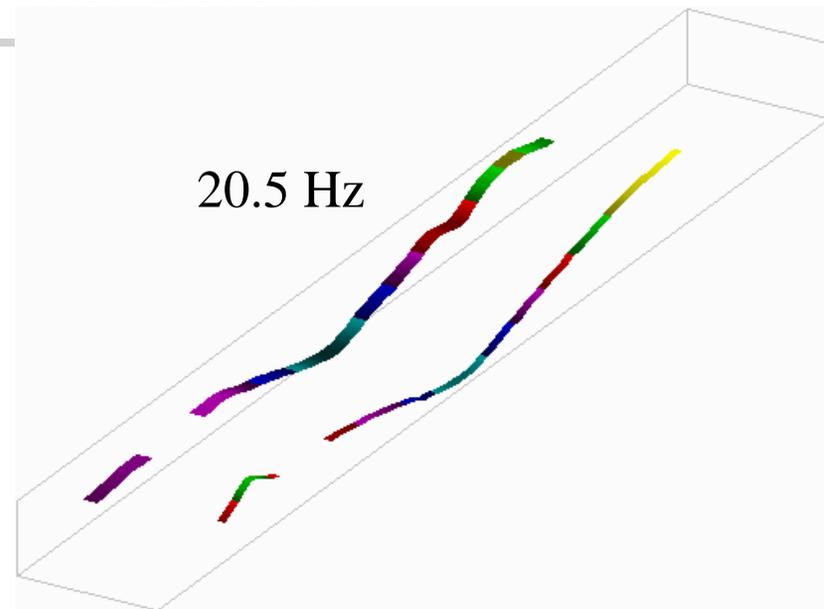


Caractérisation
Validation du comportement d'un modèle de test sous certaines sollicitations



Test de compression sous une force de 1000 daN

Exemple d'un test en vibration



Frequencies

20.5 Hz

26.4 Hz

39.6 Hz

67.9 Hz

Rôle de la matière

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

1. elle en est le centre d'intérêt.
2. les interactions particules/matière sont à la base de la détection.

→ Dans un détecteur il y a de la matière « active », utile à la détection et de la matière « passive », qui nuit à la détection.

Objectifs : Réduire la matière passive

⇒ contrainte de minimum de matière

Maintenir et positionner au mieux la matière active
(plaquettes de silicium, photomultiplicateurs, scintillateurs...)

Rôle de la matière (2)

On peut classer les matériaux en fonction de leur **longueur de radiation** X_0

$$E = E_0 \exp(-x/X_0)$$

E_0 : énergie initiale

X : épaisseur de matériau traversée

X_0 : longueur de radiation

C'est une donnée qui est propre à la physique \Rightarrow les sources sont à rechercher dans notre domaine, les fournisseurs n'en font pas état.

Les valeurs de X_0 sont déterminées pour les **éléments**

Il existe des formules permettant d'approcher la longueur de radiation d'un matériau à partir de sa composition chimique.

Longueur de radiation

C = 18.8 cm

Al = 8.89 cm

Fe = 1.76 cm

Cu = 1.43 cm

Pb = 0.56 cm

Intégration et installation

- 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, 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

Généralités sur 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, décalage fréquent 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

Généralités sur l'intégration

- Conception = phase d'étude \Rightarrow production de **dossiers** puis lancement des fabrications
- Intégration = phase de **terrain** \Rightarrow **objet concret** (détecteur)

Mais l'intégration nécessite également la production de documentation



Assurance qualité

Outillages

Montage d'un détecteur \Rightarrow 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 \Rightarrow **les mêmes règles sont applicables** (voir 1ère partie du cours)

Quelques différences :

Environnement moins complexe

Contraintes budgétaires et temporelles plus sévères \Rightarrow cahier des charges généralement moins ambitieux.

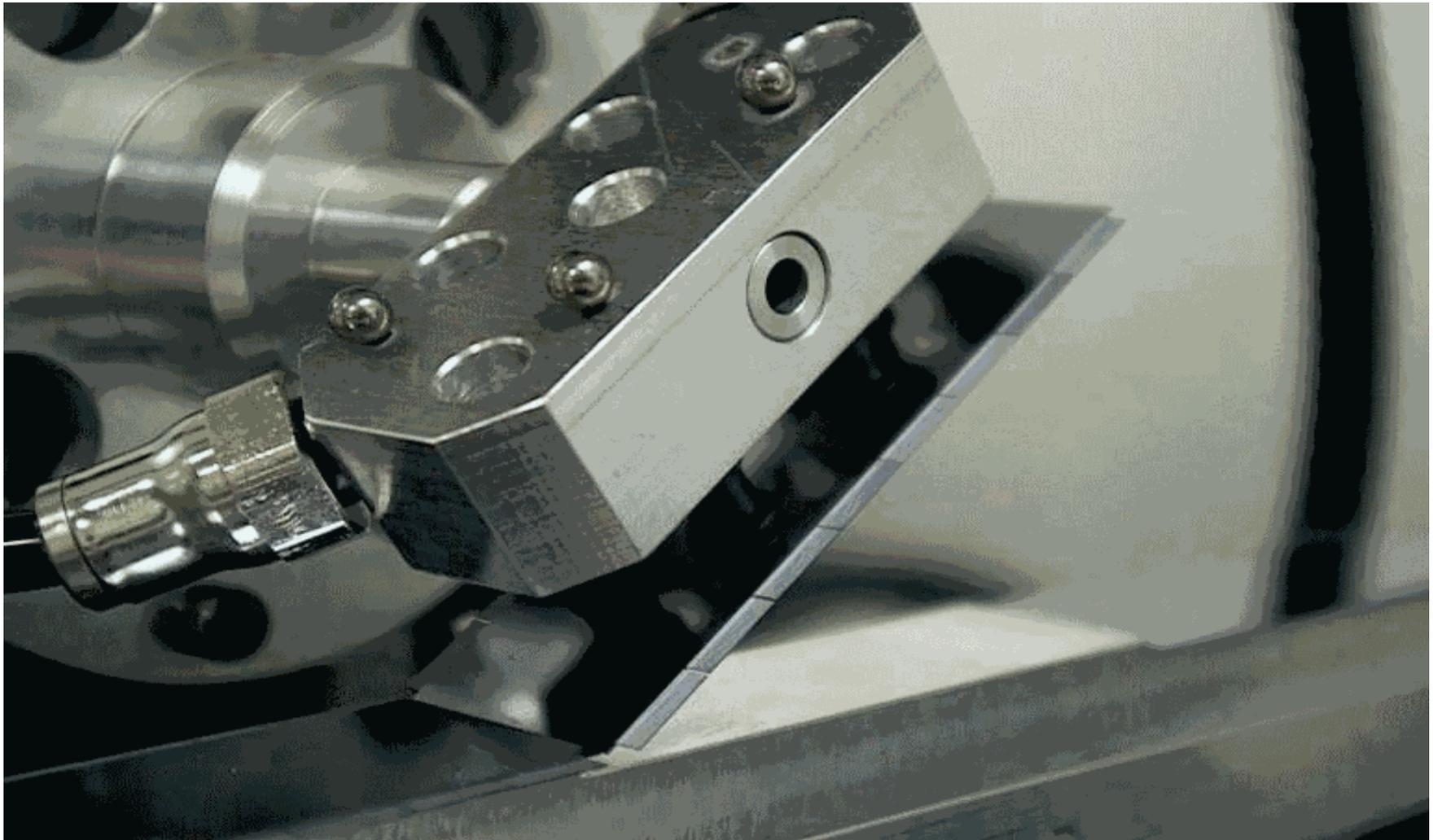
Robot d'assemblage Pixels

- Objectifs
 - Collage des modules sur les échelles à $\pm 50\mu\text{m}$
 - Optimisation du dépôt de colle
 - Réduire les interventions humaines et éviter de casser des modules



- 6 degrés de liberté (5 motorisés)
 - Calcul en temps réel de la position des modules et correction
 - Implantation sur une MMT pour mesurer en cours d'assemblage
 - Montage en salle propre
 - Procédé d'encollage pour éviter l'insertion de colle entre les chips (recherche d'un dépôt « rectangulaire » peu naturel)
 - La précision de positionnement : $50\mu\text{m}$ sur 800mm soit $\sim 6.10^{-3}\%$ de la pleine échelle

Robot d'assemblage Pixels (2)



