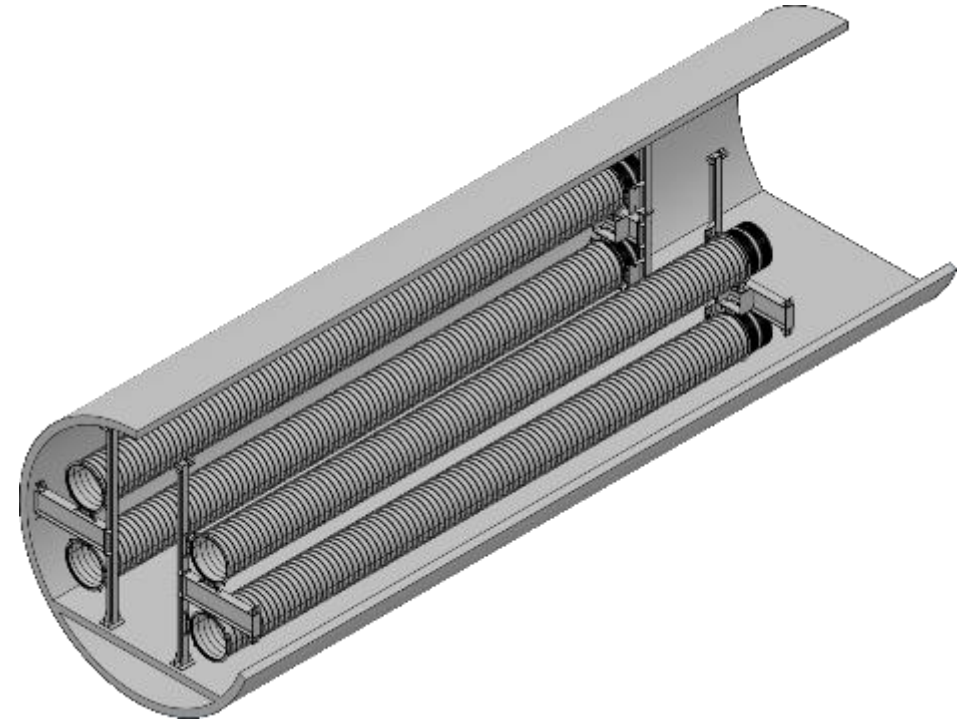


# TUBE À VIDE POUR EINSTEIN TELESCOPE

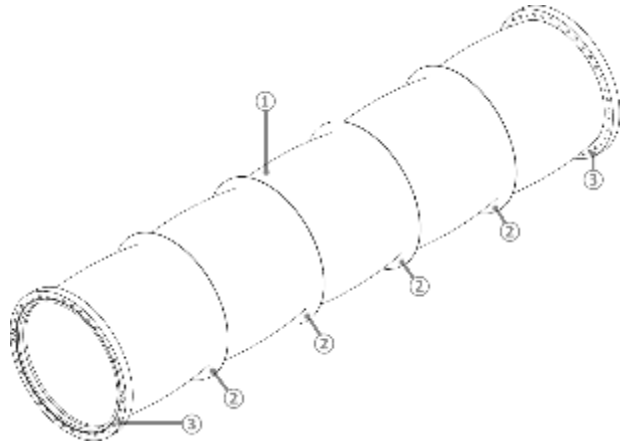
ALEXANDRE LACROIX (CNRS LAPP)  
RÉUNION ET FRANCE 2025

07/10/2025

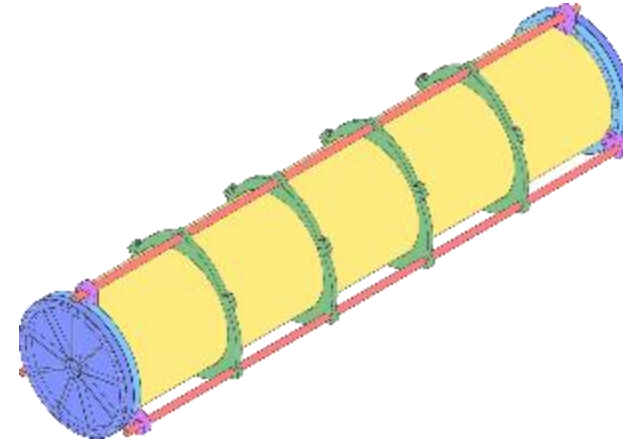
- **01 - TRAVAUX EN COURS LAPP**
- **02 - SECTEUR PILOTE CERN**
- **03 - RÉSUMÉ DU WORKSHOP CE/ET III**



