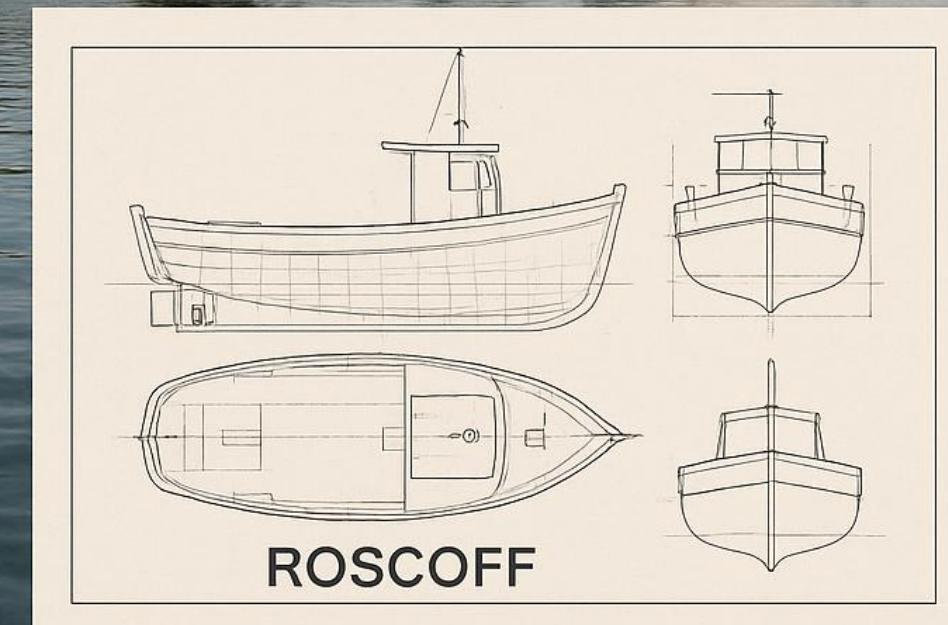


Ecole « Du détecteur à la mesure »
24-28 novembre 2025

Mécanique des détecteurs



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





Sommaire

1^{ère} partie

1. Introduction

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

2. Analyse, Conception et Fabrication

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

2nd partie

3. Intégration détecteurs

- Photodétecteurs
- DéTECTEURS gazeux
- Bolomètre
- Semi-conducteur
- DéTECTEUR optique
- Transport

4. Installation sur site

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

5. Conclusion

- Résumé
- Perspectives



Sommaire

1^{ère} partie

I. Introduction

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

Définition et domaines d'études

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

Quantique
Matériaux
Optique
Thermodynamique
Mécanique
Electromagnétisme
Atomique et nucléaire
Particules
Astrophysique

Science

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

Propriétés:

- Cinématique
- Statique
- Dynamique
-



1^{ère} loi: Inertie
2^{ème} loi: PFD
3^{ème} loi: $F_1=F_2$

Objets:

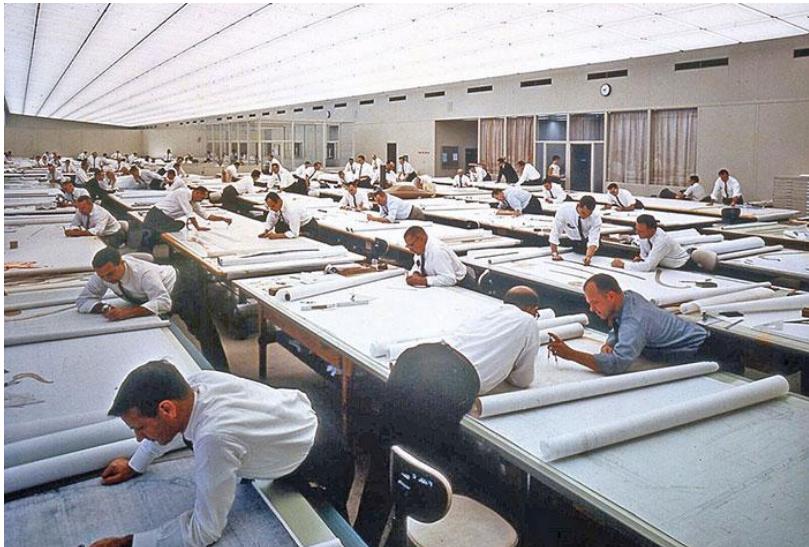
- Mécanique du point
- Mécanique du solide
 - ✓ Déformable
 - ✓ Indéformable
- Mécanique des milieux continus
 - ✓ Résistance des matériaux
 - ✓ Mécanique des fluides

Technique

Conception de produit
Fabrication
Automatisation
Métrologie
Qualité
Maintenance
Recyclage

Organisation des métiers

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



&



Bureau d'études

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

Ateliers mécaniques

- Fabrication et montage
- Prototypage
- Impression 3D

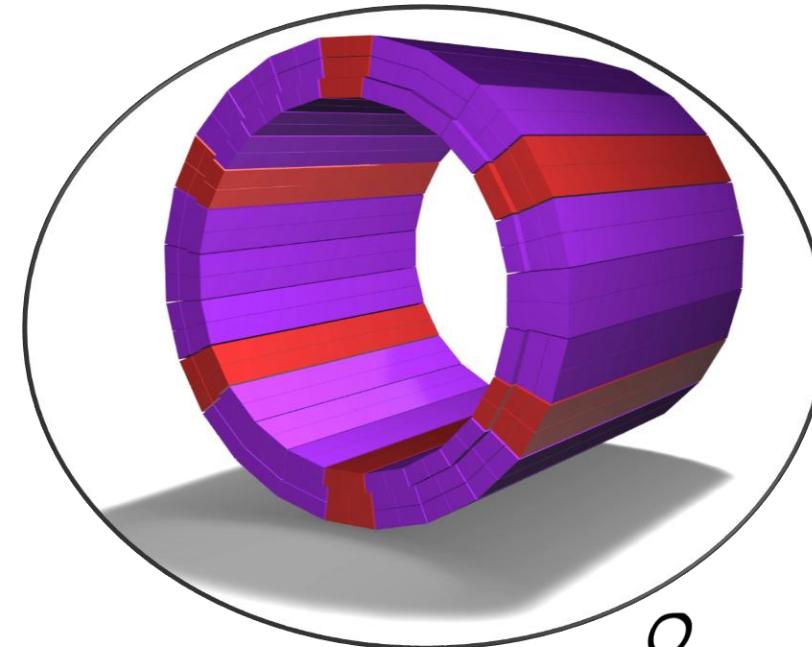
Des métiers en évolution

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



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

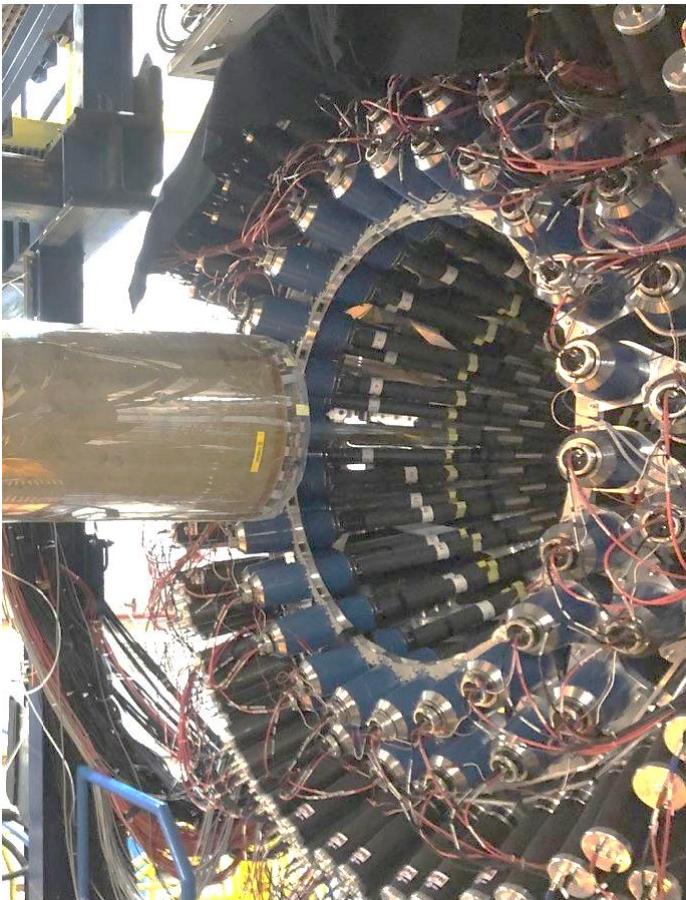
- Pas de matière
- Parties actives du détecteurs en « lévitation »
- Zéro zones mortes
- Pas de câbles
- Formes géométrique parfaites
- Tolérances mécaniques parfois fantaisistes
- Interchangeable rapidement et facilement



Scintillateurs
en plastique



Ce qu'il obtient !



Dans les détecteurs

□ Fonctions mécaniques:

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

□ Domaines de mécaniques:

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

□ Domaines physiques connexes:

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

Très grande diversité de développements

Dimensionnelle:

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

Technologique:

- Photodétecteurs
- DéTECTEURS gazeux
- Semi-conducteurs
- Bolomètres
- Optique

Contexte et environnement:

- Accélérateurs et collisionneurs
- Spatial
- Observatoires

Très grande diversité de développements

□ Dimensionnelle

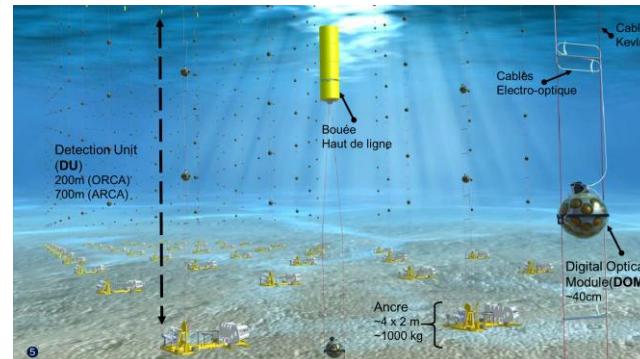
- Masse de quelques kg à plusieurs milliers de tonnes
- **Quelques cm à plusieurs dizaines de mètres**

□ Technologique

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

□ Contexte et environnement

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



KM3Net, Large de Marseille

Très grande diversité de développements

□ Dimensionnelle:

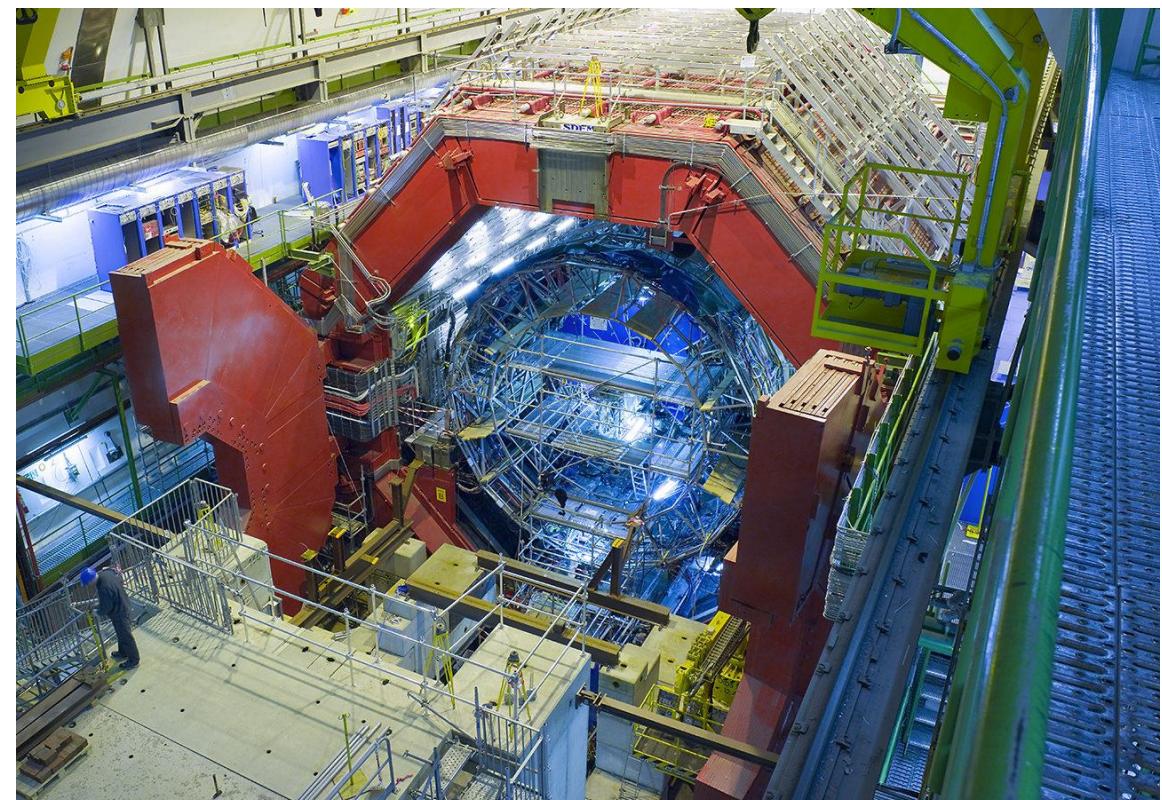
- Masse de quelques kg à **plusieurs milliers de tonnes**
- Quelques cm à **plusieurs dizaines de mètres**

□ Technologique:

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

□ Contexte et environnement:

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



ALICE / H=16m – L=26m – m=10 000 Tonnes

Très grande diversité de développements

□ Dimensionnelle:

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

□ Technologique:

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

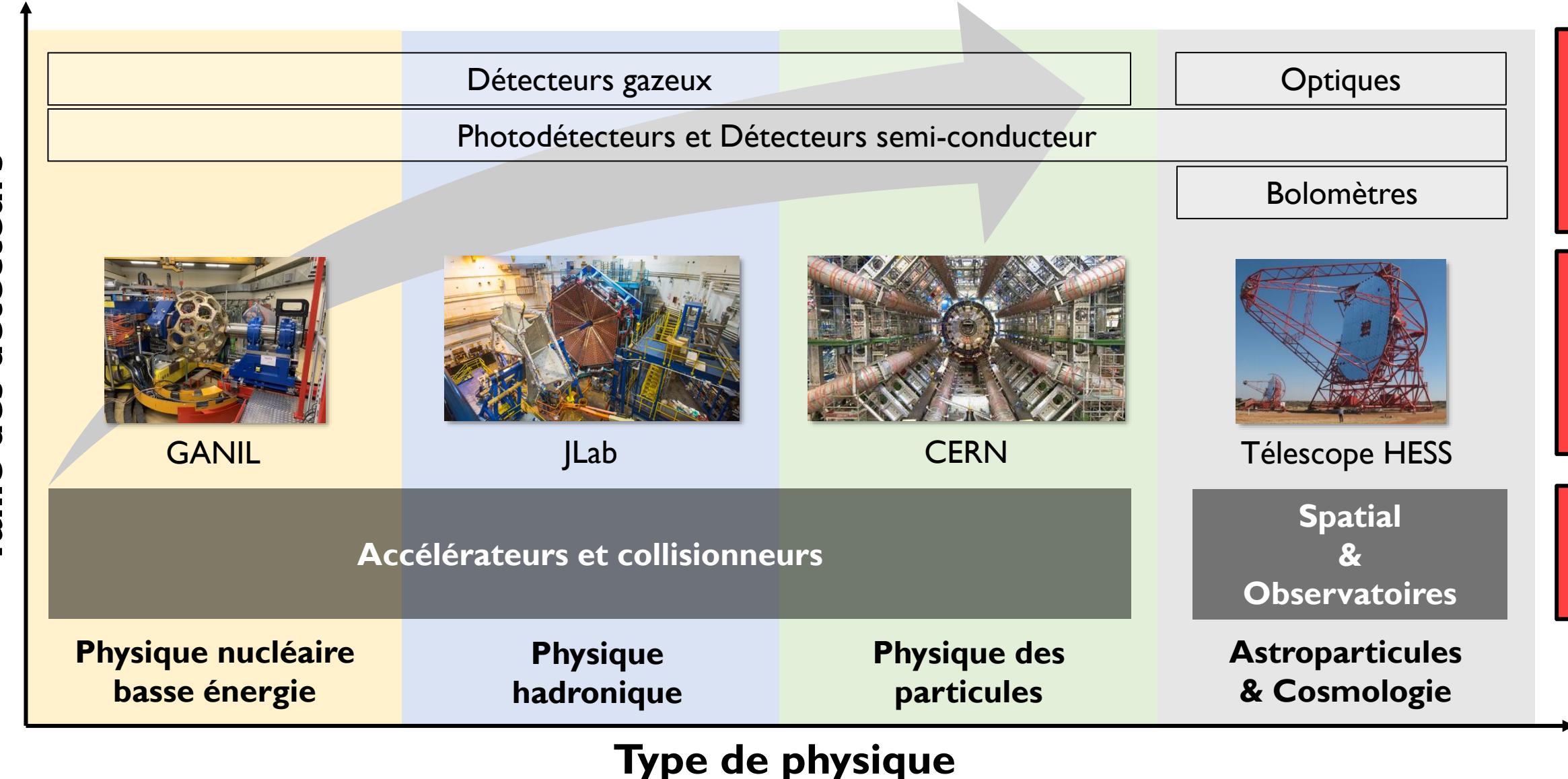
□ Contexte et environnement:

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



Installation de
GLAST/FERMI dans la
fusée DELTA II

Taille des détecteurs





Sommaire

1^{ère} partie

2. Analyse, Conception et Fabrication

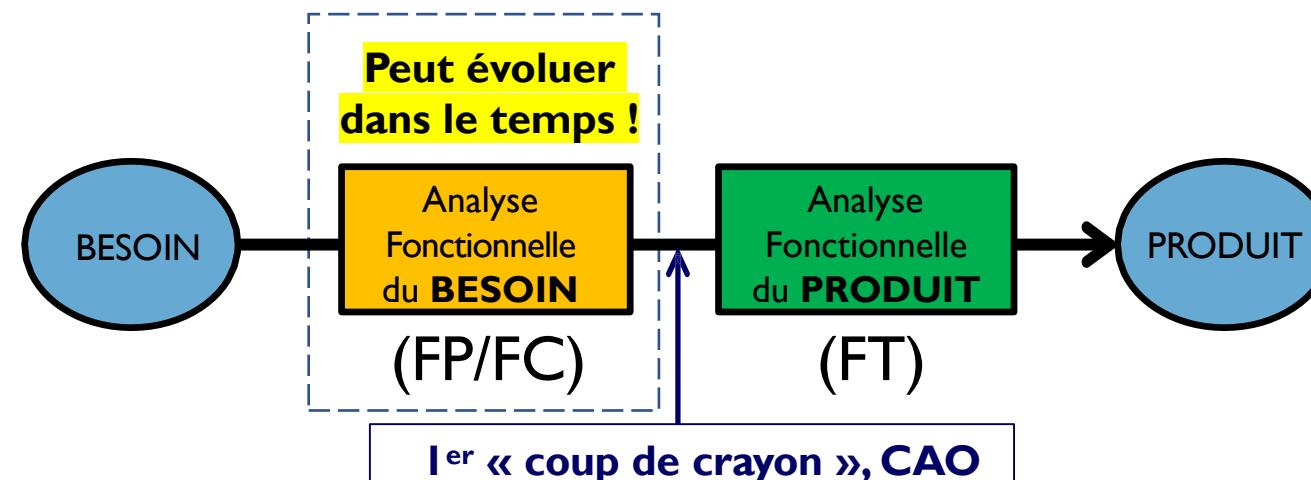
- Analyse du besoin
- Conception mécanique
- Dimensionnement, simulation numérique
- Fabrication mécanique
- Métrologie
- Essais mécaniques, qualification et validation

Analyse fonctionnelle du produit (Fonctions Techniques)

- Traduction du besoin (Fonctions Principales FP), Itération des contraintes et des exigences (Fonctions de Contraintes FC)
- Liste exhaustive de l'ensemble des Fonctions Techniques (FT)
- Mise en place d'une méthodologie précise permettant de décomposer le projet en tâches et sous tâches
- L'objectif est de pouvoir rédiger le Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) qui donne une description précise des tâches à réaliser
- Permet de procéder à une analyse de risques qui vise à évaluer et hiérarchiser les problèmes potentiel d'un produit. (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité, AMDEC)



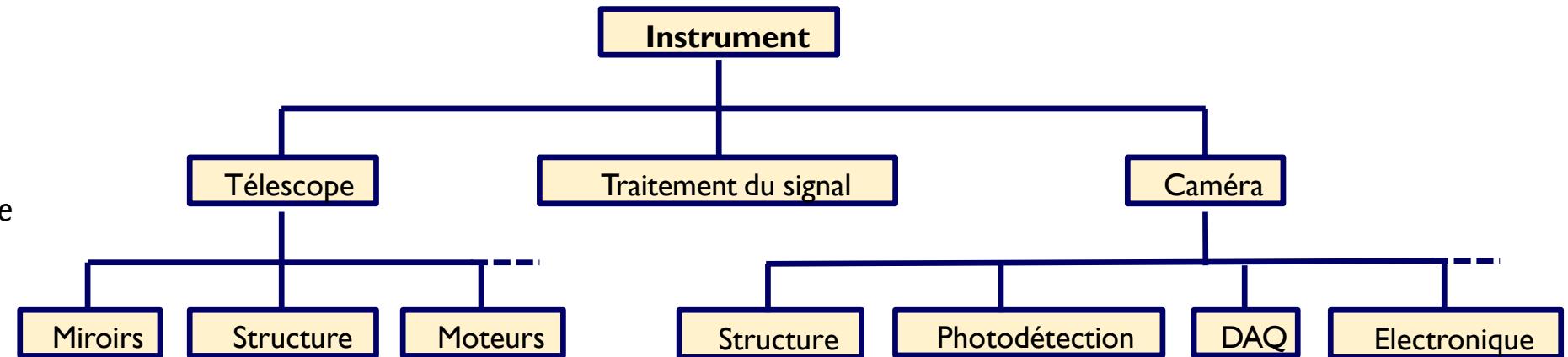
- ✓ Idée ou concept du chercheur
- ✓ Proposal physique
- ✓ Cahier des charges succinct



Analyse fonctionnelle: Product Breakdown Structure (PBS)

- Souvent cette méthode qui est la plus utilisée
- Outil pour hiérarchiser et quantifier le degré d'importance des différentes fonctions
- Une arborescence fonctionnelle qui répond à la question « pourquoi »
- Une arborescence produit qui répond à la question « comment »
- Le but étant in fine de rationaliser le nombre de Fonctions Techniques
- Permet d'amorcer une démarche qualité afin d'avoir un historique des solutions et suivre aisément les modifications
- Permet rapidement d'identifier les différents work packages

*Exemple d'arborescence
produit pour un télescope*



Analyse fonctionnelle

- Elle permet d'avoir une vision claire des exigences attendues du produit
- Favorise l'exhaustivité et minimise donc les oubli (balaye la plupart des situations de vie, les éléments de l'environnement...)
- Les fonctions importantes doivent être parfaitement traitées.
- L'approfondissement des niveaux de chaque critère est à doser selon les besoins
- L'objectif est de gagner du temps et non d'en perdre
- La question du niveau de détail approprié est donc capitale

Commentaire:

Comme pour la qualité au sens large, 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. Le niveau de détail sera fortement lié à la taille du projet.

Limite:

Mise en place parfois difficile dans les très grandes collaborations compte tenu du nombre de work packages.

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

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

□ La conception du détecteur par lui-même:

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

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

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

La conception doit intégrer très tôt la faisabilité des pièces

Nécessité d'un dialogue fort:

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

Prise en compte du procédé de fabrication:

- Nombre de pièces
- Coût
- Performances attendues

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

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

Objectif de précision, 2 axes de conception possibles:

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

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

Quelques logiciels utilisés à l'IN2P3:

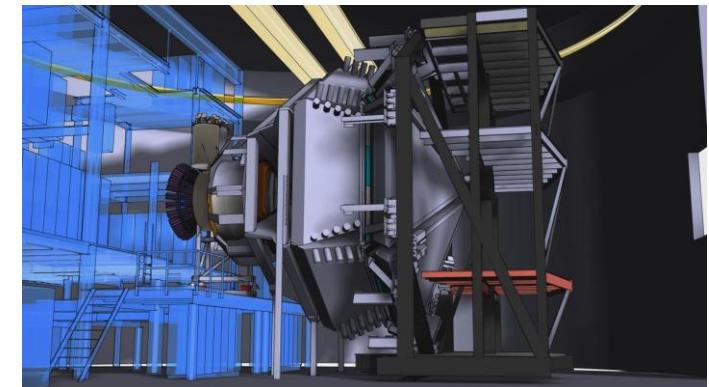
- 3D Expérience (Dassault Systèmes) et Solid Works (plus rare)
- Free CAD (très rare, licence publique)

La CAO 3D:

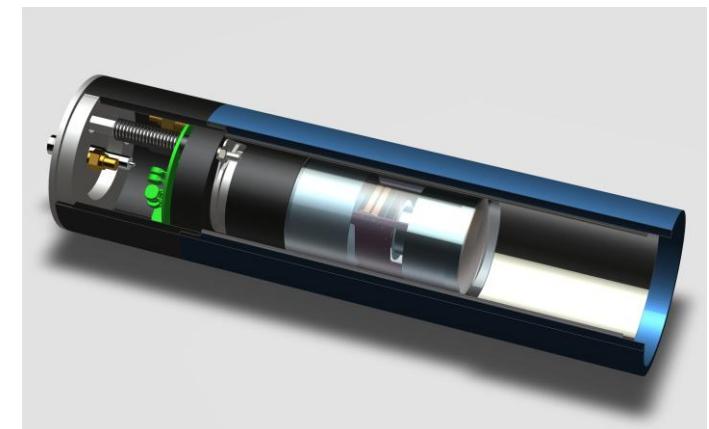
- Permet d'obtenir un modèle réaliste tout au long de la phase de conception
- Dimensionnement réel des éléments
- Prise en compte de toutes sortes d'échelles
- Mise en place de l'objet dans son environnement
- Définition des interfaces (entre détecteurs par exemple)

Périmètre élargi de la conception:

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



Hall B du Jefferson Laboratory (USA)



Ensemble PMT (CND, CLAS 12, JLab)

La conception de forme: Gestion du cycle de vie et collaboratif

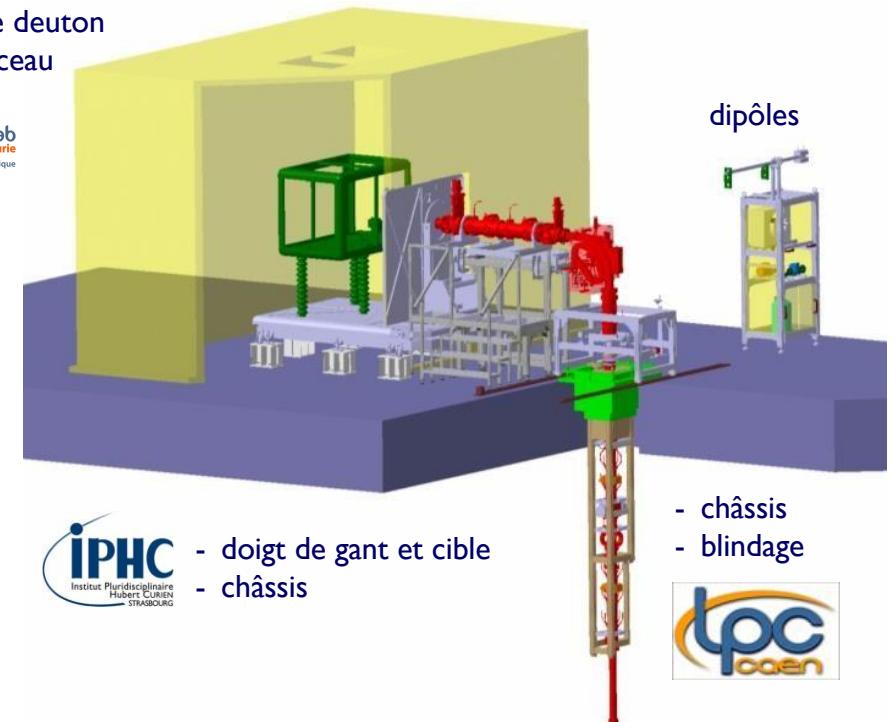
□ Modernisation terminée de l'outil de gestion:

- Anciennement Smarteam (ENOVIA, Dassault Systèmes)
- Prise en charge directement dans l'outil 3D Expérience

□ Intérêts et limitations:

- Sécuriser les conceptions
- Faciliter les échanges entre collaborateurs
- Parfaitement adapté aux collaborations IN2P3
- Mettre en place des validations
- Parfois lourd à utiliser
- Très peu utile pour les projets de taille modeste
- Acceptation de l'outil inégale suivant les collaborations