- **Intégration en 3 phases**
 1. Construction de modules couvrant un secteur de 45° , en laboratoire
 2. Assemblage d'une roue de 8 modules
 3. Mise en position dans le cryostat

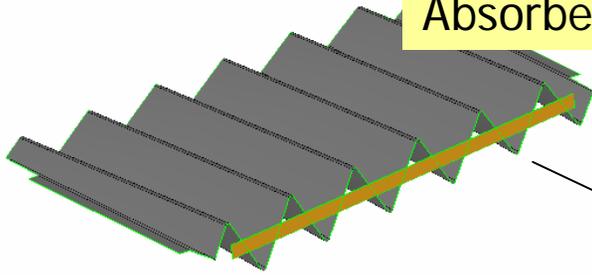
Toutes ces phases sont menées **en salles propres**

→ pour éviter la contamination de l'Argon

→ pour éviter les risques de court-circuit

Construction d'un module

Absorbeur : feuille Inox/plomb/inox



Electrode



Espaceur en nid d'abeille



Élément de couronne

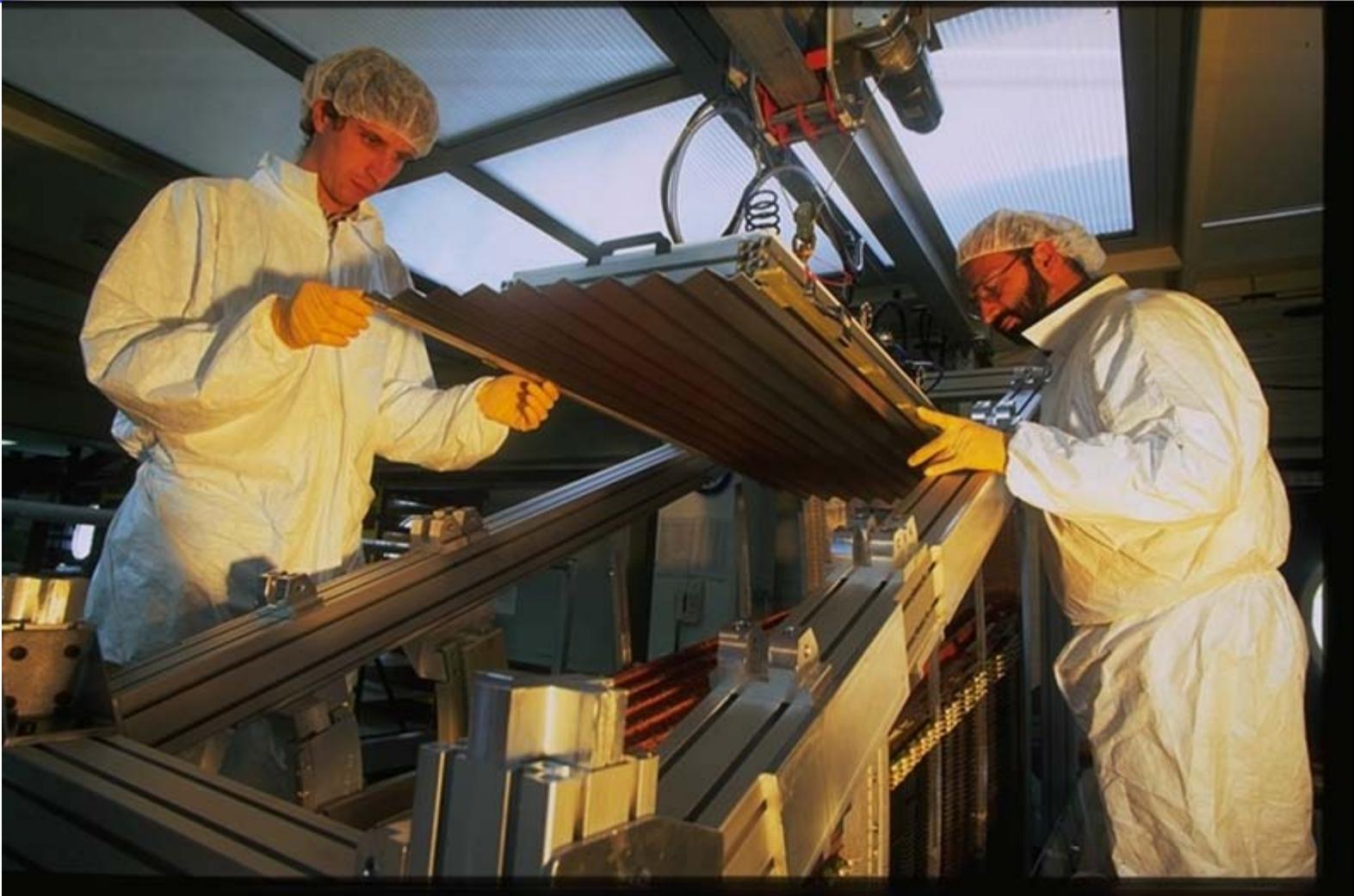


Banc de montage des modules
(Photo C. Moirenc)

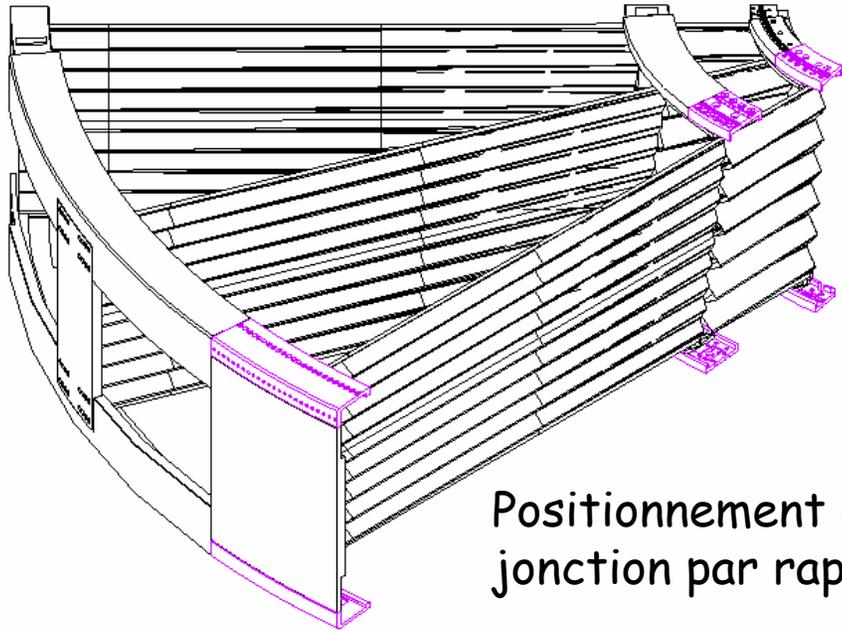
Construction d'un module



Construction d'un module



Assemblage du calorimètre



La roue est formée de 8 modules

La structure d'un module est principalement constituée de 6 couronnes.

6 pièces de jonction
lient 2 modules consécutifs

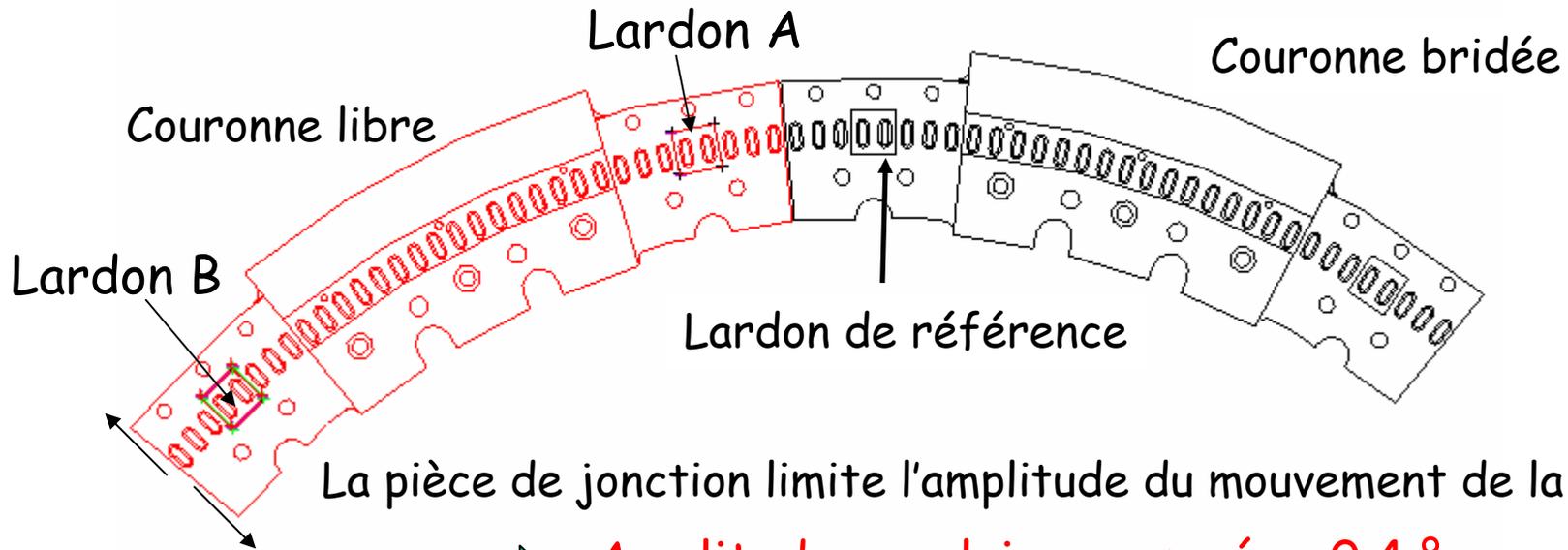
Positionnement des pièces de
jonction par rapport aux couronnes