## 01 - GÉOMÉTRIE BOMBÉE RAIDIE



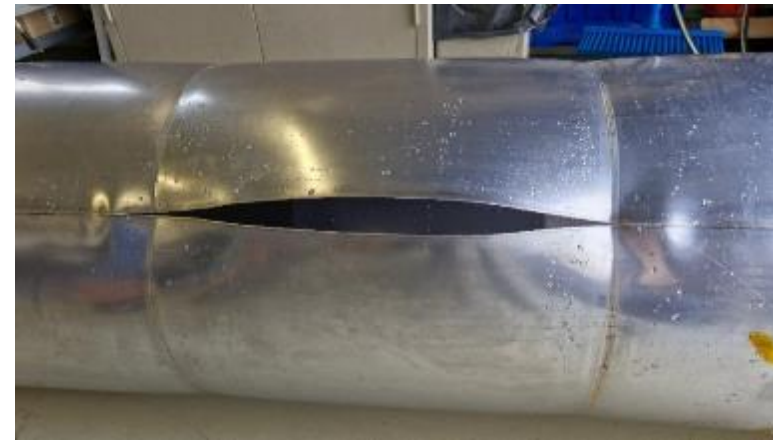
## 02 - EXOSQUELETTE DE FABRICATION



## 03 - PROTOTYPE HYDROFORMÉ



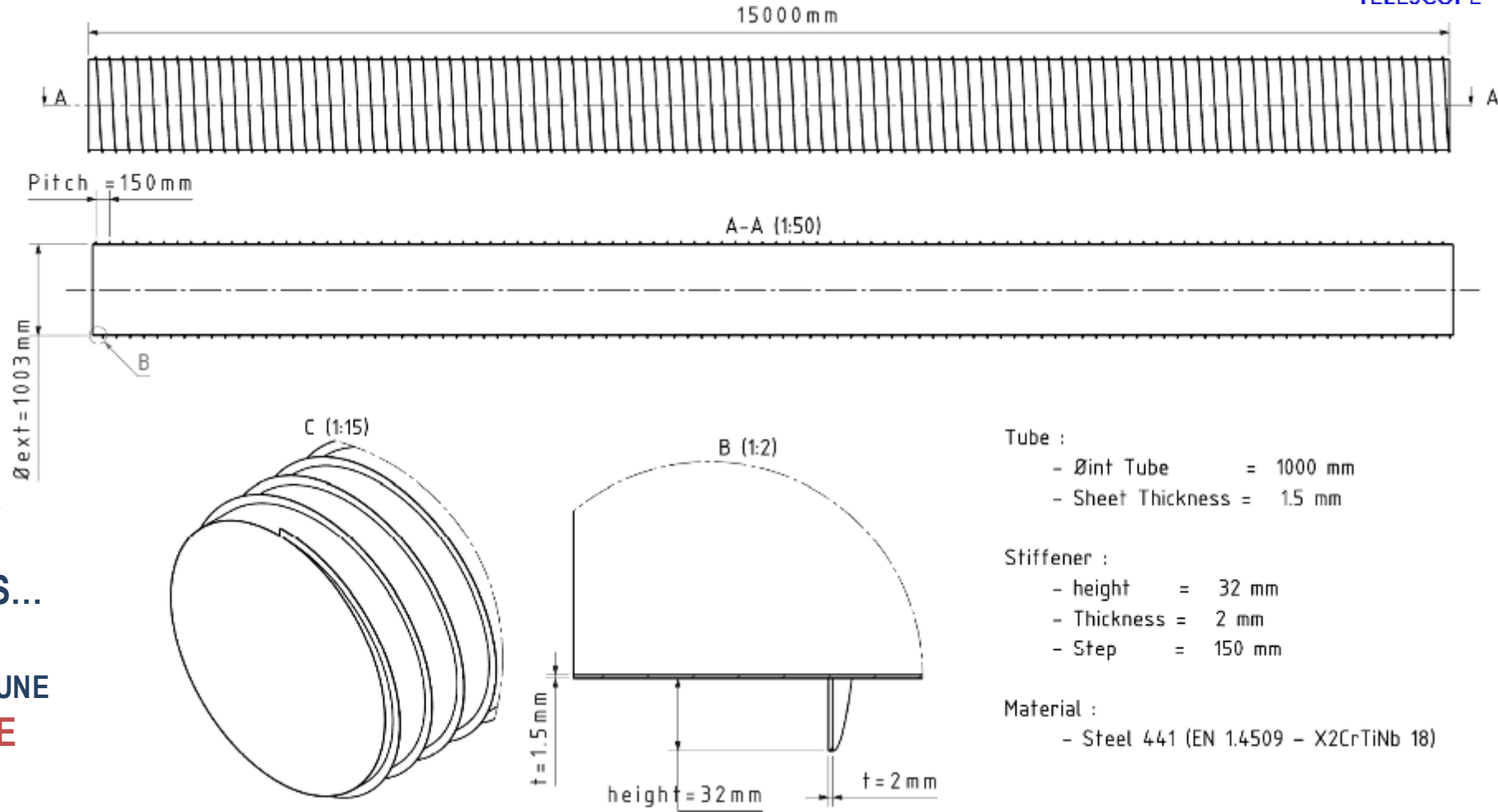
## 04 - ÉCHEC : ÉCLATEMENT DE LA SOUDURE



**Remise en  
Cause**

**Fabrication  
Complexe**

- **LONGUEUR :**
  - 15 m,
  - $\Phi_{\text{int}}$  : 1 m,
  - Epaisseur: 1.5 mm
- **RAIDISSEUR SPIRAL :**
  - 2 mm d'épaisseur,
  - pas de 150 mm
- **MASSE TOTALE : < 750 kg**  
**LÉGÈRETÉ → RÉDUCTION D'ACIER**
- **GÉOMÉTRIE PLUS COMPLEXE, MAIS...**
- **LES 120 KM DE TUBE ENTRAINENT UNE PRODUCTION EN MOYENNE SERIE**
- **DONT ON PEUT EXPLOITER L'AUTOMATISATION & LA ROBOTISATION POUR MAITRISER LES COÛTS DE PRODUCTION**



## ENTREPRISE IMCAR



## PCVS



- Entreprise de chaudronnerie
- Création de cuves de gros volumes (application vide)
- Visite avec le CERN : moyens de production compatibles avec les besoins