- source de deuton
- lignes faisceau



- doigt de gant et cible
- chassis



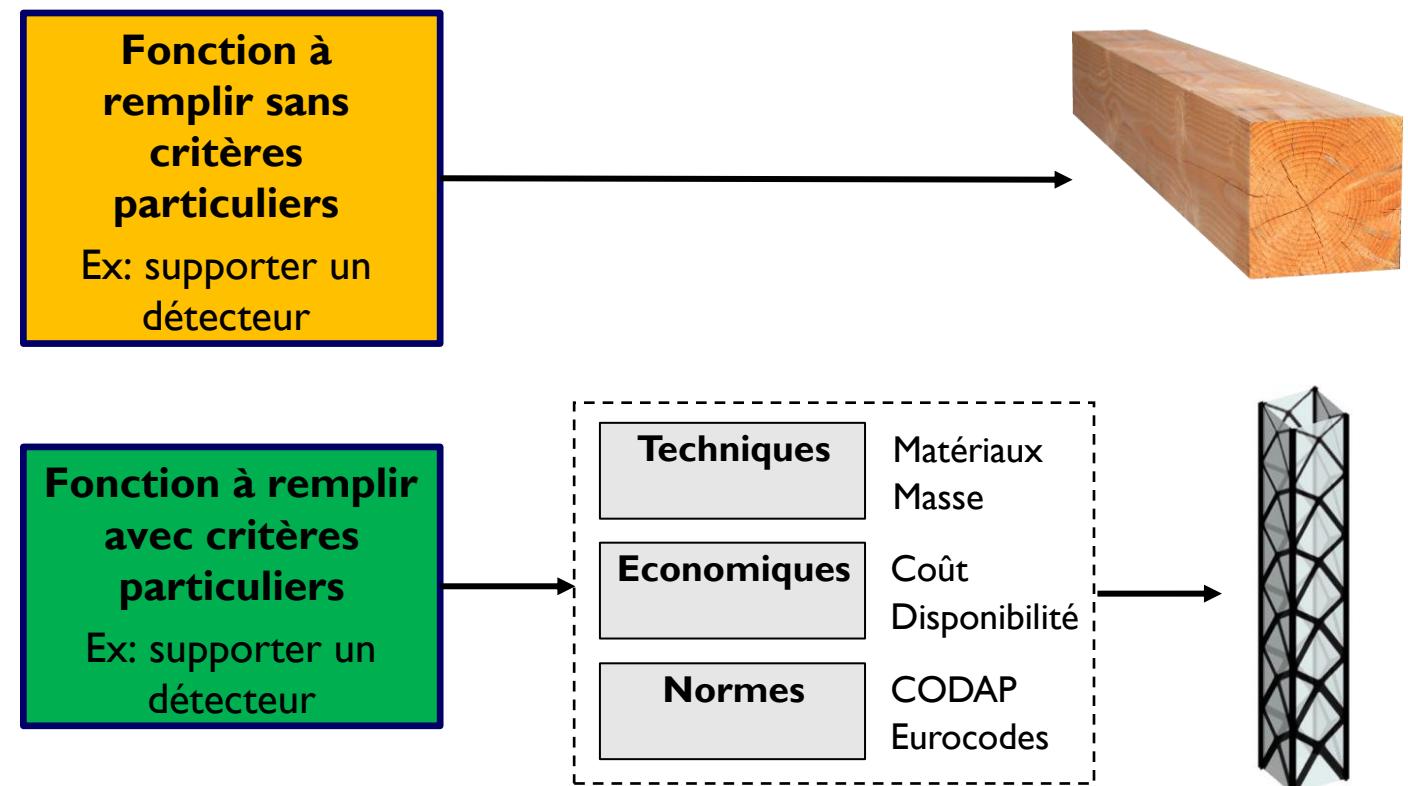
Exemple d'expérience impliquant plusieurs laboratoires IN2P3

Le dimensionnement

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

Etapes du dimensionnement:

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



Critère de l'épaisseur matière pour les détecteurs

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

□ Objectifs :

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

□ Longueur de radiation X_0 (voir cours DETMES de Laurent Chevalier & Co):

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

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

Dépend du Nb atomique Z et du Nb de masse A

	Air	Eau	Al	LAr	Fe	Pb	W
Z	-	-	13	18	26	82	74
X_0 (cm)	30420	36	8,9	14	1,76	0,56	0,35

Calcul analytique, formulaire et codes de calculs

□ Utilisation:

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

□ Exemples de codes:

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

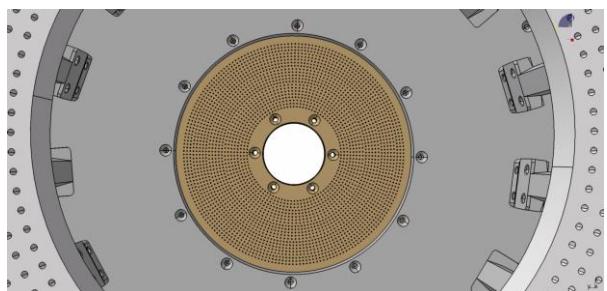
□ Principaux avantages:

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

Quelques exemples de dimensionnement

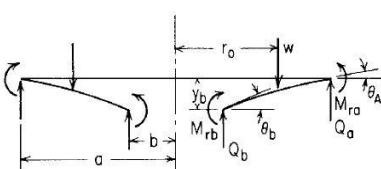
Donner des dimensions physiques les plus appropriées à un système en considérations d'aspects techniques, économiques ou réglementaires particuliers.

ANALYTIQUE



Plaque macor soumise à une pression

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



Analytic model
(Roak's formula)

General expressions for deformations, moments, and shears:

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

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

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

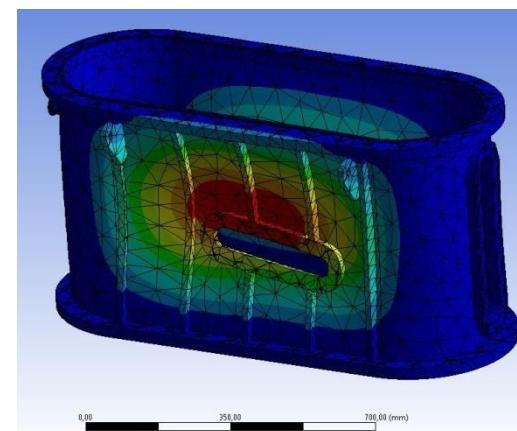
$$M_t = \frac{\theta D(1 - v^2)}{r} + v M_r$$

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

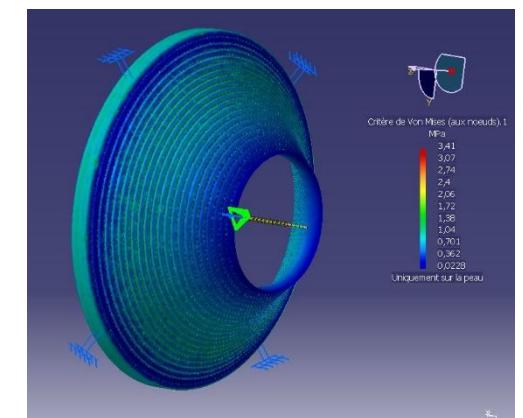
For the numerical data given below, $v = 0.3$

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

NUMERIQUE



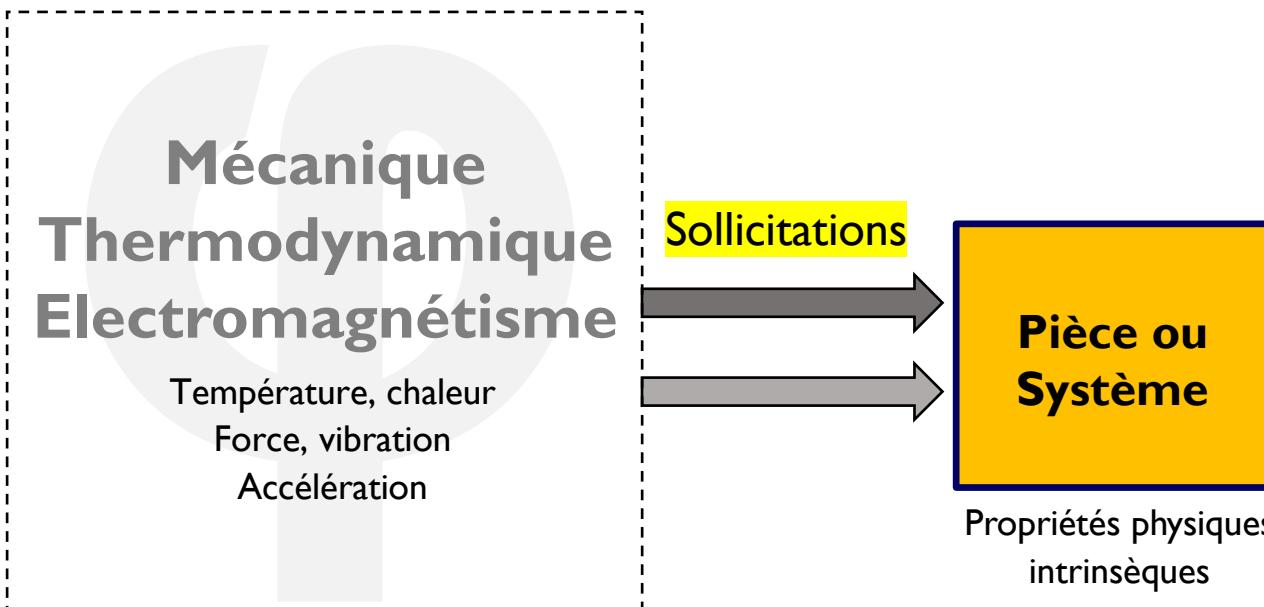
Déformation d'une enceinte
sous vide (GALOP)



Prototype structure fils
ALERT (contrainte)

La simulation numérique

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



Objectifs:

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

Comment résoudre un problème numérique?

1- GEOMETRIE

Définir une géométrie adaptée à la simulation (nettoyage CAO et plan de symétrie)
Conditions aux limites

2- LOIS PHYSIQUES

Lois de conservation (masse, de quantité de mouvement et énergie)
Lois de comportement

3- MATHEMATIQUE

Equations de conservation, représentation matricielle et Equations aux Dérivées Partielles

4- DISCRETISATION

Maillage de la géométrie par des éléments simples (espace)

5- RESOLUTION

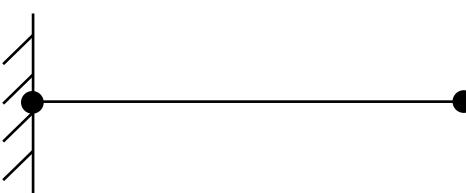
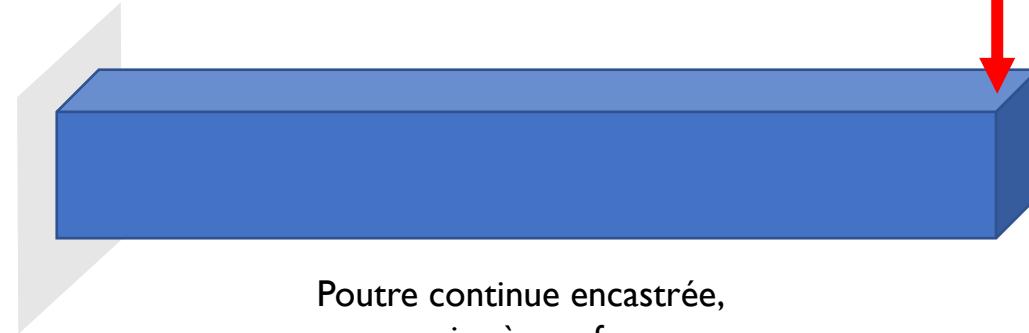
Méthode des différences finies, volumes finis et éléments finis
Inversion de matrices

6- ANALYSE

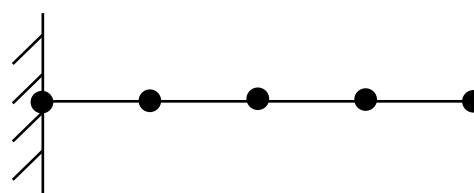
Analyse et interprétation, variations des paramètres d'entrées

Comment résoudre un problème numérique?

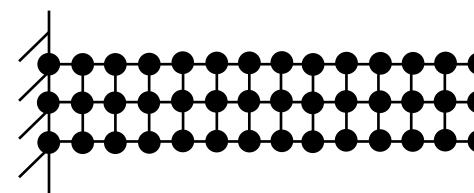
Petite note sur la discréétisation dans l'espace



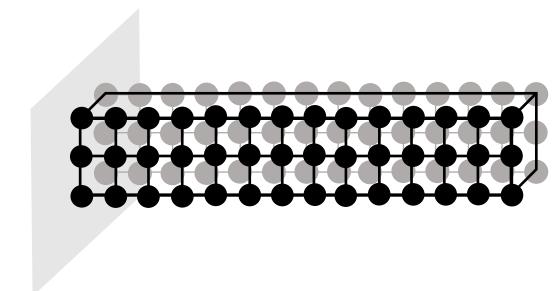
1 élément 1D



4 éléments 1D



Eléments 2D



Eléments 3D

Nœuds (dli)

3 trans : U_x, U_y, U_z

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

I- Comment résoudre un problème numérique? Projet Gate pour le projet MST CTA

□ GEOMETRIE

Définir une géométrie adaptée à la simulation (nettoyage CAO et plan de symétrie)