+/- 0.04 mm in θ
+/- 0.125 mm in R

- La précision des pièces de jonction assure le bon positionnement du module / module précédent
- Cette précision est toutefois insuffisante pour garantir d'une dérive dans le positionnement des modules (fermeture de la roue)

Précision de positionnement

La mesure est effectuée sur une couronne interne grâce à une machine à mesurer tridimensionnelle



La pièce de jonction limite l'amplitude du mouvement de la couronne

→ Amplitude angulaire mesurée : 0.4 °

Du fait du bras de levier, l'erreur de position du lardon A est de 0.3 mm, celle de B peut atteindre 2 mm

→ Des références absolues sont impératives sur l'outillage d'assemblage

Outillage spécifique

- Table d'assemblage (collaboration CPPM/LPNHE/BINP)
- Etude + fabrication ~ 2 ans



Plaques de glissement

Vérin de manoeuvre

Fonctions principales

- ✓ Assemblage horizontal du calorimètre
Précision ~ 0.1 mm
- ✓ Levage du calorimètre
déformation < 2 mm
- ✓ Support en position verticale

Caractéristiques principales

- ✓ 4,5 x 4,5 m – 13 tonnes
- ✓ 2 parties démontables
- ✓ Ecart / plan horizontal = $\pm 0,5$ mm

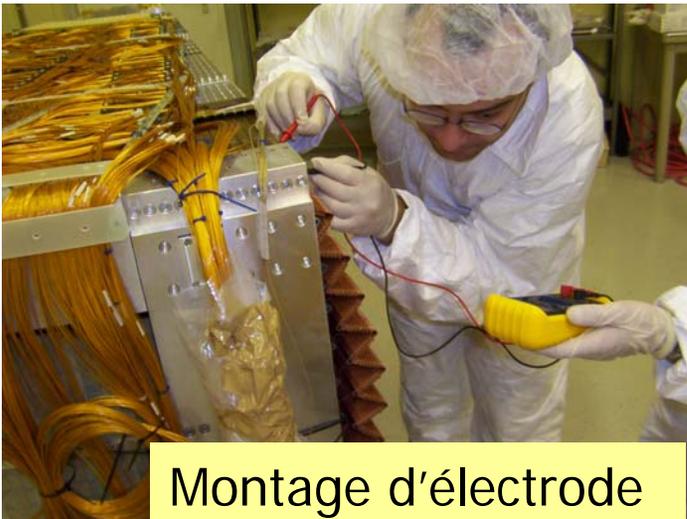
Mise en place des modules



Levage



Positionnement précis



Montage d'électrode

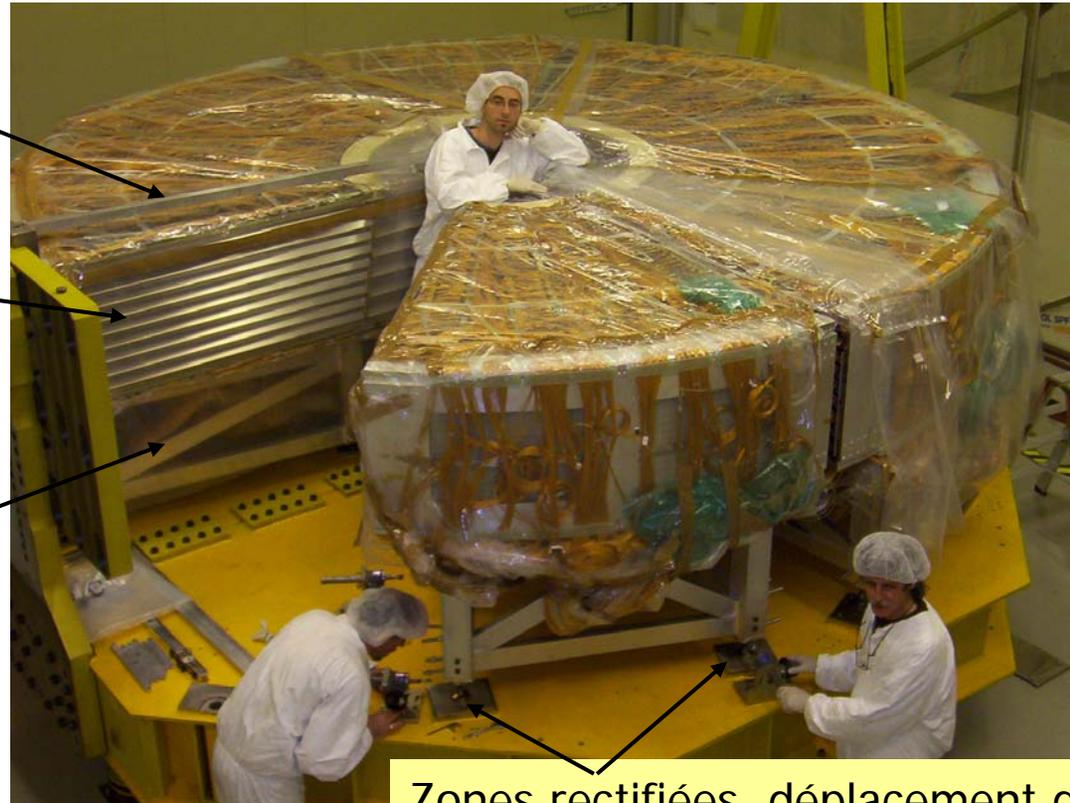
Des compétences très diverses
sont mises en œuvre lors des
phases d'intégration