## PROTOTYPE EN COURS DE FABRICATION

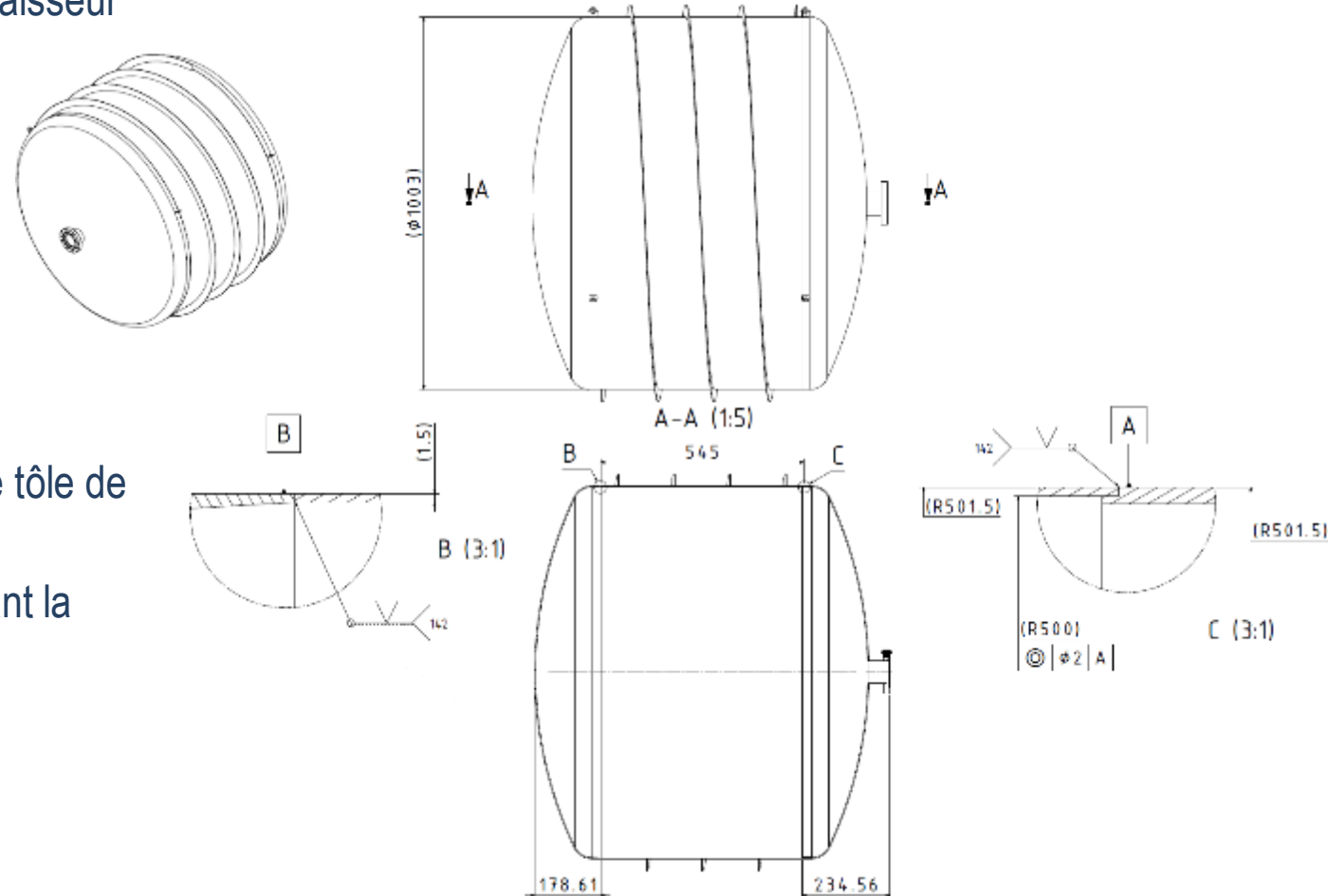
- **Dimensions:** longueur : 0.5 m, Ø1 m interne, 1.5 mm épaisseur
- **Raidisseur Spiral** : 2 mm, 150 mm pas
- **Extrémité** : Fonds bombés + port de pompage
- **Matériau:** Acier Inoxydable 441