Conditions aux limites

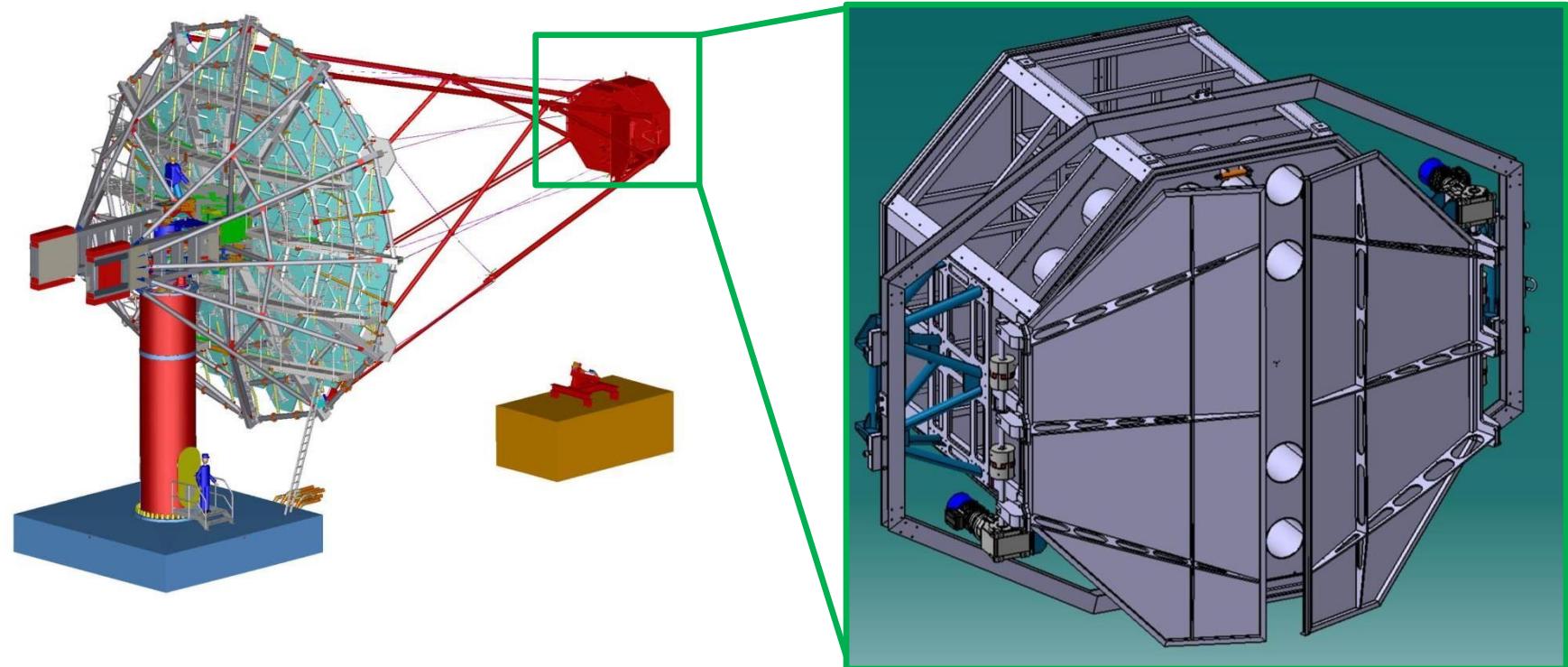
Problématique : Prédiction des contraintes liées à la dilatation différentielle entre la caméra aluminium et le cadre acier du télescope lors des variations de température annuelle (-20°C à +60°C)



MECANIQUE

+

THERMIQUE



I- Comment résoudre un problème numérique? Projet Gate pour le projet MST CTA

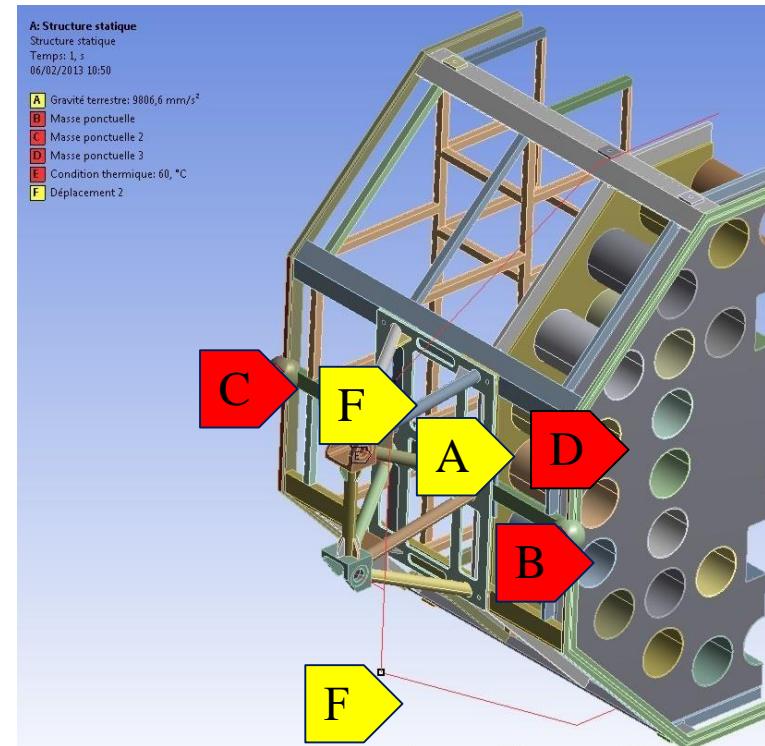
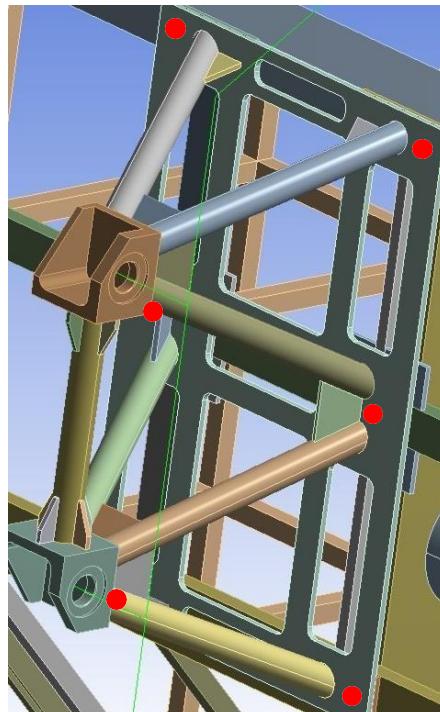
□ GEOMETRIE

Définir une géométrie adaptée à la simulation (nettoyage CAO et plan de symétrie)

Conditions aux 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
 - Contact sans frottement, transfert des efforts par 6 goupilles
 - Cadre : modèle poutre utilisé
- Modèle symétrique



- 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

2- Comment résoudre un problème numérique? Projet Gate pour le projet MST CTA

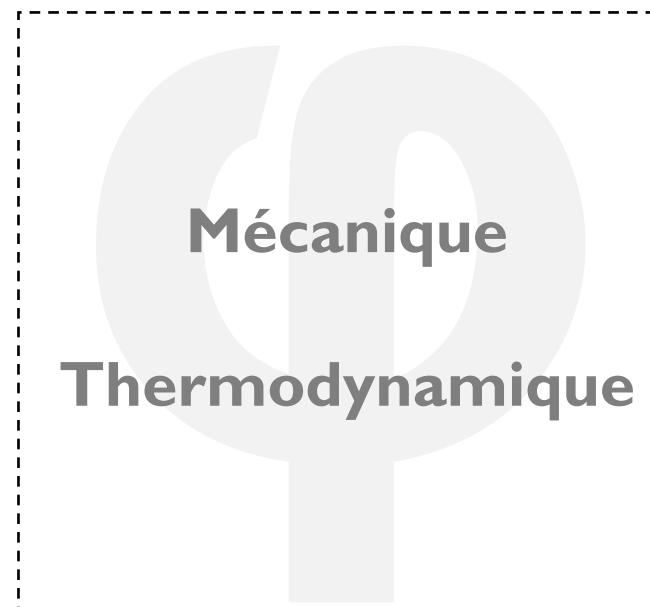
LOIS PHYSIQUES

Loi de conservation de la quantité de mouvement

$$\sum F = 0 \quad \text{et} \quad \sum M = 0$$

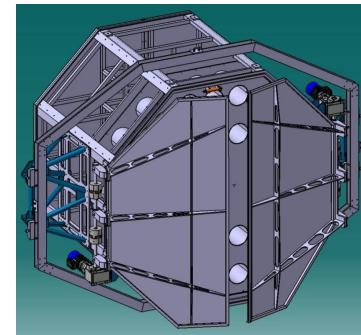
Lois de comportement (loi de Hooke généralisée)

$$\sigma_{ij} = C_{ij} \cdot \mathcal{E}_{ij}$$



STATIQUE

Force de gravité
Petites déformations
Comportement thermique



Cas 1: $\Delta T = 0^\circ\text{C}$

Cas 2: $\Delta T = +50^\circ\text{C}$

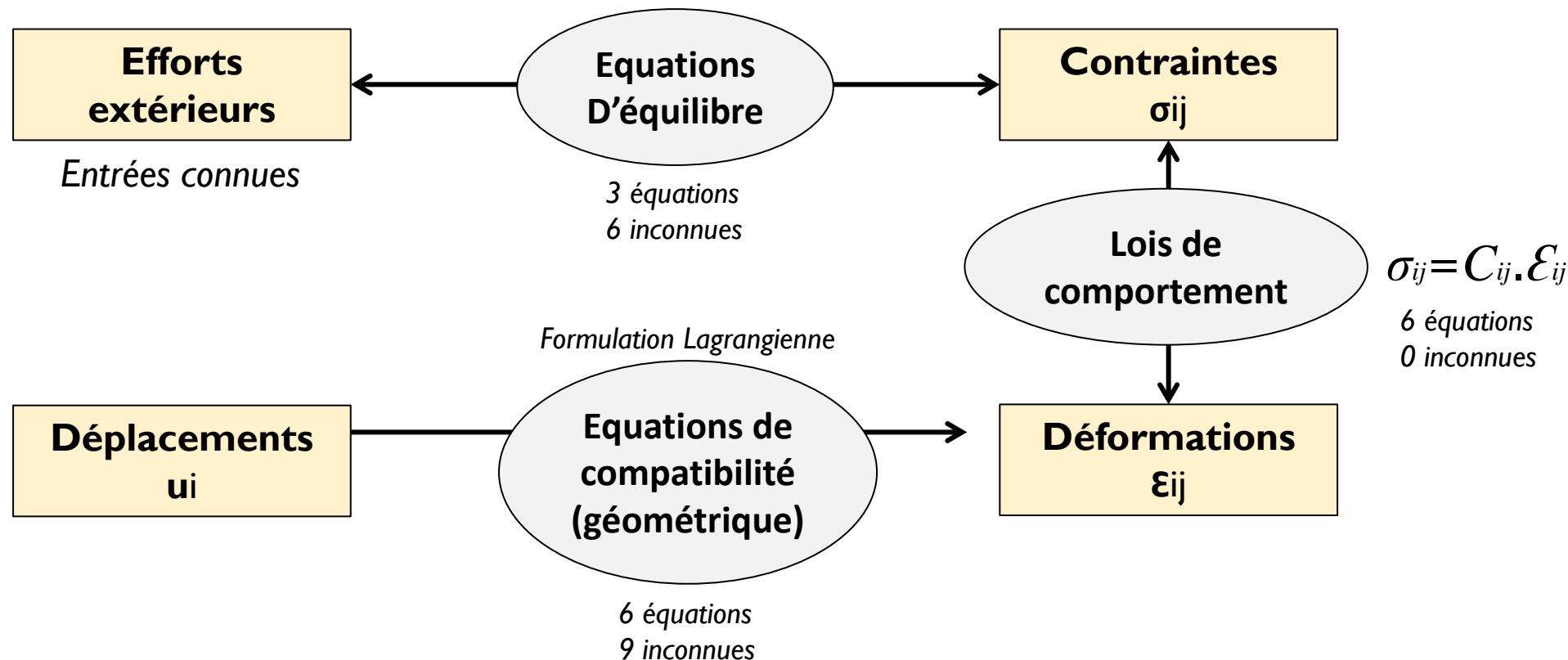
Commentaire:

Problème uniquement en statique. Les équations de la chaleur ne sont pas implémentées. Seul le comportement thermomécanique des matériaux est retenu.

3- Comment résoudre un problème numérique? Projet Gate pour le projet MST CTA

 MATHEMATIQUE

Représentation tensorielle et matricielle, 15 équation à 15 inconnues



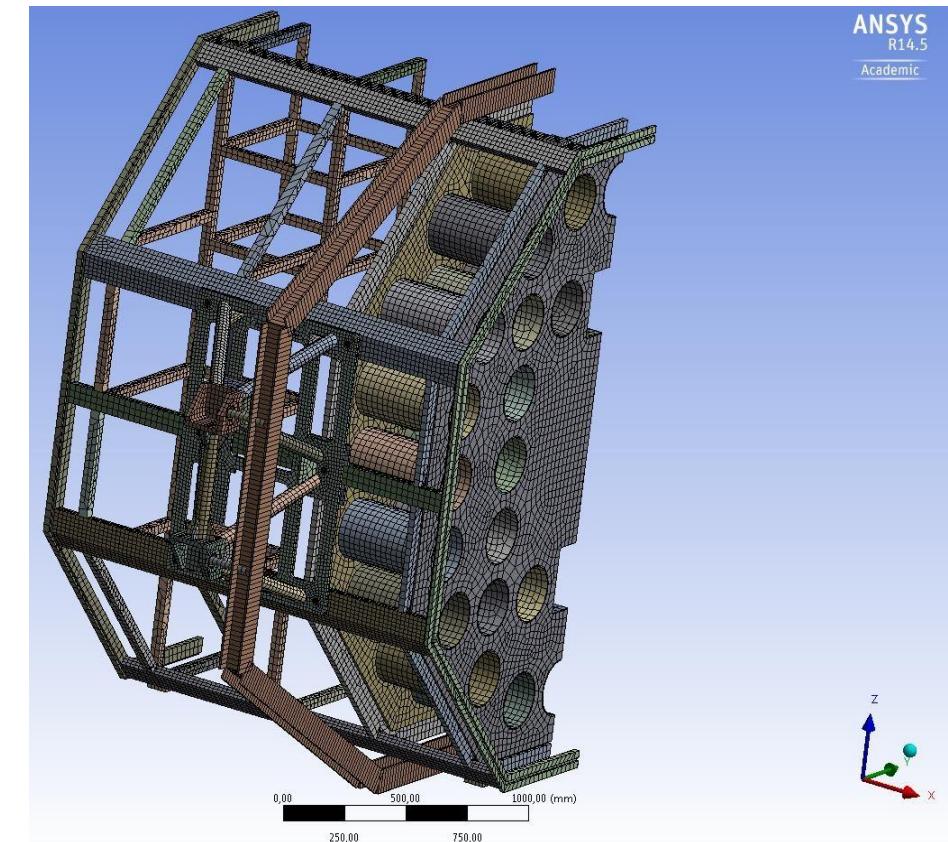
4- Comment résoudre un problème numérique? Projet Gate pour le projet MST CTA

DISCRETISATION

Maillage de la géométrie (espace)

Maillage:

- Maillage suivant la méthode HEX (Hexaédrique). dominant avec contrôle des tailles des mailles
- Tous les composants sont des modèles solides
- Nombre de nœuds : 389680 ; d'éléments : 104657



5- Comment résoudre un problème numérique? Projet Gate pour le projet MST CTA

□ **RESOLUTION**

Méthode des éléments finis et inversion de matrices

- Equations d'équilibre $\sum F = 0$ reformulées pour avoir les efforts nodaux

- Equations des éléments finis dans le cas de l'élasticité linéaire

- La matrice de rigidité est assemblée puis inversée

Avec $K1$ ($\Delta T = 0^\circ C$) et $K2$ ($\Delta T = +50^\circ C$)