Positionnement des modules

Référence à l'axe central

1er module en butée sur la référence angulaire

Support de transport et maintenance



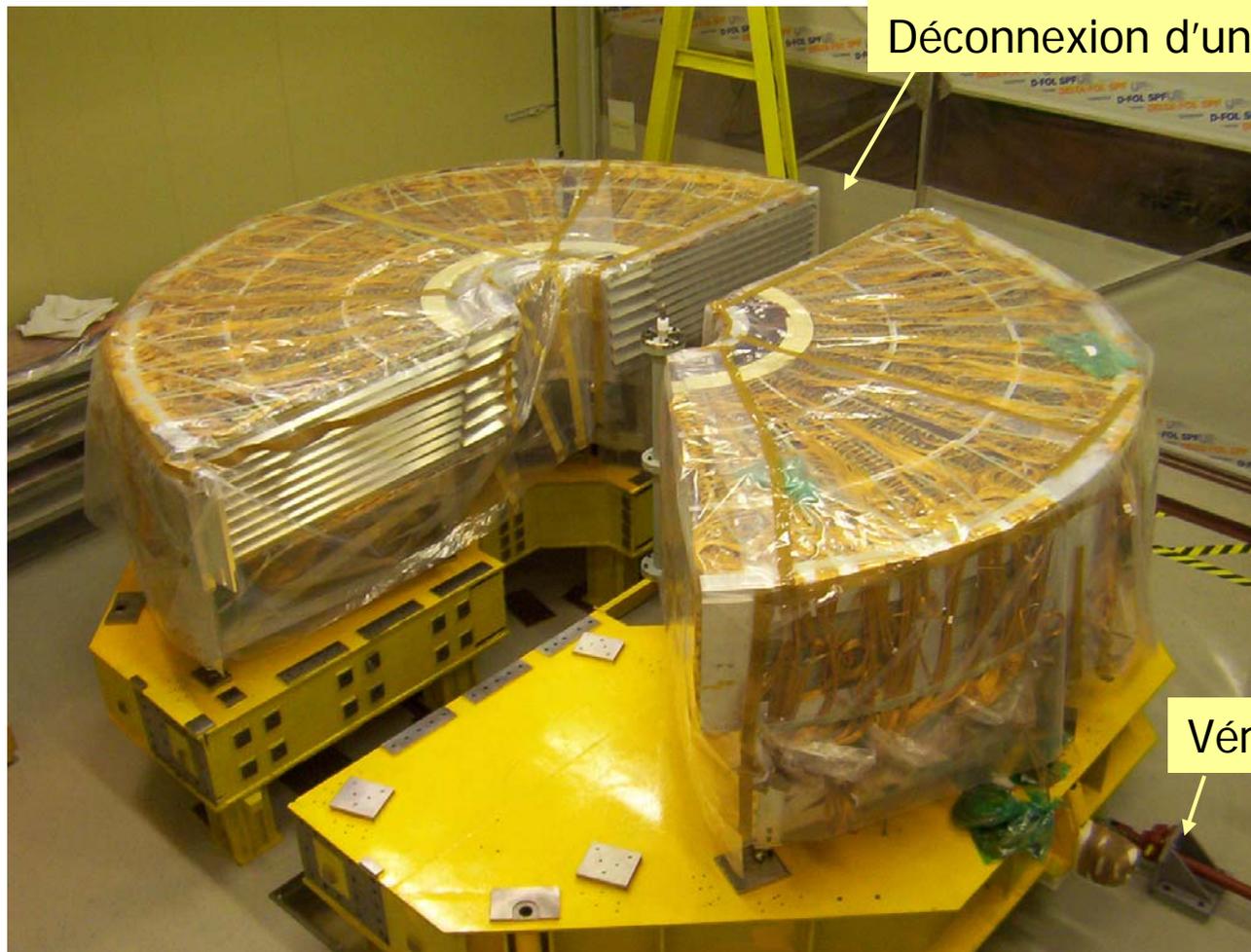
Zones rectifiées, déplacement du module par glissement

Positionnement précis :

$\pm 0,2$ mm absolu par rapport au centre de la table

$\pm 0,05$ mm relatif par rapport au module précédent

Insertion du dernier module



Ouverture de la table nécessaire à l'insertion

Fin de la 2éme phase

- Table refermée et boulonnée
- Montage de la roue terminé

Rayon moyen 2063.8 mm
pour 2064 nominal

Défaut de forme $\pm 0,7$ mm
Incluant:

- Incertitude de mesure :
0,3 mm
- Positionnement des cibles :
0,1 mm



Insertion dans le cryostat (1)

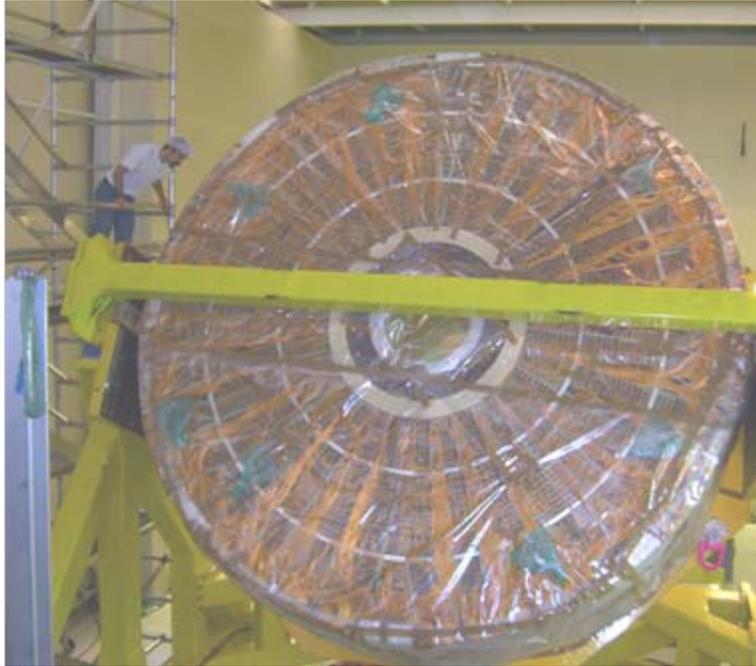


Levage de la table : ~ 40 T
déformée < 2 mm

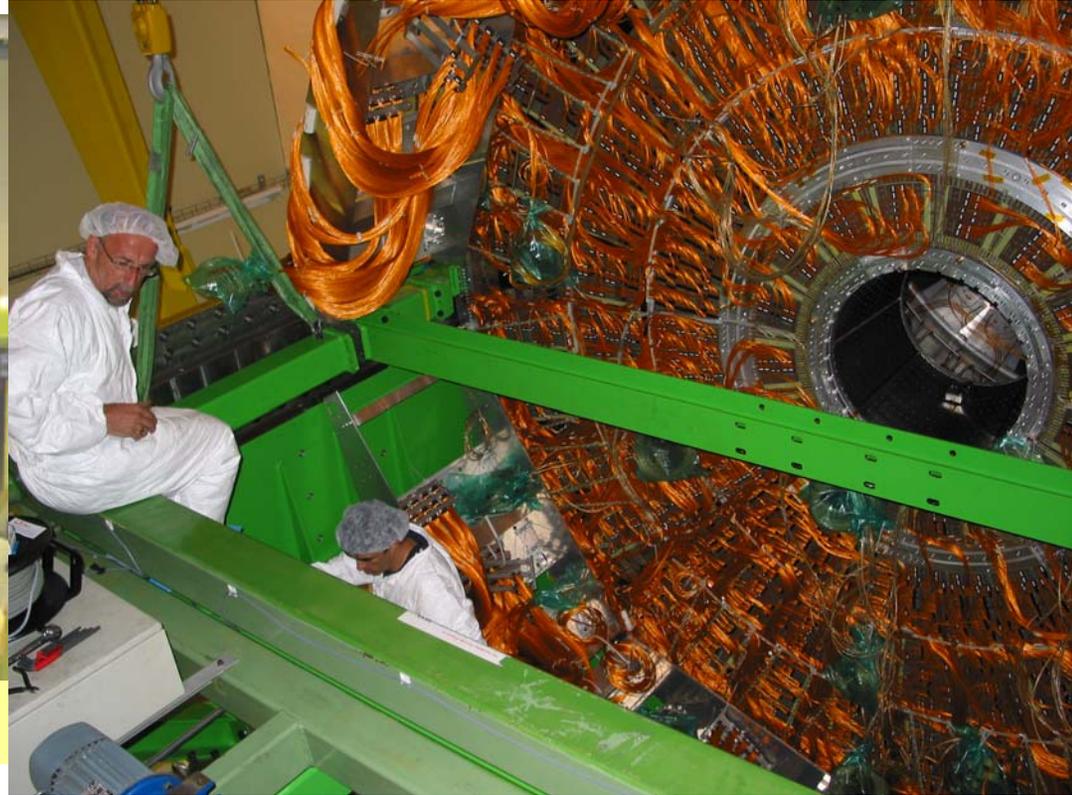


Mise en place sur le retourneur,
monté sur coussins d'air

Insertion dans le cryostat (2)