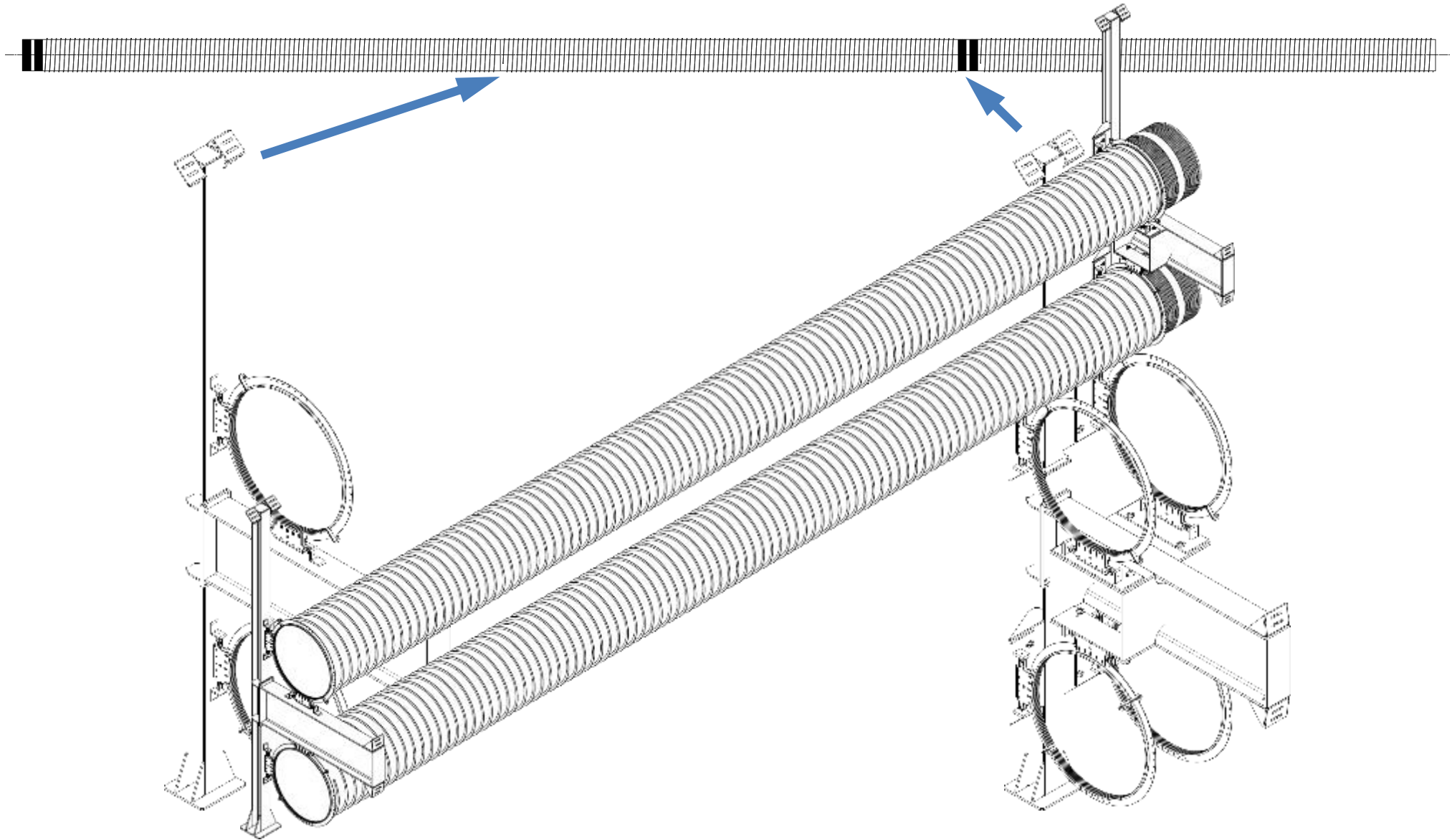
### Objectifs:

- Valider l'étanchéité jusqu'à  $10^{-8}$  mbar
- Tester la faisabilité du roulage/soudage sur une fine tôle de 1.5 mm avec raidisseur & fonds bombés
- S'assurer d'aucune distortion, fissures, ou fuite durant la fabrication

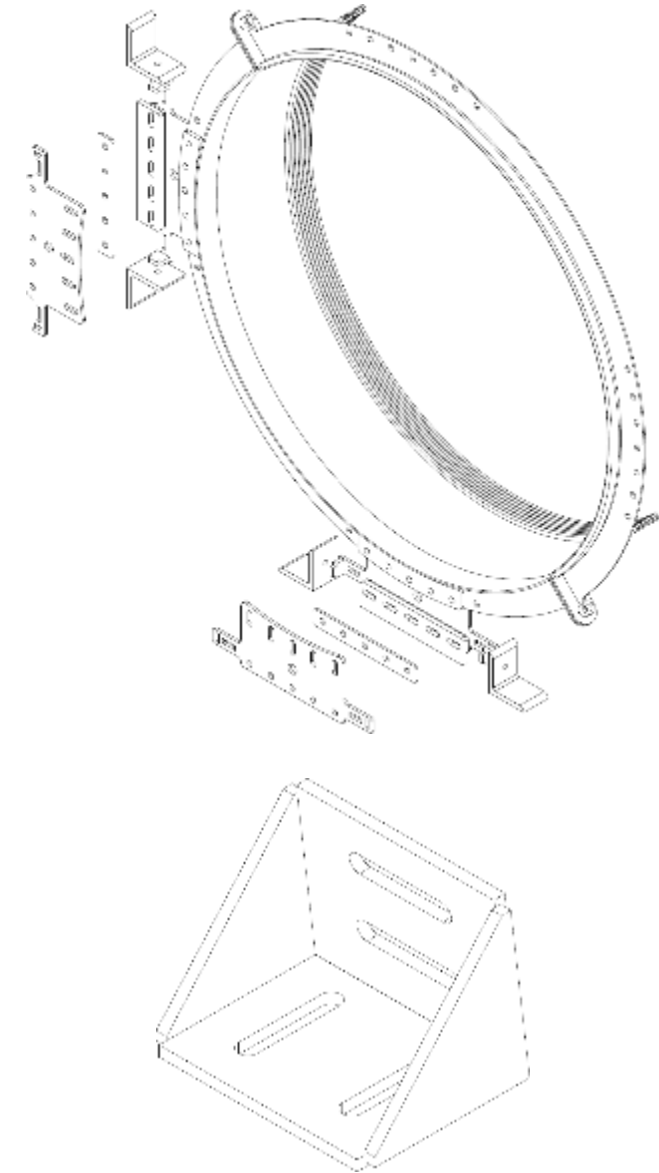
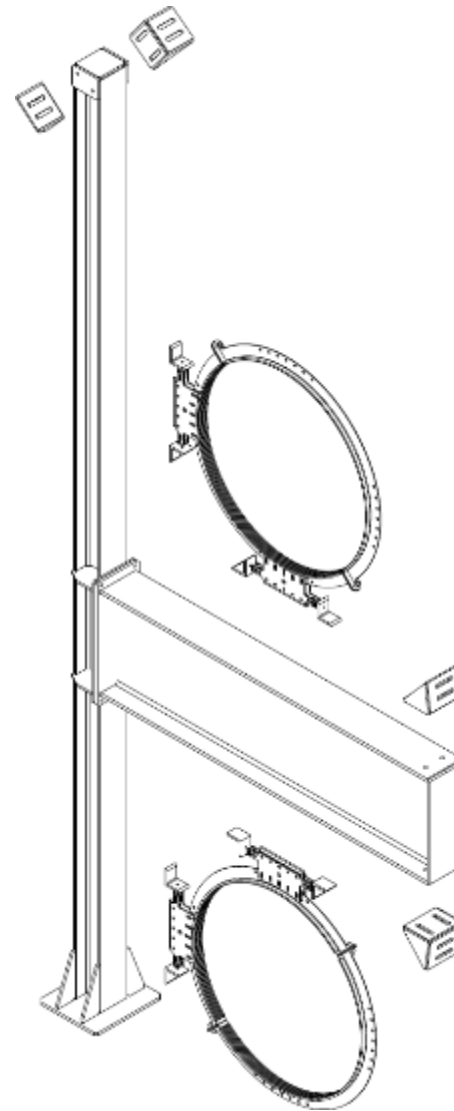
### Status:

- Tôles délivrées, Cahier de soudage rédigé
- Fabrication en cours durant cette réunion



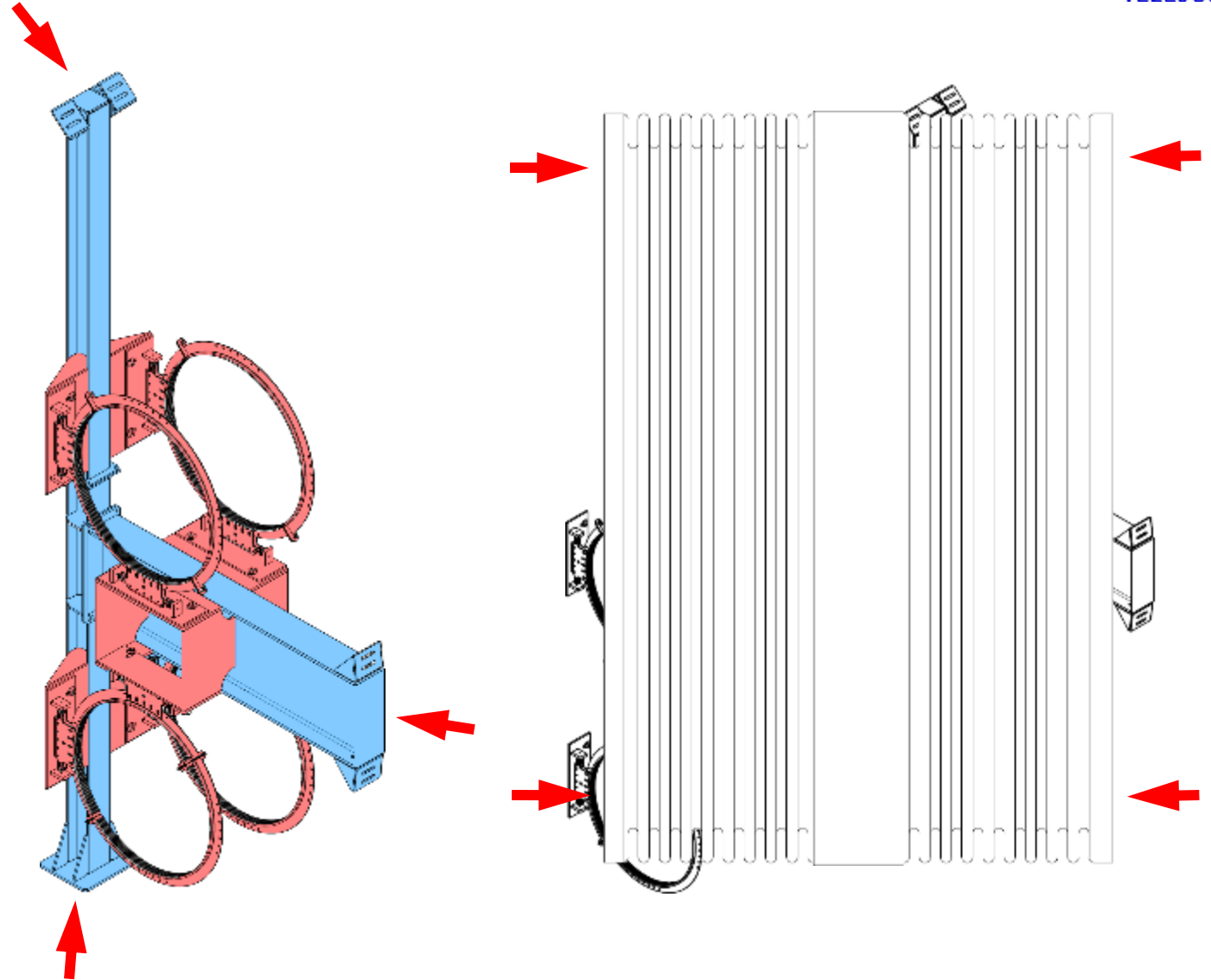


- **POUTRE H: VERTICAL + HORIZONTAL → SUPPORTENT 2 TUBES (DESSUS/DESSOUS)**
- **ANNEAUX DE SERRAGE DU TUBE, AVEC MÂCHOIRES AJUSTABLES → ASSURE L'ALIGNEMENT & TOLÉRANCES**
- **ISOLATION ÉLECTRIQUE DURANT BAKEOUT (SUPPORTE 200 °C)**
- **ANCRÉ DANS LE SOL (PLAQUE D'ANCRAGE) ET DANS LES MURS DU TUNNEL (CONNEXION GLISSANTE) → COMPENSE LES IRRÉGULARITÉS DU TUNNEL**