- Le logiciel va résoudre toutes les équations

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

Chargement Rigidité Déplacement

 $[K]^{-1}$ $\{U_i\}$ **Ce qui permet ensuite de déterminer:**

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

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

$$\epsilon = \Delta U_i / L$$

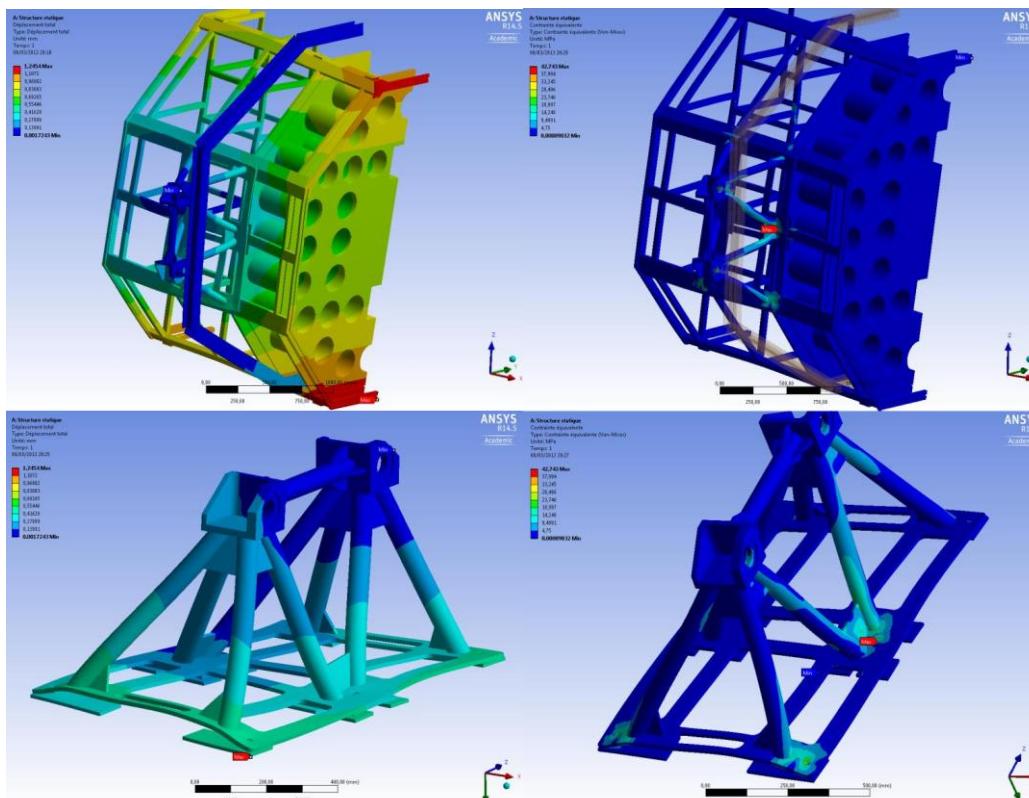
$$\sigma = E \cdot \epsilon \text{ (traction)}$$

6- Comment résoudre un problème numérique? Projet Gate pour le projet MST CTA

ANALYSE

Analyse et interprétation, variations des paramètres d'entrées

Résultats ($\Delta T = 0^\circ\text{C}$)



Déformée $\sim 1,25$ mm

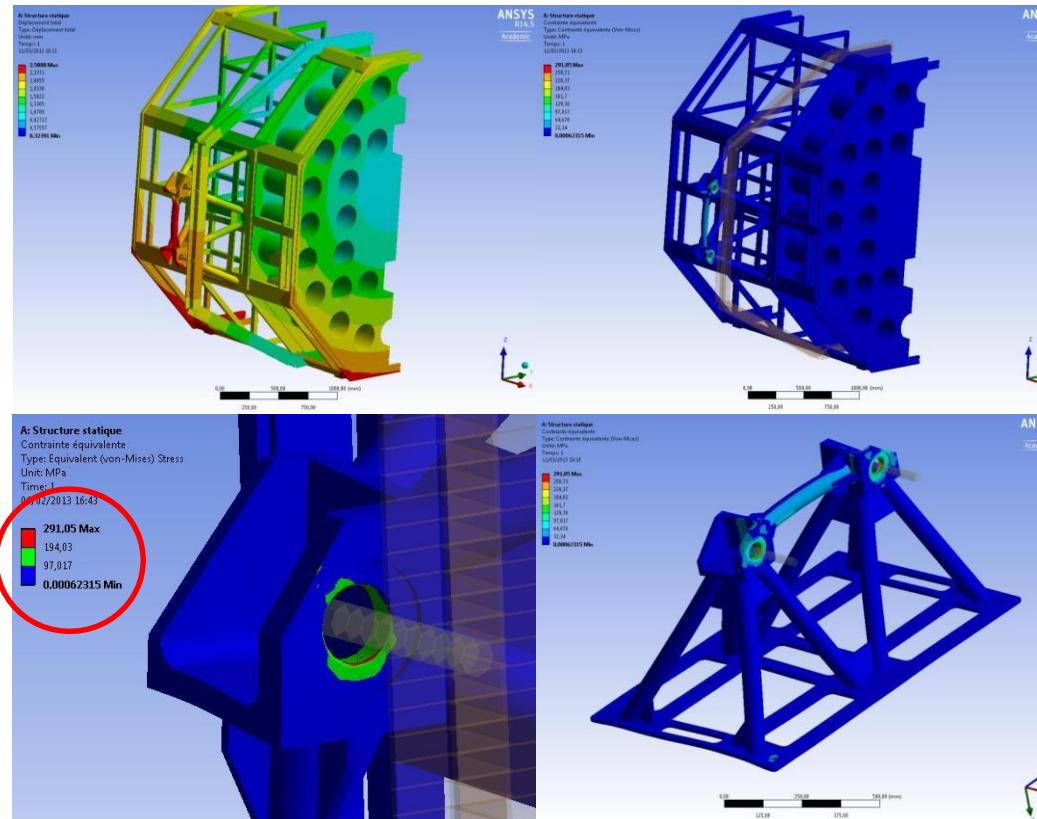
Equivalent Stress
(green)
 $\sigma < 43$ MPa
 $\leq \sigma_e \sim 220$ MPa
(limite d'élasticité)

6- Comment résoudre un problème numérique? Projet Gate pour le projet MST CTA

□ ANALYSE

Analyse et interprétation, variations des paramètres d'entrées

Résultats ($\Delta T = +50^\circ\text{C}$)



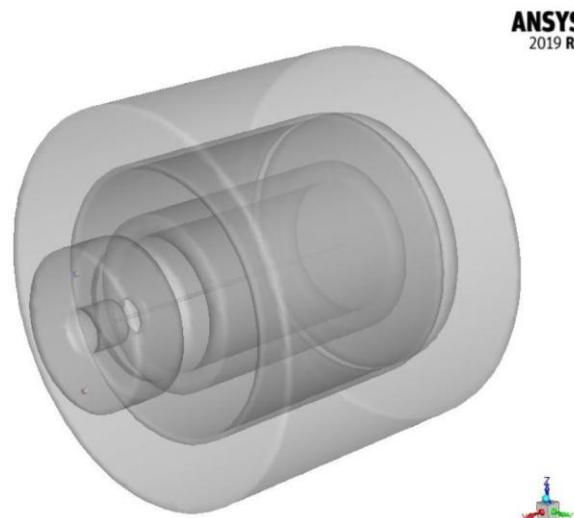
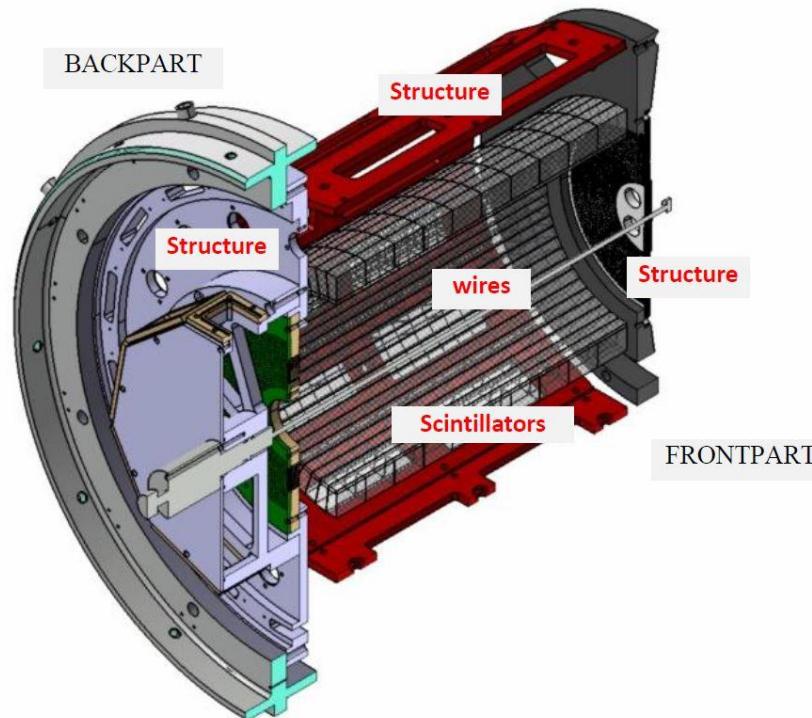
Equivalent Stress
(green)
 $97 < \sigma < 194$ MPa



DANGER !
À modifier !

Simulation numérique, Analyse fluidique

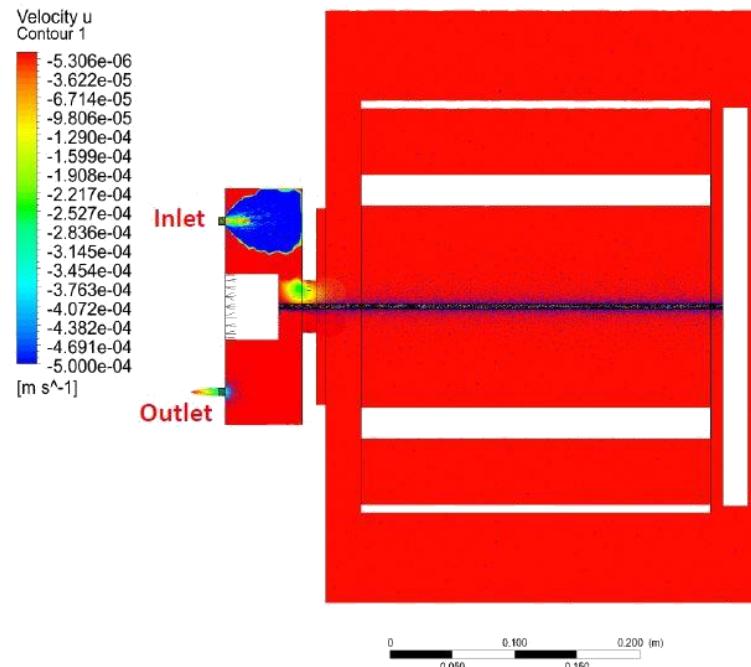
Projet ALERT: DéTECTEUR gazeux (chambre à fils cylindrique) qui sera installé au Jefferson Laboratory (USA)



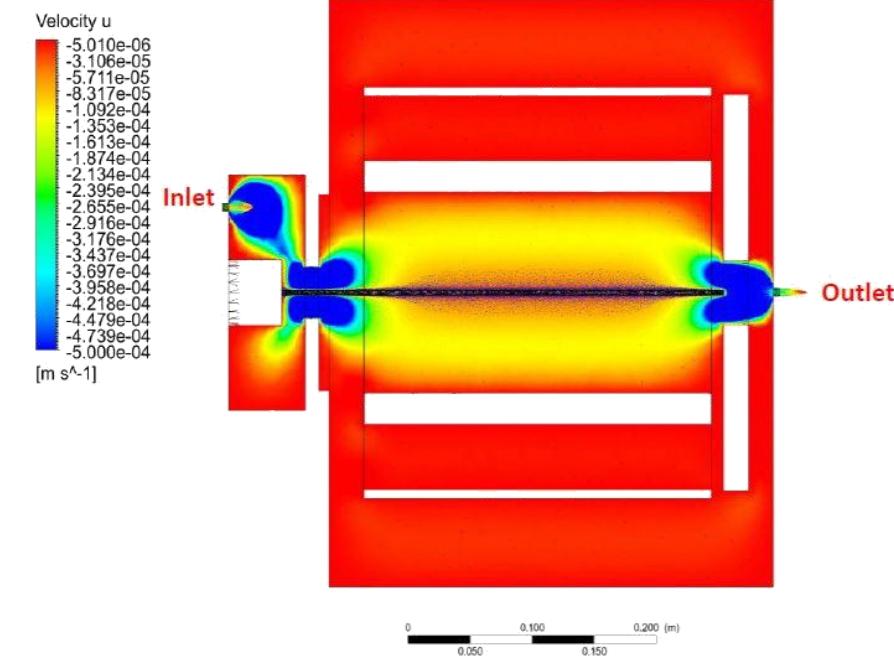
Cut view, location of the wires and the scintillators (without the gas enclosure)

Simulation numérique, Analyse fluidique

Projet ALERT: ANALYSE, Comparaison des vitesses du gaz dans la chambre avec deux positions de sorties différentes
La position de la sortie doit être sur l'avant afin d'assurer le renouvellement du gaz dans la partie active.