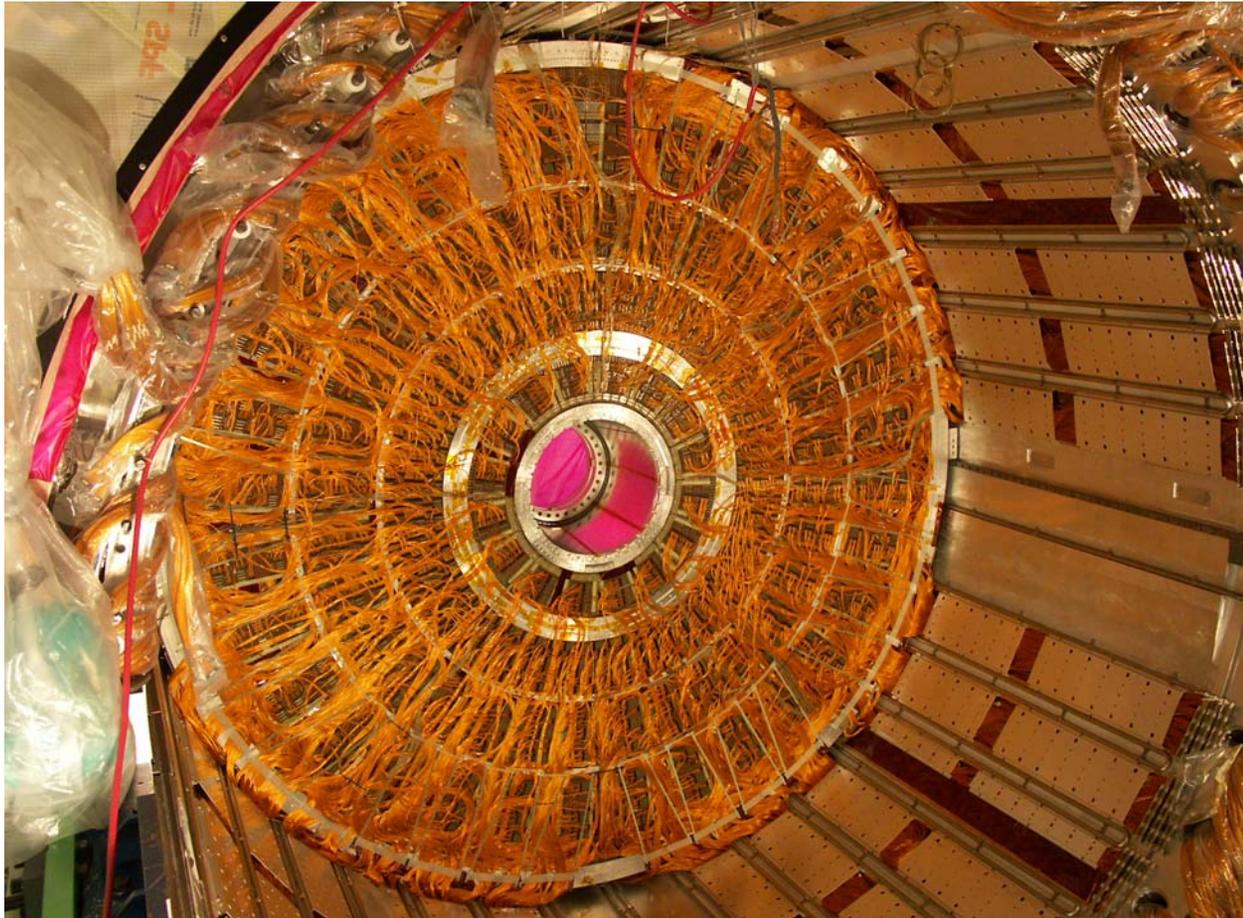
Rotation en position verticale



Poussée dans le cryostat

- Vis sans fin pilotée électriquement
- Patin à faible coefficient de frottement : 0,04

Calorimètre intégré dans le cryostat



3 ans ½ depuis la production du 1er module
jusqu'à l'insertion du second calorimètre

Généralités sur l'installation

- 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
 - Une bonne connaissance du détecteur n'est pas indispensable

L'installation sur un 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 toroidal dans la caverne d'ATLAS



Mise en place sur la structure support
Précision ± 2 mm

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



Du détecteur à la mesure



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
- 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



Installation des aimants toroïdaux dans la caverne ATLAS



Mise en place de la première bobine

Enroulement supraconducteur contenu dans une enceinte à vide en Inox

Masse ~ 110 tonnes

Longueur = 25 m

Largeur > 5 m

Montage des plateformes d'accès et des supports temporaires des bobines

→ Outillages spécialement produits pour cette mise en place

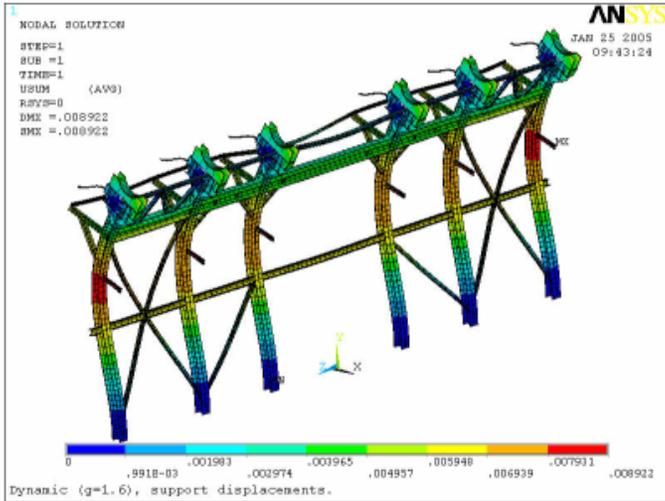


Installation des bobines supérieures



Une à une les enceintes sont positionnées avec des méthodes et outillages très évolutifs

Quelques « détails » techniques



Analyse par EF des structures assurant le support transitoire des bobines :
 Une déformation de 9 mm est attendue
 → Positionnement difficile des bobines supérieures



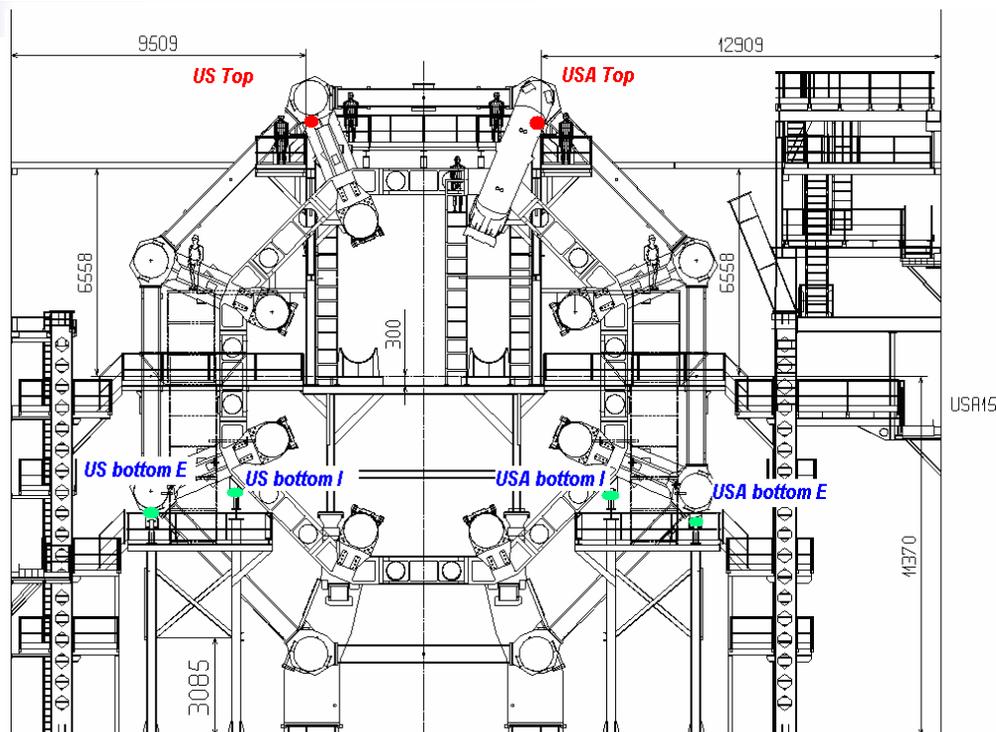
Les bobines sont reliées par 16 poutres en aluminium.