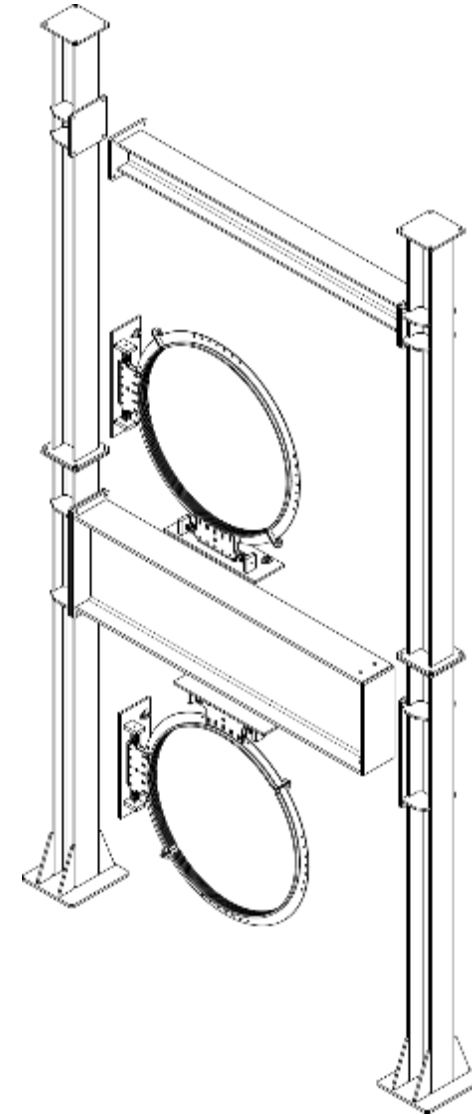




- SUPPORT GLISSANT PERMETTANT L'EXPANSION DU TUBE (~20 MM DURANT BAKEOUT)
- AIDE LES SOUFFLETS À SE COMPRIMER DURANT LA DILATATION THERMIQUE DES TUBES
- DESIGN INDÉPENDANT DES SOUFFLETS → ÉVITE LES COUPLES EXCESSIFS (DÉFLECTION PP + TORSION DU RAIDISSEUR SPIRAL)
- PLAQUE D'AMORTISSEMENT OPTIONNEL → RÉDUIT LES VIBRATIONS & LES DÉPLACEMENTS DU TUBE

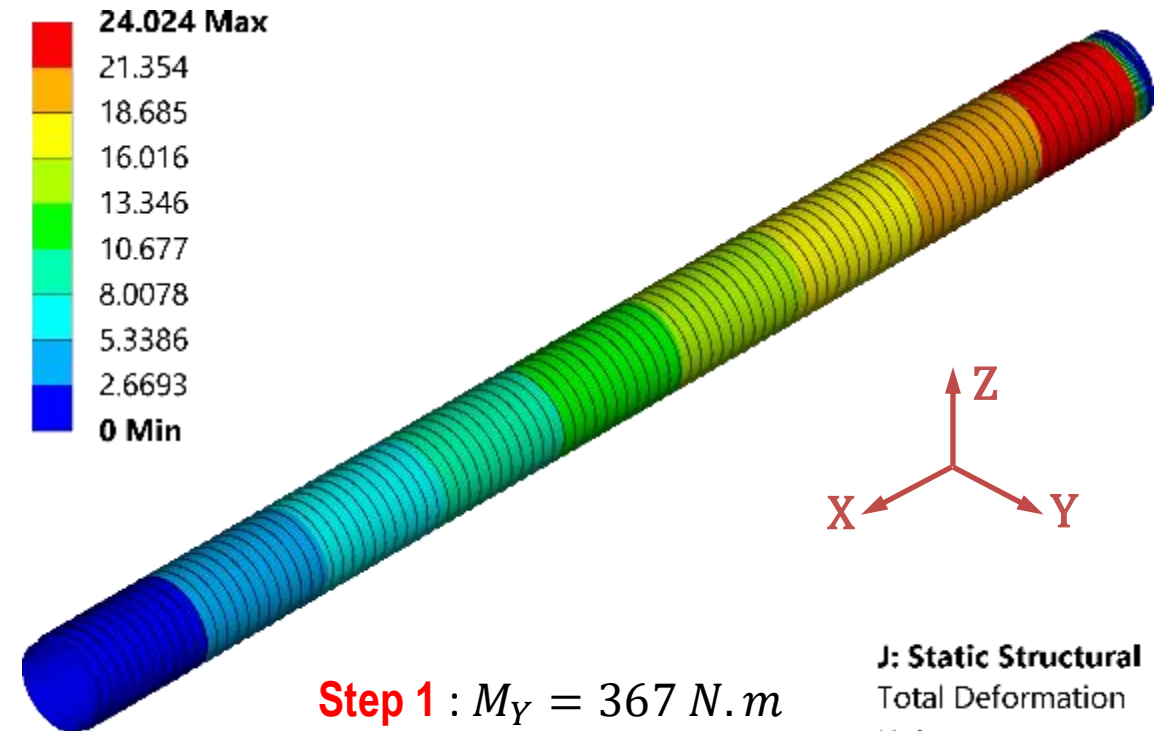


- **DESIGN MODULABLE** : LES COMPOSANT PEUVENT ÊTRE RÉUTILISÉ DANS UNE NOUVELLE CONFIGURATION (*“COMME DES BRIQUES DE LEGO”*)
- **MÉTHODE CAO DE SQUELETTE** → CHANGEMENT DIMENSIONNEL FACILITÉ, MISE A JOUR AUTOMATIQUE DE L'ASSEMBLAGE
- PERMET L'ADAPTATION AU FUTUR SECTEUR PILOTE DU CERN (2026)