Case 1

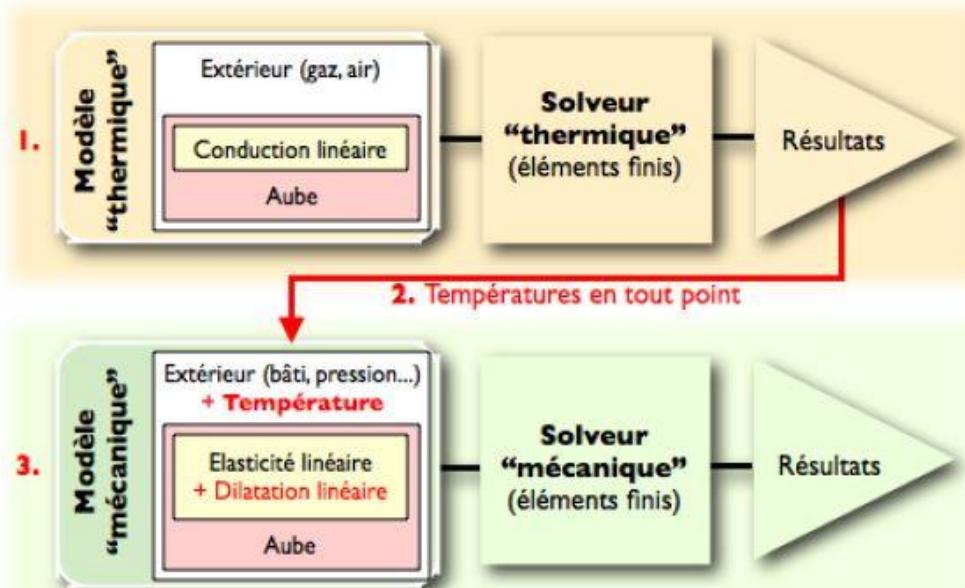


Case 2

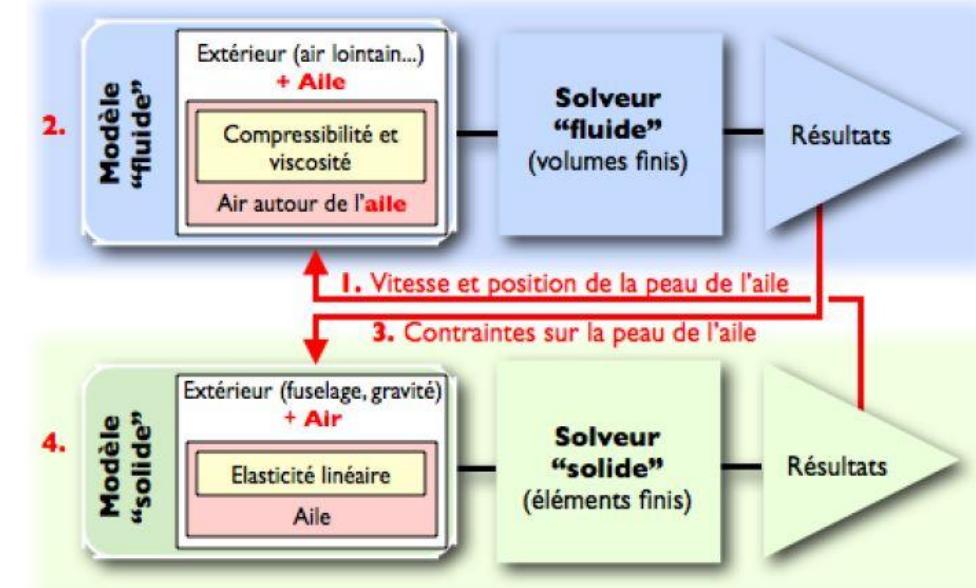
Simulation numérique, les couplages physiques

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

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



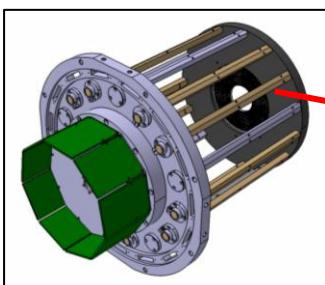
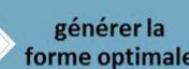
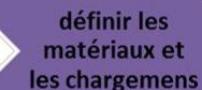
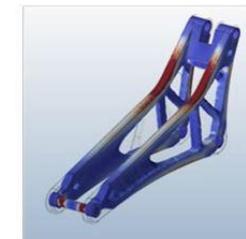
Un des deux modèles ne dépend pas de l'autre
Résolution séquentielle



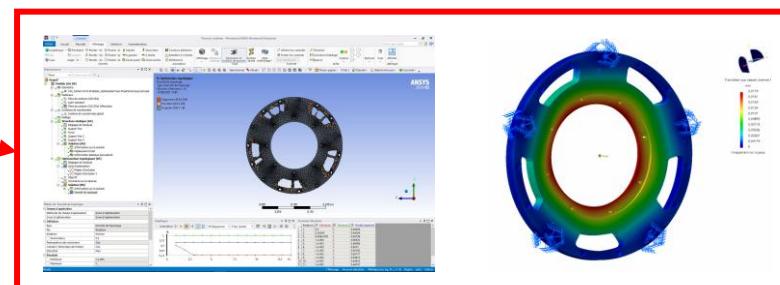
Chacune des deux physiques dépend de l'autre.
Echange des résultats entre les solveurs

Optimisation topologique

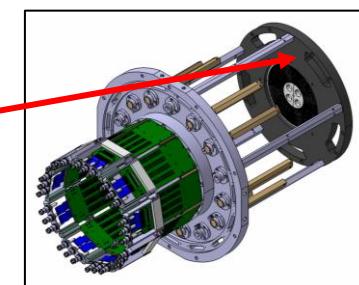
Méthode qui permet de trouver la répartition de matière optimale dans un volume donné soumis à des contraintes.



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



Optimisation topologique sur le logiciel ANSYS



Plaque carbone (évidée)

Facteur de sécurité

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

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

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

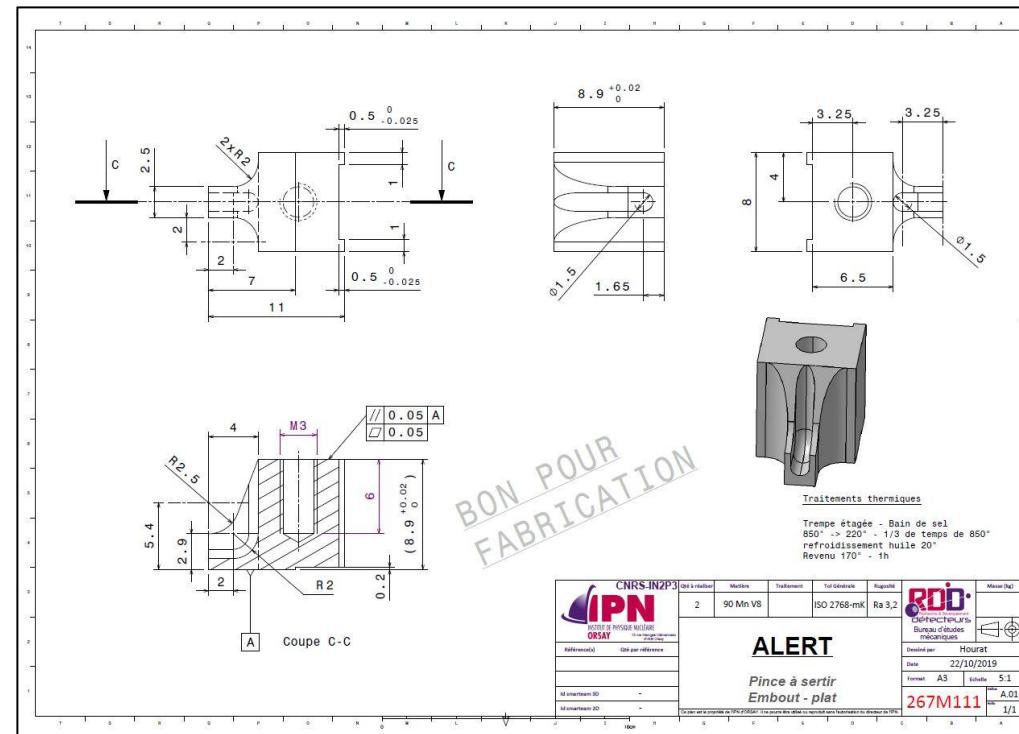
Coefficient de sécurité Cs	Charges exercées sur la structure	Contraintes dans la structure	Comportement du matériau
$1 \leq Cs \leq 2$	régulières et connues	connues	testé et connu
$2 \leq Cs \leq 3$	régulières et assez bien connues	assez bien connues	testé et connu moyennement
$3 \leq Cs \leq 4$	moyennement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

La mise en plan

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

Plan:

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



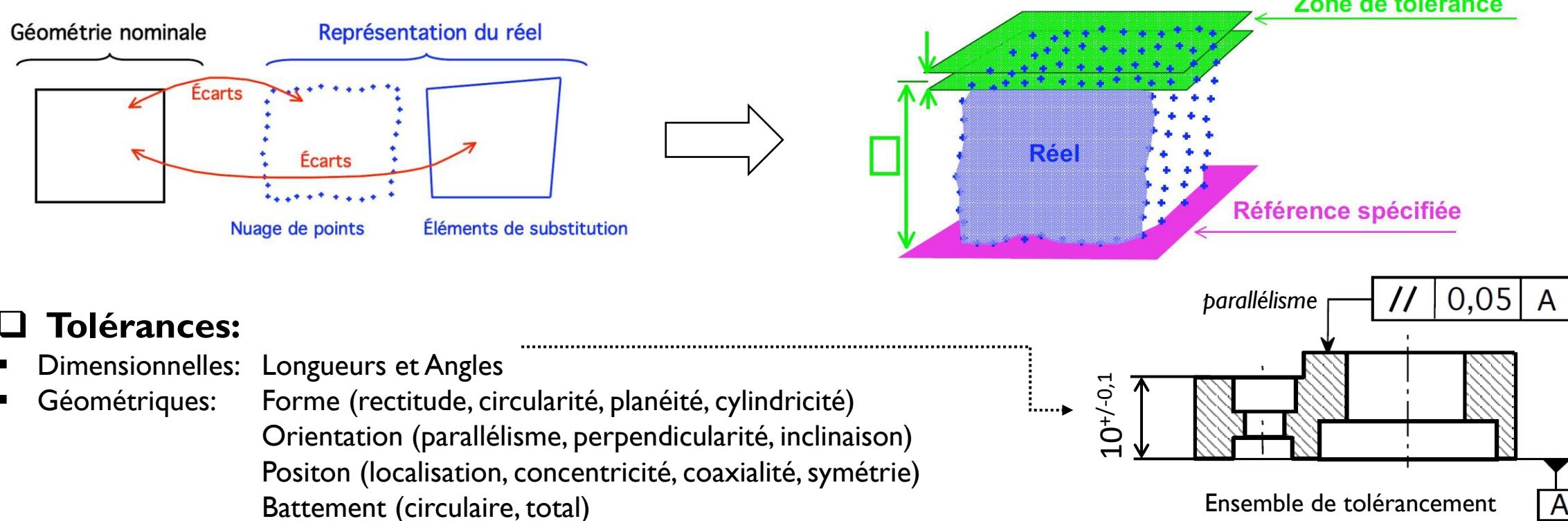
Ensemble de
plan 2D

Tolérancement dimensionnel et géométrique

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

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

□ Représentation visuelle:



□ Tolérances:

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

Ajustement

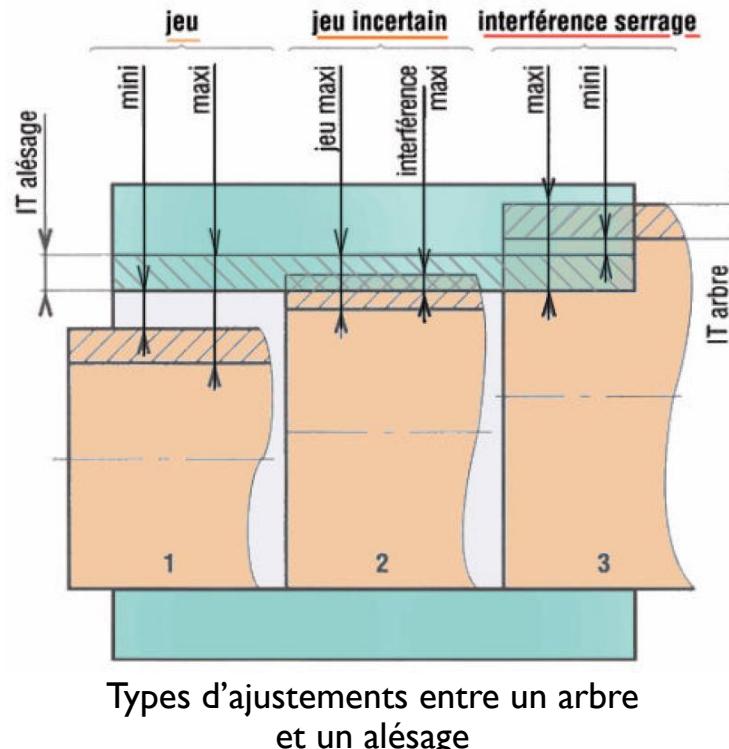
Un ajustement est constitué par l'assemblage de deux pièces de même dimension nominale.

□ Différents types:

- Avec jeu
 - Incertain
 - Avec serrage

□ Exemple:

- **Φ16 H7/g6**
 - **Φ16** diamètre nominal
 - **H7** tolérance sur l'alésage
 - **g6** tolérance sur l'arbre



Principaux ajustements

La fabrication ou réalisation mécanique

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

□ Obtention par enlèvement de matière:

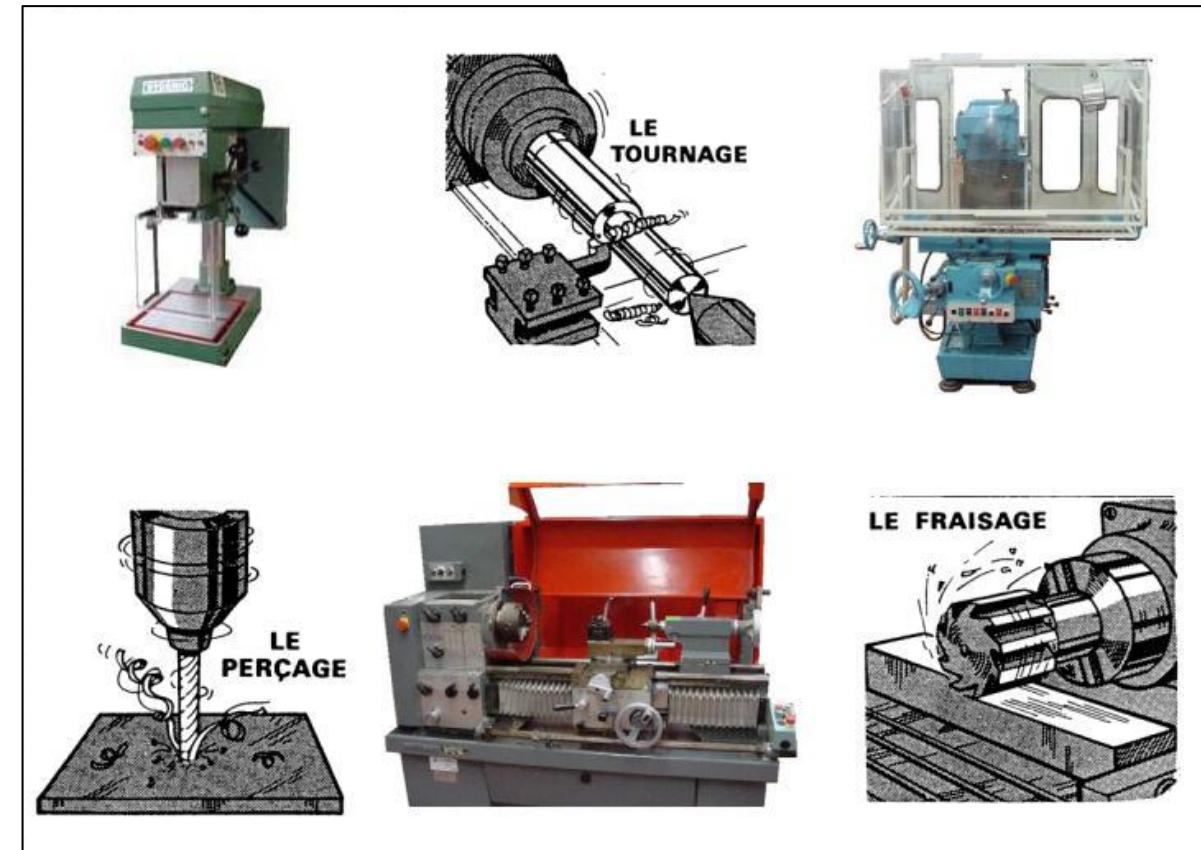
- Perçage, tournage, fraisage
- Rectification (μm)
- Electroérosion
- Découpage (oxycoupage, jet d'eau, laser, plasma)