Chaque goujon est précontraint avec une force de 200 à 600 kN

Contrôle statistique du serrage



Mise sous poids propre de l'aimant

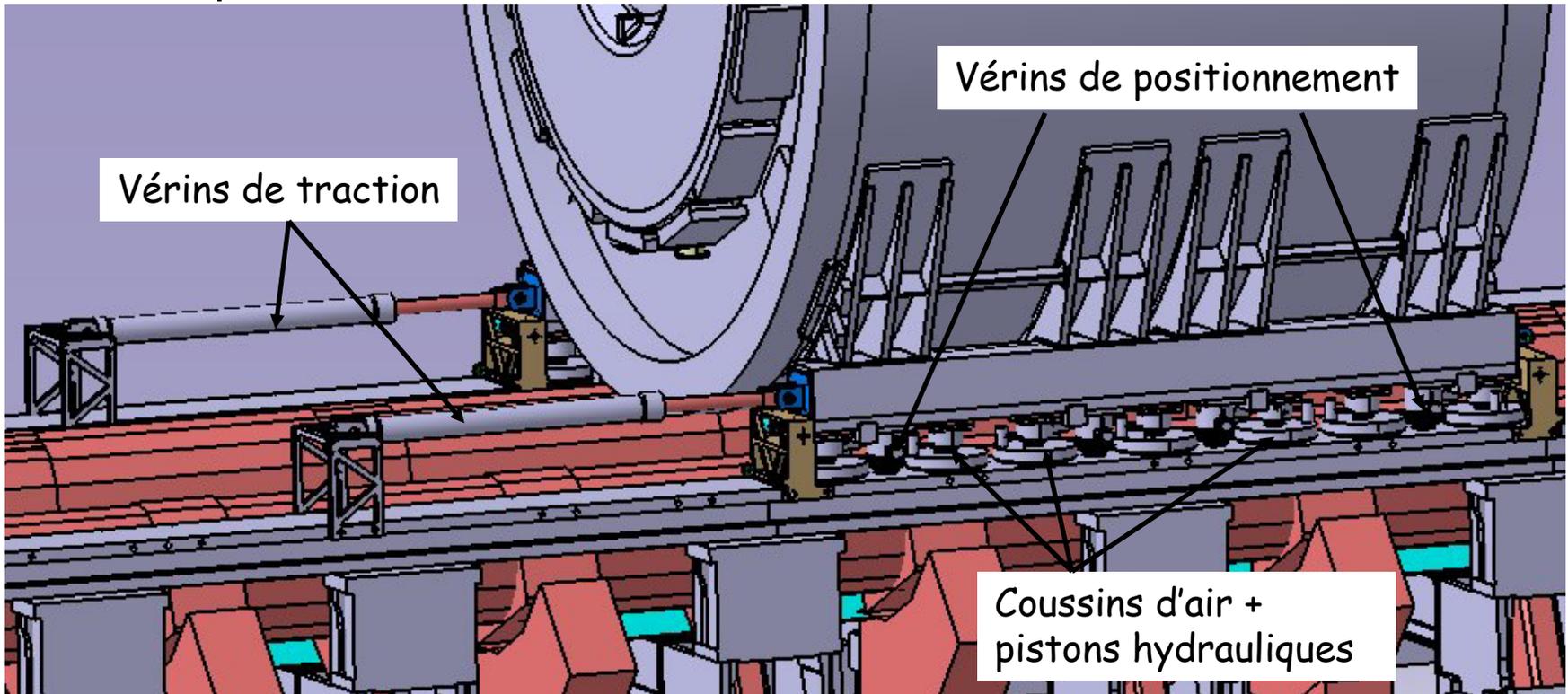


- La déformation est contrôlée pendant l'opération
 - Critère = 1.7 mm/m
 - 44 vérins hydrauliques reprennent la charge
 - Pilotage unitaire des vérins par électrovannes
 - 32 capteurs de déplacements
- Coussins à huile permettant les déformations latérales

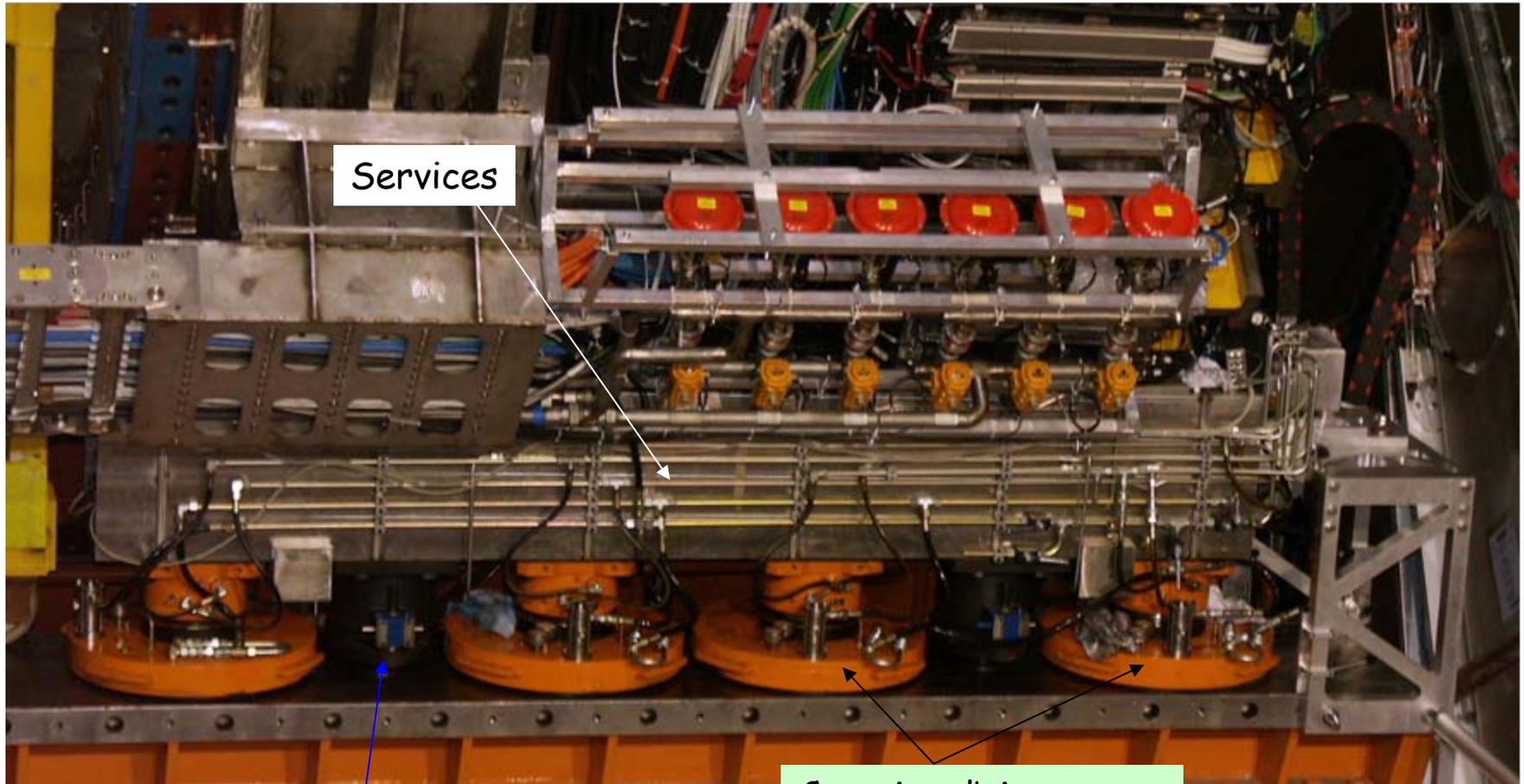


Systeme de mouvement de detecteurs

- Systeme de mouvement de charges lourdes utilise sur ATLAS
- Charges comprises entre 130 et 1600 tonnes
- Le principe est identique pour tous les detecteurs mobiles sur les rails de l'experience



Calorimètre bouchon d'ATLAS



Services

Vérins de positionnement

Coussins d'air + pistons hydrauliques

Principe de fonctionnement

- En statique le détecteur repose sur les vérins de positionnement
- Lors d'un mouvement
 - les vérins de traction sont sortis et ancrés sur les rails,
 - la charge est reprise par les pistons hydrauliques et soulevée de 3 mm,
 - les coussins d'air sont gonflés (≈ 40 bars) avec régulation de la hauteur :
l'hydraulique compense le pneumatique
 - Les vérins de traction sont rentrés, produisant le déplacement du détecteur
 - Vitesse ≈ 3 mm/s, frottement $\approx 1\%$, mouvement pas à pas

Pour éviter les contraintes et déformations sur les détecteurs la charge est reprise en 3 points hydrauliques, quelque soit le nombre de vérins