## MODÈLE DE DILATATION THERMIQUE

- TUBE AVEC SOUFFLET (UNE EXTRÉMITÉ) + CHARGE RÉPARTIE DE 80 KG (ISOLATION THERMIQUE)
- CONDITIONS DE SYMÉTRIE AUX DEUX EXTRÉMITÉS + ANNEAUX BLOQUANT L'EXPANSION RADIALE
- ÉTAPES DE CHARGE SÉQUENTIELLES : GRAVITÉ → +150 °C → VIDE (-1 BAR)
- RÉSULTATS :
  - ALLONGEMENT DU TUBE ET COMPRESSION DU SOUFFLET
  - COUPLE SUR LE SOUFFLET (POIDS + THERMIQUE + SPIRALE DE RENFORT)
- 🖱️ A CONDUIT À UNE MODIFICATION DE LA CONCEPTION : SUPPORT AVEC SYSTÈME COULISSANT



**Step 1 :**  $M_Y = 367 \text{ N.m}$

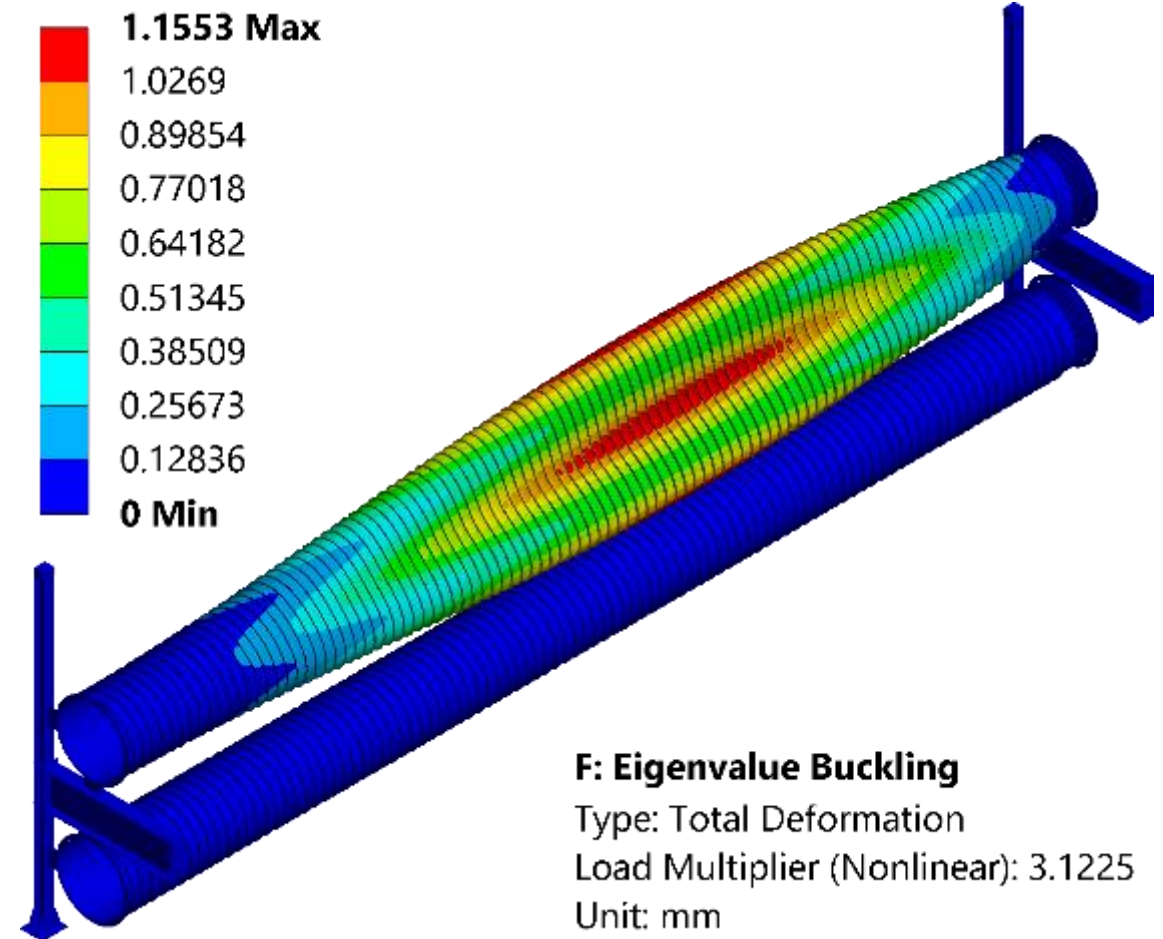
**Step 2 :**  $M_Y = 347 \text{ N.m}$

**Step 3 :**  $M_X = 413 \text{ N.m}$   
 $M_Y = 259 \text{ N.m}$

**J: Static Structural**  
Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 3 s

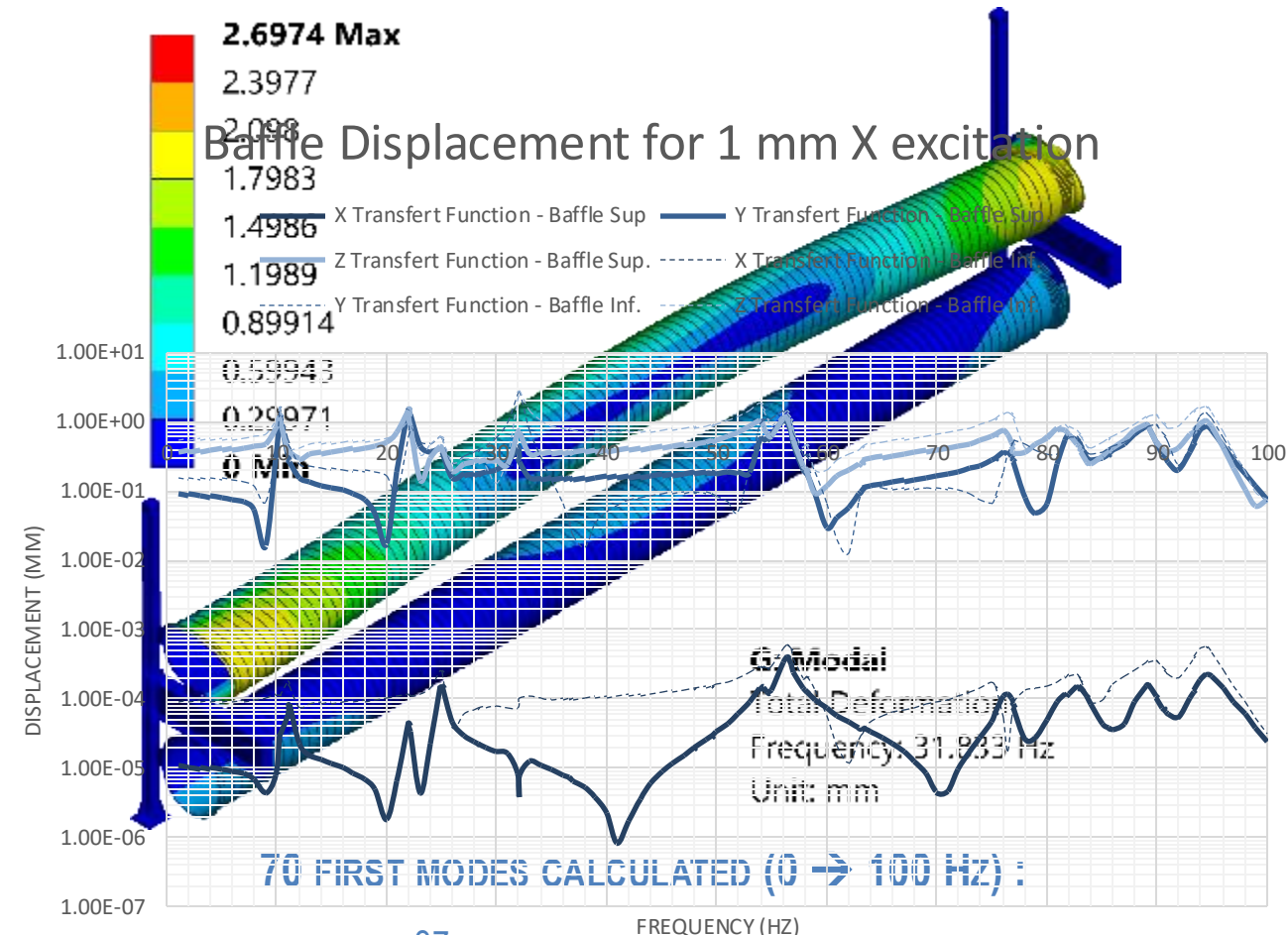