□ Obtention par déformation:

- Emboutissage
- Forgeage

□ Obtention par fusion:

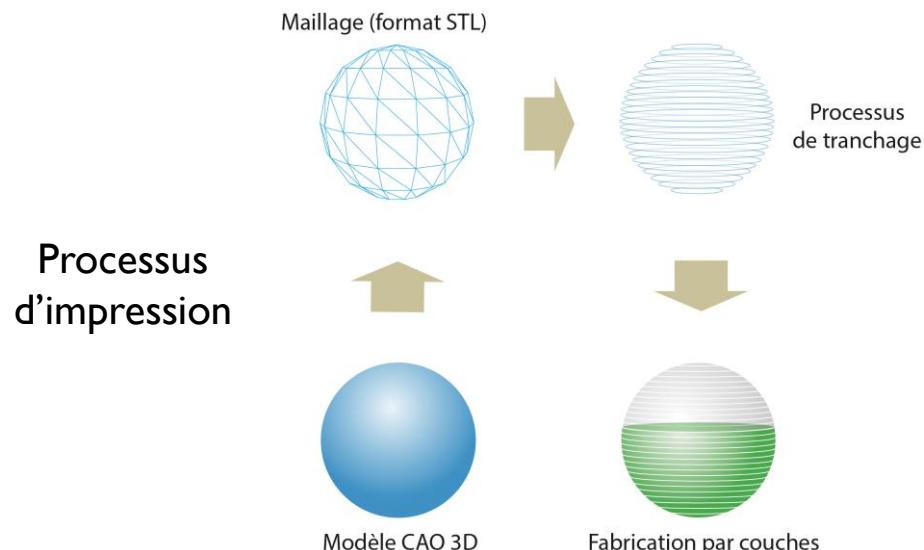
- Frittage (pièce formée par soudure des grains obtenue en chauffant une poudre)
- Moulage



La fabrication additive (impression 3D)

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

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

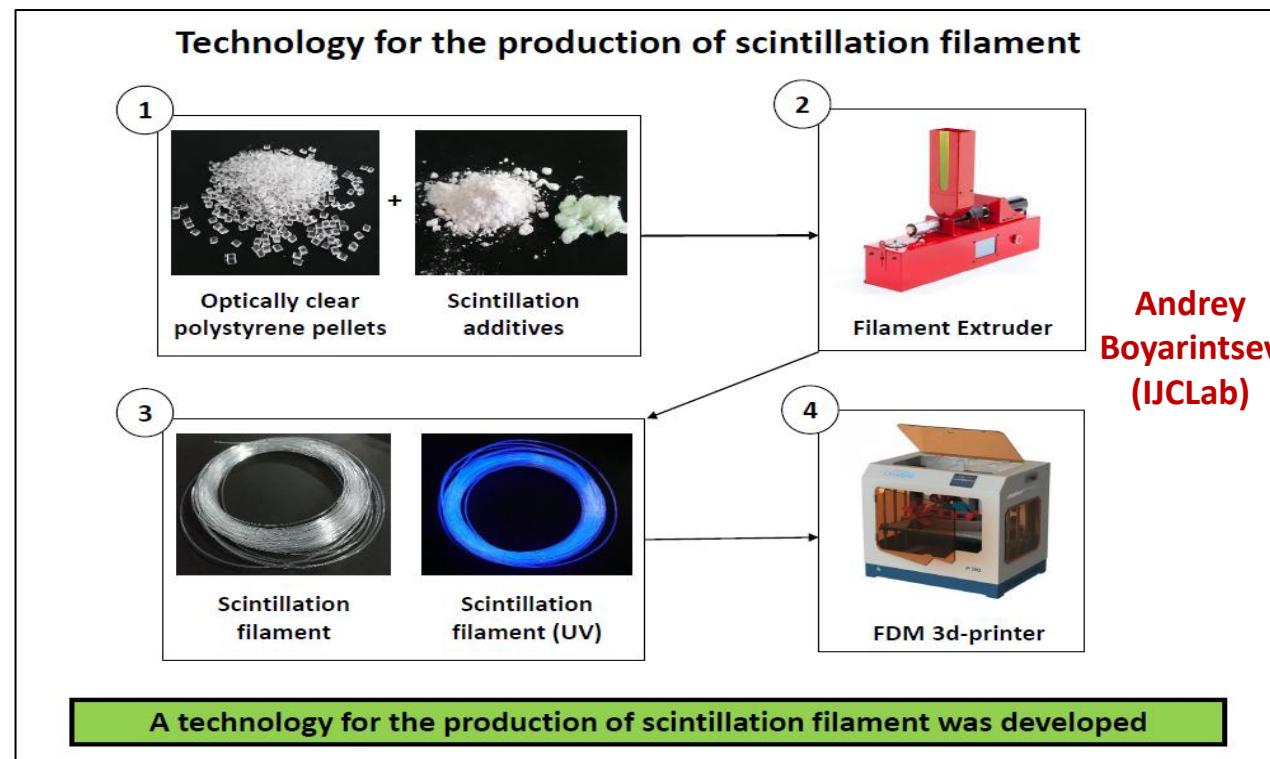


Nom et description succincte du procédé	Matières utilisées *
Extrusion de matière (FDM – Fused Deposition Modeling) Le matériau est distribué de manière sélective par une buse en couches successives. Généralement la buse est dotée d'un système pour chauffer et faire fondre la matière.	Fil plastiques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

© Illustrations : A. Vilocq pour l'INRS

La fabrication additive pour la détection

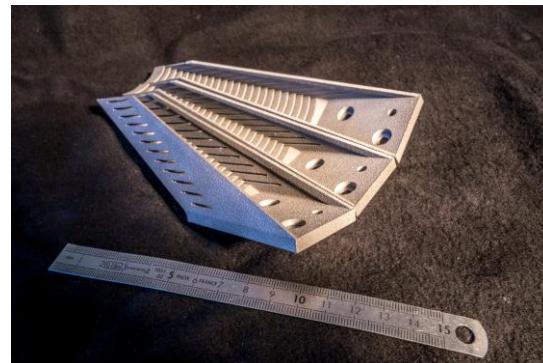
Des études sont actuellement en cours pour l'utilisation de la fabrication additive pour les matériaux scintillants



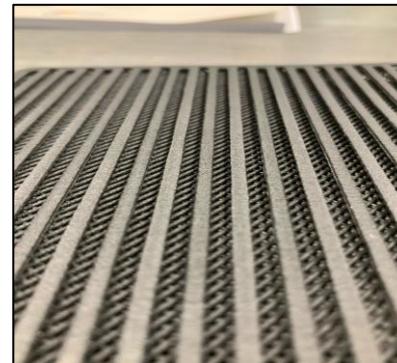
<https://reseauffabricationadditive.wordpress.com/thematiques/scintillateur-par-impression-3d/>

La fabrication additive dans les laboratoires

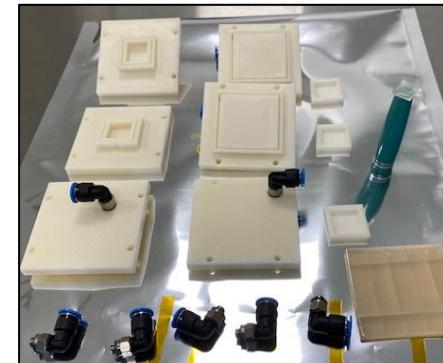
- Technologie éprouvée et massivement utilisée
- La plupart des laboratoires IN2P3 sont équipés en imprimantes 3D plastique
- Permet des conceptions mécaniques jusqu'alors inenvisageables
- Le coût pour la fabrication additive métal reste cependant très onéreux, lourd en infrastructure et nécessite de la formation
- Très utilisé pour le prototypage
- Attention cependant à ne pas délaisser les méthodes de fabrication traditionnelle (état de surface, précision)



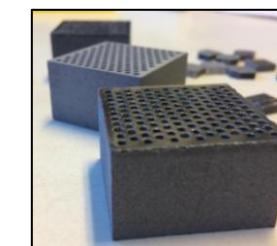
Prototype pour ALERT -
Aluminium



Cathode pour Dune –
Peek/Carbone



ATLAS-ITk (pixels)
Pièces ABS



THIDOS (application médicale) W et ABS



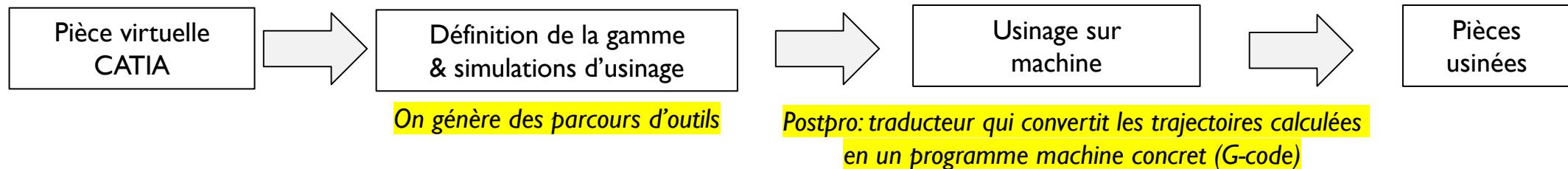
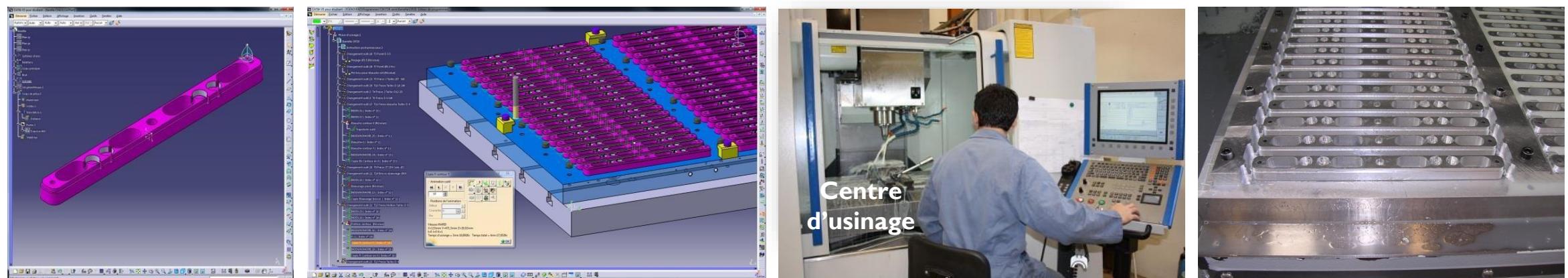
Réseau Fabrication Additive:
<https://reseaufabricationadditive.wordpress.com/>



La Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO)

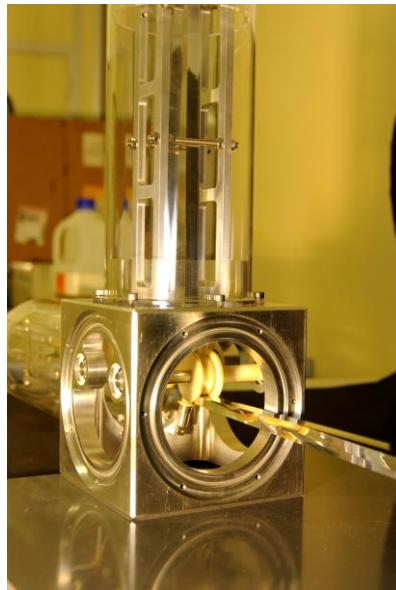
La Fabrication Assistée par Ordinateur est un ensemble d'outils informatiques permettant de coder le processus de fabrication. Elle est utilisée pour créer des instructions précises à destination des machines-outils à commandes numériques afin d'optimiser la fabrication de pièces. Le fichier créé va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