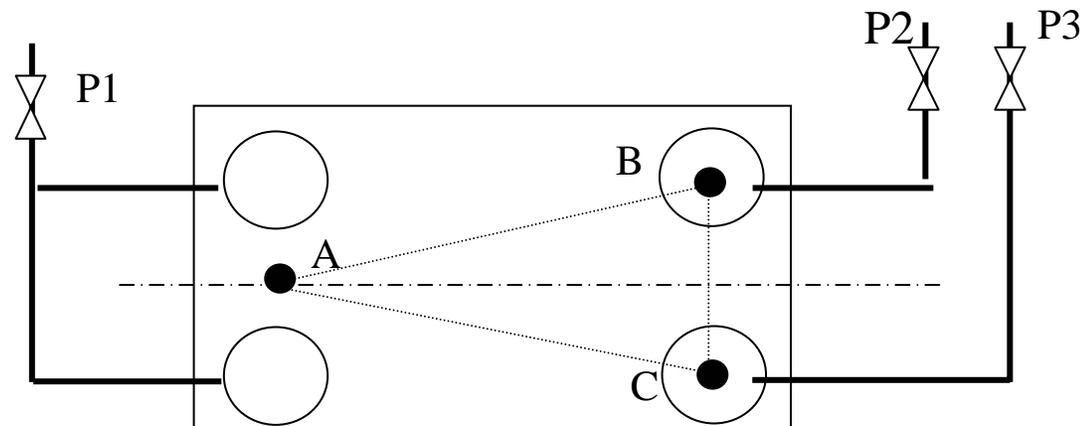
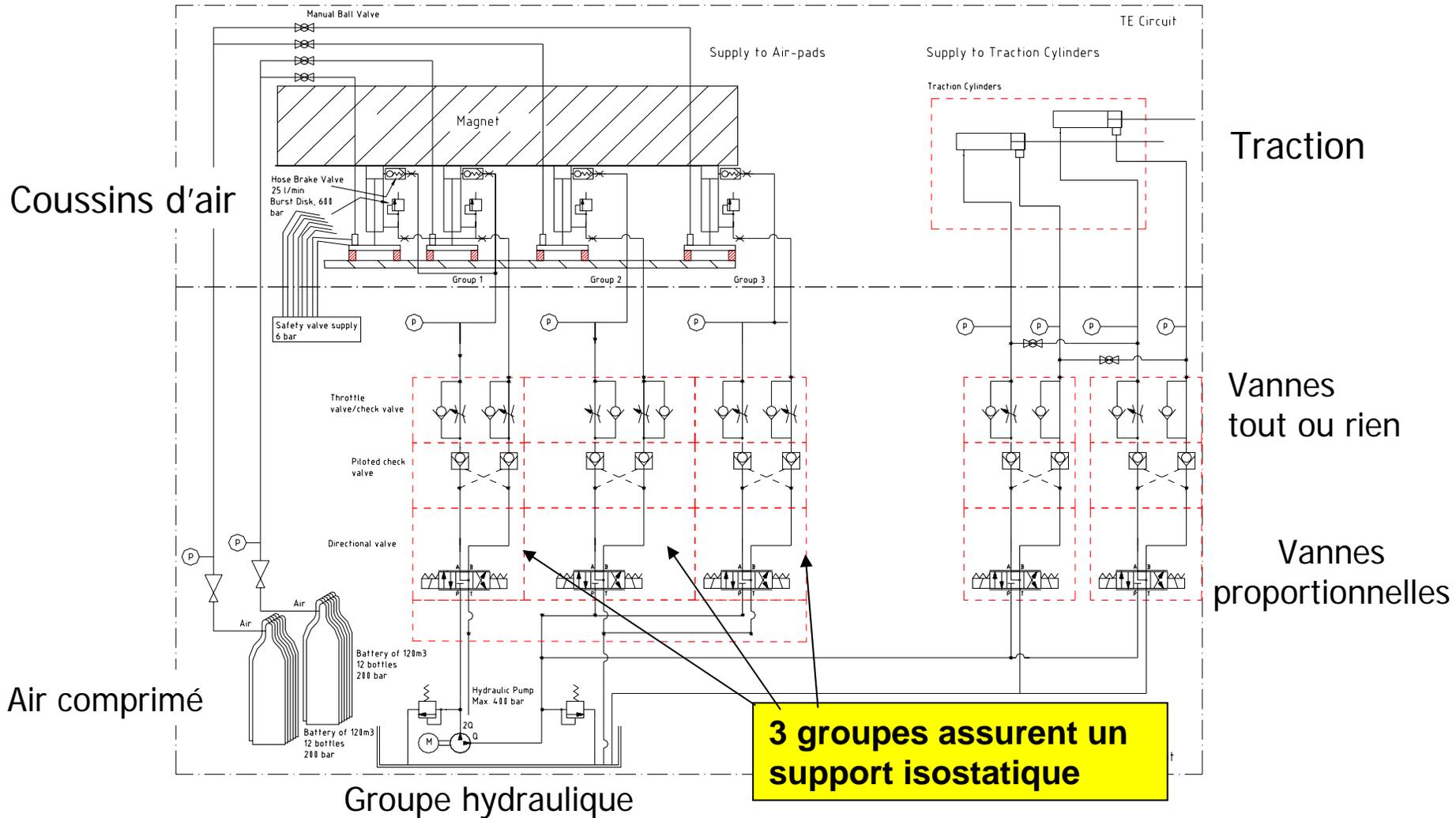


Schéma hydraulique



Quelques caractéristiques

- Capteurs de pression sur chaque organe
- Mesure de déplacement par capteurs LVDT, précision > 0.1 mm
- Mesure du mouvement par capteur de déplacement à fil (course 15 m, mais précision insuffisante pour le positionnement final des détecteurs)
- Analyse des risques et conséquences en cas de défaillance



**Pilotage par
automate programmable**

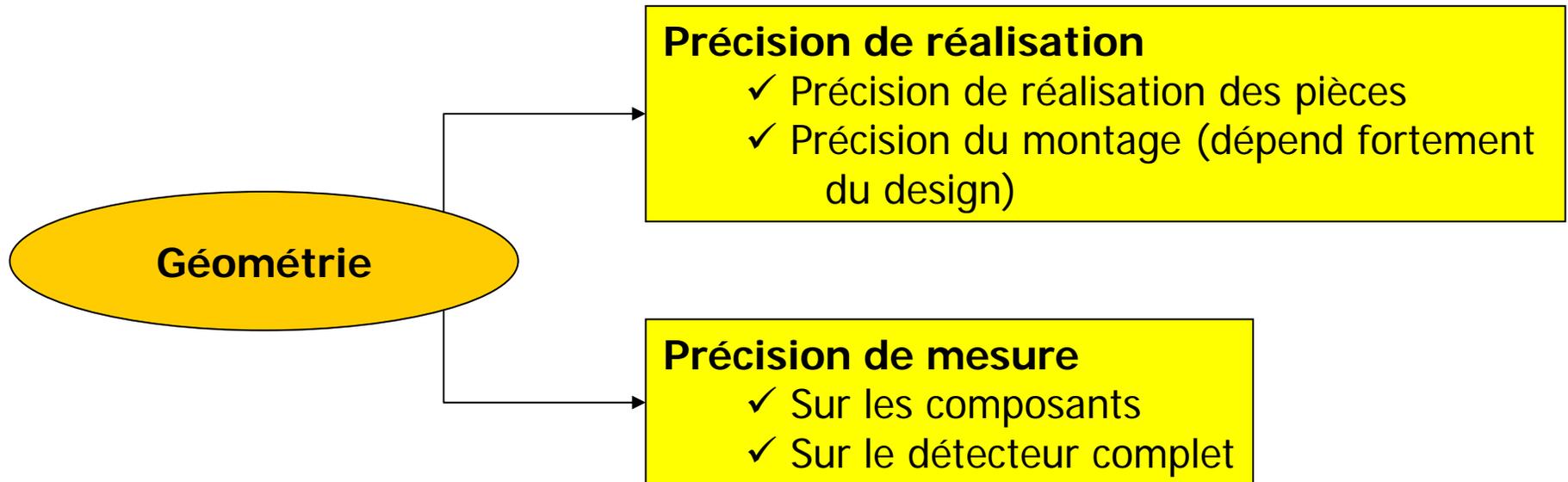
Du détecteur à la mesure



Groupe hydraulique

Métrologie et positionnement (1)

La connaissance de la géométrie du détecteur et de sa position est fondamentale pour l'analyse des évènements
 → la métrologie est une science très importante.



Deux notions complémentaires
 mais différentes



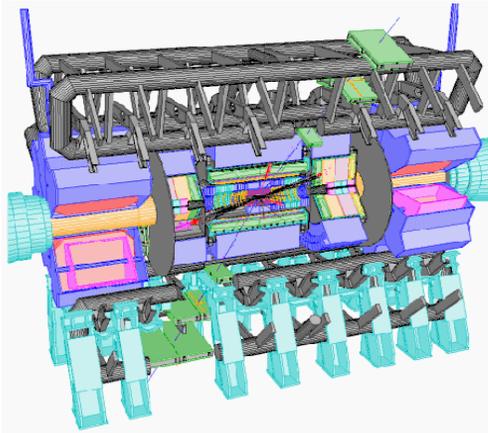
Spécifications techniques
 explicites

Métrologie et positionnement (2)

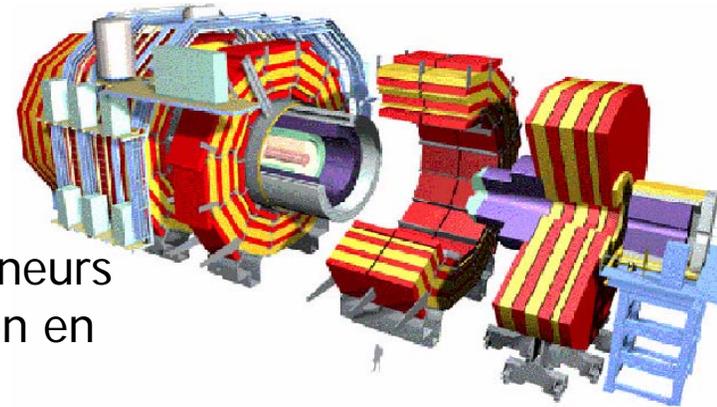
Position

Précision de mesure

- ✓ Sur le détecteur complet
- ✓ Dans son environnement



Les expériences sur collisionneurs
 présentent une configuration en
 poupées Russes



- Application d'une méthodologie "boite par boite"
 - 3 points de référence au minimum par boite (généralement plus)
- ➡ Savoir positionner chaque système par rapport au faisceau

Moyens de mesure dimensionnelle

- On utilise les moyens de métrologie classiques

<10 μ m

- Mesure d'une dimension \Rightarrow pied à coulisse, palmer
- Mesure de plusieurs dimensions, de tolérances de forme, de surface \Rightarrow Machine à mesurer (MMT)

- Pour les objets de grandes dimensions :

~100 μ m

- Théodolites, photogrammétrie \Rightarrow méthodes indirectes demandant des compétences de **spécialistes**.



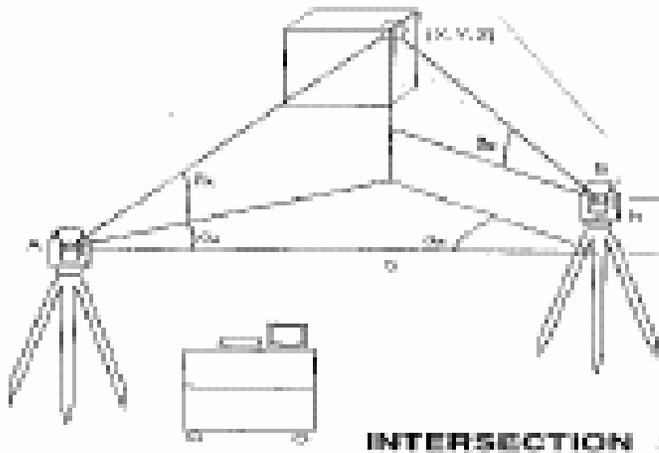
Spécificités des mesures (1)

- 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 déterminé à partir de points mesurés sur une surface
 - Utilisation d'algorithmes (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

Spécificités des mesures (2)

- 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,...



INTERSECTION SPATIALE

Mesure d'angles et de distances

△ Angles : 0.3 mgon

⊙ Distances : 0.2 mm

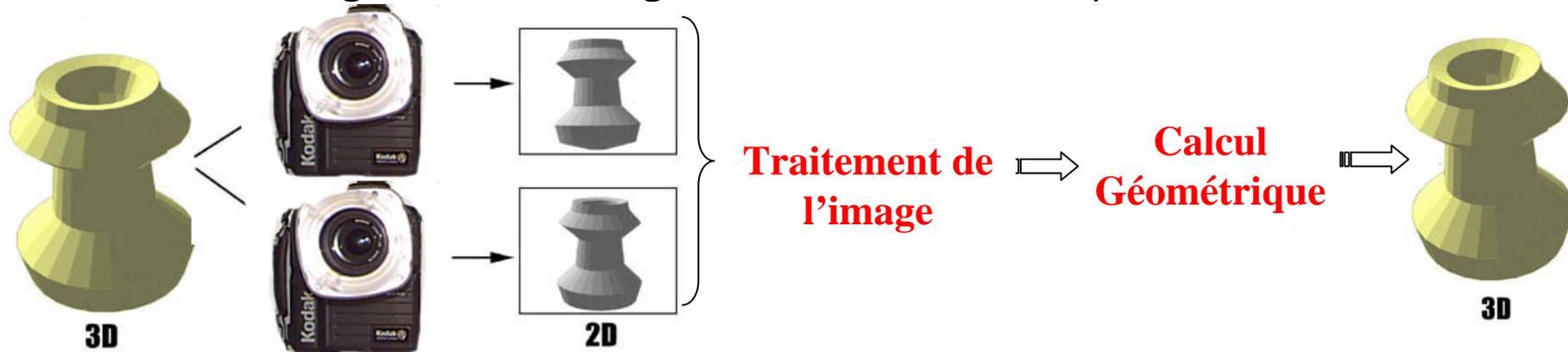
⊖ 1 sigma XYZ : 0.3 mm

La précision dépend de la configuration

Moyen coûteux en personnel et en temps

La photogrammétrie... en quelques mots

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 ...

MISE à L'ECHELLE :



Formes ! Dimensions ?

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



Formes ! Dimensions !

La photogrammétrie... en quelques mots

- CALCUL GEOMETRIQUE

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

Exemple : les anneaux de la culasse de l'aimant CMS

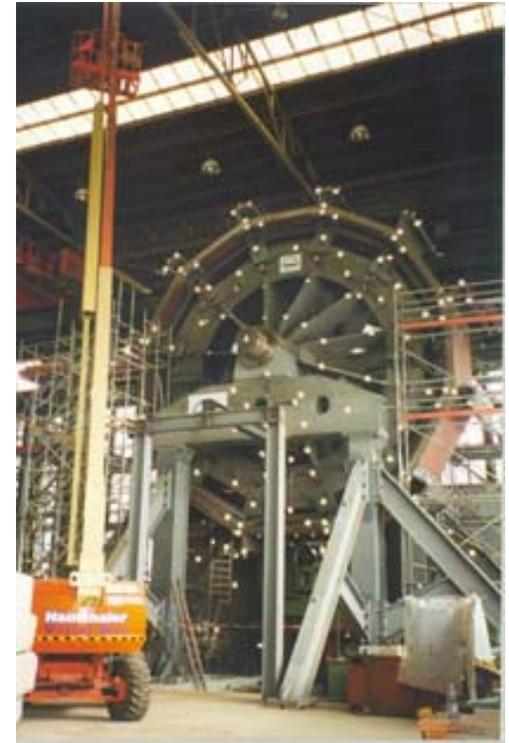
Ø 14 m, sommet à 18 m du sol, liaison entre les 2 faces,
Spéc : mieux que 0.5 mm in XYZ - immobilisation la plus courte possible.

Résultat : Immobilisation 4h30

548 points
318 images



SX = 0.091 mm
SY = 0.082 mm
SZ = 0.145 mm



- Analyse fonctionnelle
 - L'analyse fonctionnelle - R. TASSINARI - Edition Afnor, 1995.
 - <http://www.ifrance.com/accessit/AccessitSite/FichesOutils/Analyse%20fonctionnelle.htm>
 - http://www.cyber.uhp-nancy.fr/demos/MAIN-003/chap_deux/index.html
 - http://rb.ec-lille.fr/Analyse_fonctionnelle/RemiBacheletGuideDe_I_AF.PDF
- The ANTARES Project, Amram P. *et al*, Nucl. Phys. B Proc. Supp. 75 (1999) 415-417
- Assembly Concept and Technology of the ATLAS Barrel Toroid - Foussat A. *et al* - 19 Magnet Technology, Genova, Sept. 2005
- TDR du bouchon du calorimètre électromagnétique - ATLAS
- TDR du détecteur à pixels – ATLAS
- Specification for the cooling and heating of the EMEC – P.Karst – 2004
- Thermal calculations on the End Cap cryostat cooling – M. Raymond – 2004
- Métrologie de positionnement – C. Lasseur - Cern