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



La Fabrication mécanique dans les laboratoires

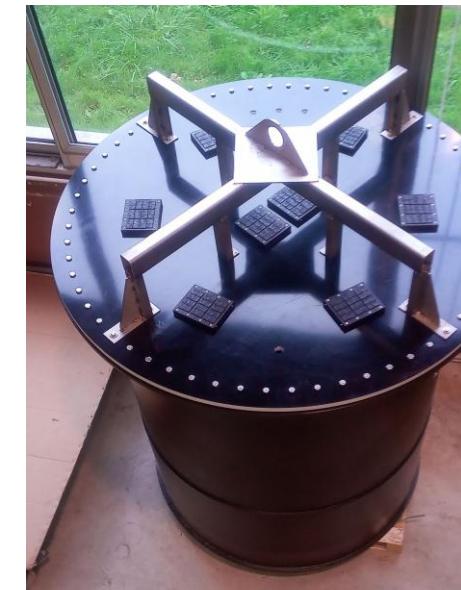
Quelques exemples de réalisation



Usinage cube aluminium



Ensemble dérouleur de bande



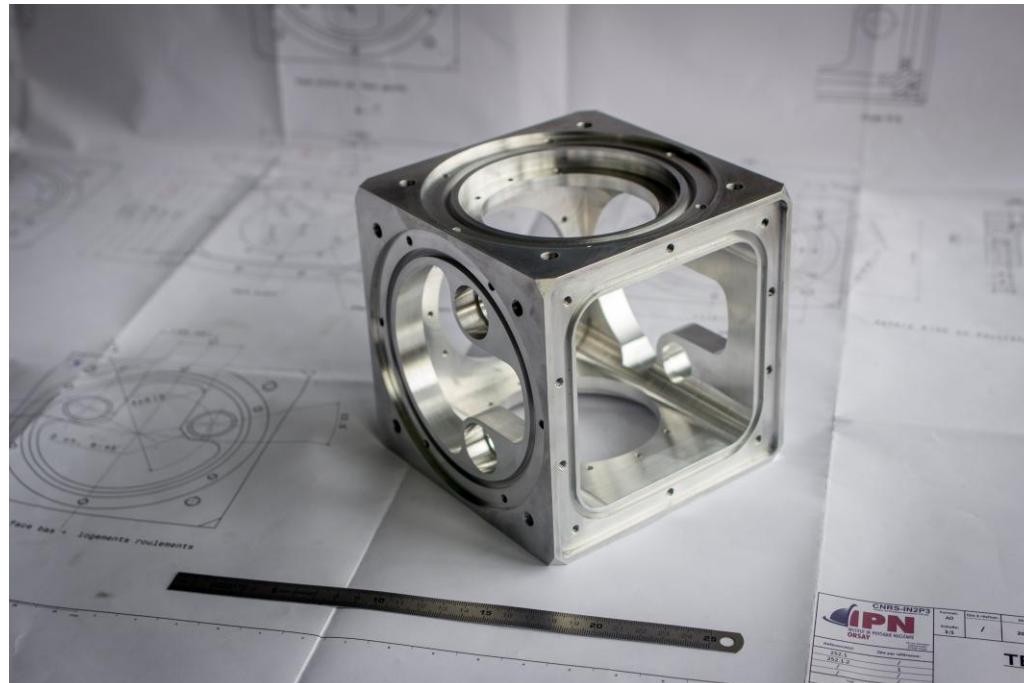
Enceinte plastique



Plaque de refroidissement cuivre

La Fabrication mécanique dans les laboratoires

Quelques exemples de réalisation



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

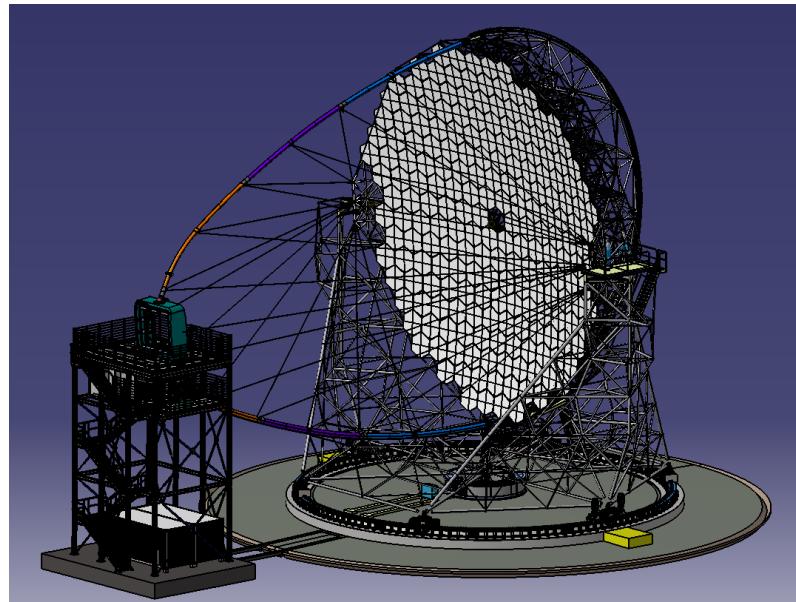


Châssis en aluminium soudé pour le chargeur de filtre de
LSST(LPSC)

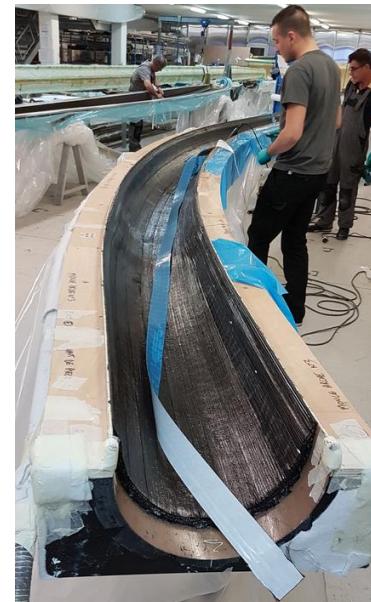
Exemple de fabrication dans l'industrie (LORIMA, Lorient)

Pièces dépassant les capacités techniques des laboratoires

Nécessite un travail de suivi de fabrication



Structure support caméra de CTA



Drapage des plis de
carbone



Montage à blanc de l'arche

La métrologie (en lien avec le tolérancement)

□ Définition:

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

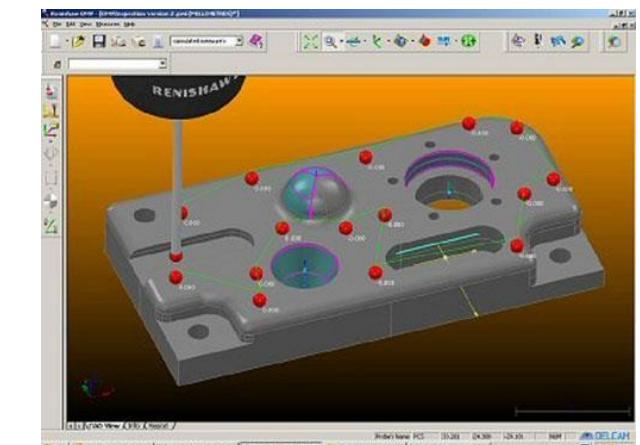
La mesure correspond à l'évaluation d'une grandeur par rapport à une référence (étau) ainsi que la détermination de l'incertitude liée à cette mesure

□ Métrologie dimensionnelle et géométrique:

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

□ Choix de l'instrument de mesure:

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



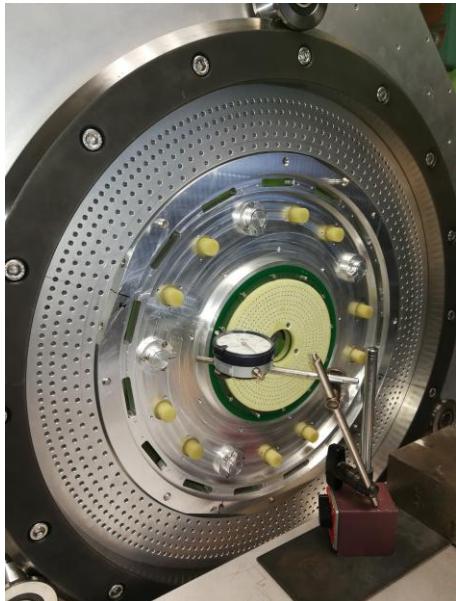
Points de mesure sur une pièce

- ## □ Exemple:
- Longueur de 10mm ($\pm 0,1$ en tolérance), on mesure une côte de 10,07mm à l'instrument (pièce bonne)

La mesure d'ensemble de détection

La mesure se réalise sur des éléments mécaniques assemblés.

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



Mesure coaxialité (diamètre)
structure détecteur gazeux ALERT



Mesure de la géométrie
(longueur) des cristaux CMS



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

Exemple de contrôle de pièces sur le projet Xenon

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



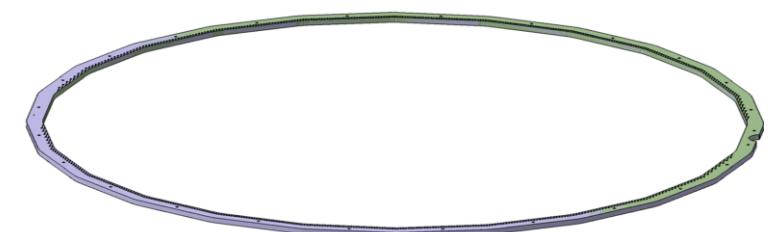
Electrode usinée



Bras de mesure



Mesure bras Romer

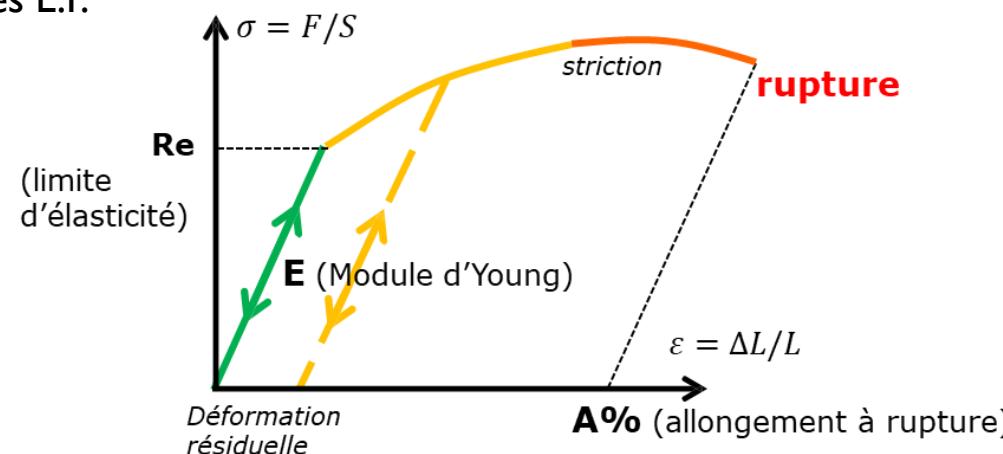
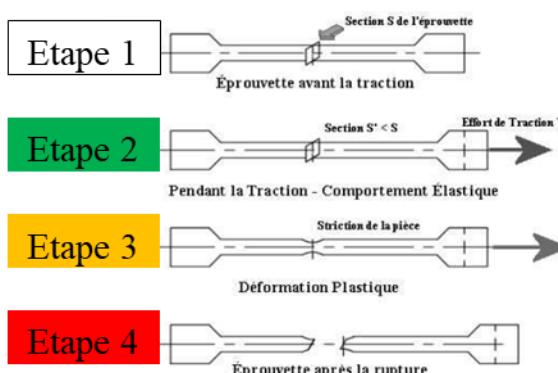


Export fichier CAO

Les essais mécaniques

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

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



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

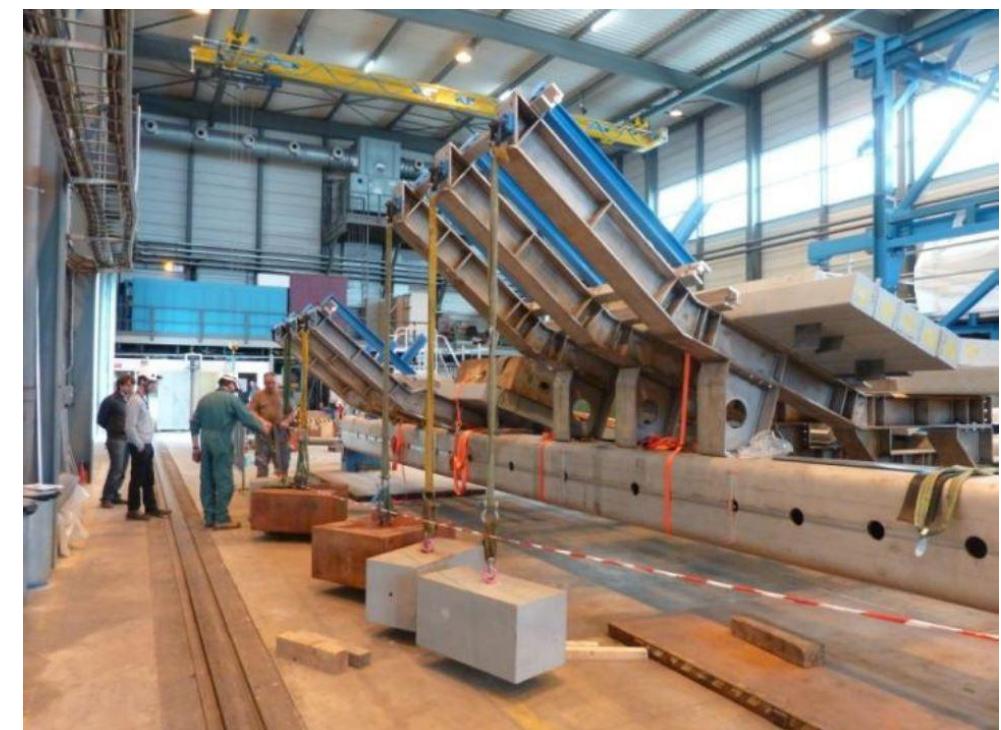
- **AVAL:** Validation ou qualification du comportement d'un modèle de test sous certaines sollicitations (statiques, thermiques, vibrations, fatigues). Essais de qualification en dynamique, thermomécanique et en vibration

Essai de qualification sous charge

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



Rails calorimètre ALICE



Structure porteuse calorimètre ALICE

Résistance des matériaux / Moment quadratique (m^4)

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

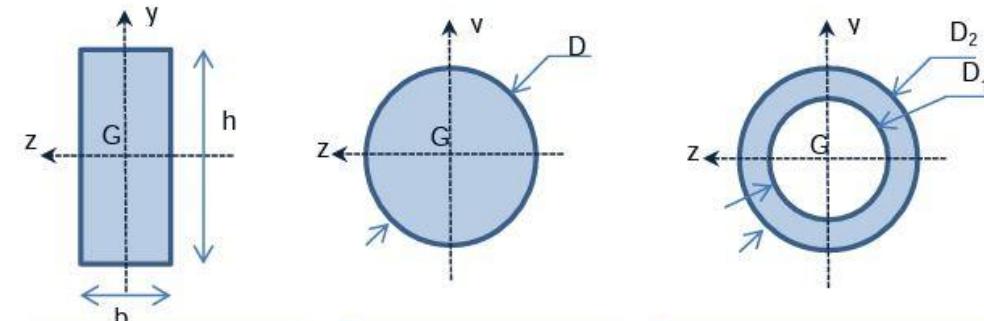
Le moment quadratique est une mesure de la répartition de la matière de la poutre autour de son axe de flexion
Plus cette matière est éloignée de l'axe de flexion, plus le moment quadratique est grand.

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

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

$$I = \int_A y^2 dA$$

Nécessité de mesurer la répartition de la matière autour d'un axe pour prédire la résistance à la flexion



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

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

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

□ Définition et analyse du besoin

- L'Analyse du besoin est essentielle à la réussite du projet.
- Proposal physique, mise en place des collaborations, cahier des charges, TDR, AMDEC, gestion de projet et démarche qualité.

□ Conception mécanique

- La conception mécanique de forme consiste à trouver des solutions techniques répondant aux contraintes.
- Conception Assistée par Ordinateur (CAO,) choix des matériaux et technologies à mettre en œuvre.

□ Dimensionnement et simulation numérique

- Le dimensionnement et la simulation numérique analysent les comportements mécaniques, thermiques et fluidiques.
- Notes de calculs, éléments finis, codes de calculs.

□ Fabrication mécanique

- Etape constante à concrétiser matériellement la phase de conception.
- Mise en plan, Fabrication par enlèvement de matière et fabrication additive, CFAO

□ Métrologie

Mesure et vérification de pièces ou d'ensemble de détection (pied à coulisse, micromètre, comparateur, machine tridim)

□ Essais mécaniques, qualification et validation

Essai amont pour acquérir des données matériau, essai aval pour qualifier et valider des ensemble de détection ou des pièces.