## ANALYSE DE DÉFORMATION STATIQUE & FLAMBAGE

- DEUX TUBES AVEC SUPPORTS (ANCIENNE CONCEPTION, RELIÉS PAR DES SOUFFLETS).
- CHARGES : GRAVITÉ + VIDE + ISOLATION THERMIQUE & SYMÉTRIE
- DÉFLEXION MAXIMALE : < 7 MM SUR 15 M (< 3 MM SANS SOUFFLET)
- ANALYSE DE FLAMBAGE RÉALISÉE À PARTIR DE L'ÉQUILIBRE STATIQUE (COEFFICIENT DE SÉCURITÉ : 4,1)
- 👉 CHOIX DE VALIDATION DE LA CONCEPTION : AUCUN RISQUE D'EFFONDREMENT DANS LES CONDITIONS D'EXPLOITATION



## COMPORTEMENT MODAL ET RÉPONSE HARMONIQUE

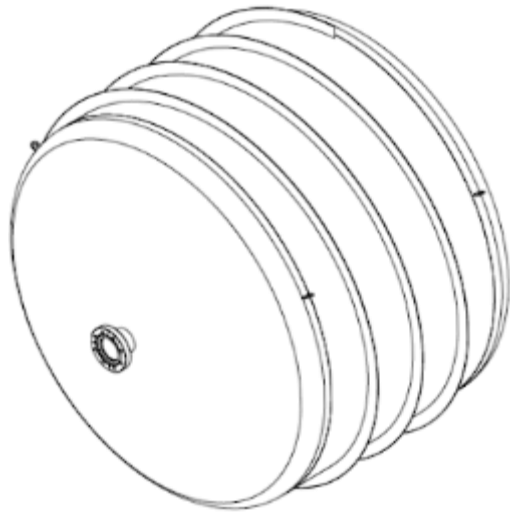
- ANALYSE MODALE JUSQU'À 100 Hz (AMORTISSEMENT DE 2 %)
- EXCITATION APPLIQUÉE AUX FIXATIONS DES SUPPORTS EN X, Y, Z (DÉPLACEMENT DE 1 mm)
- FONCTIONS DE TRANSFERT CALCULÉES AU NIVEAU DES BAFFLES (EXTRÉMITÉ DES TUBES)
- **VALIDATION : RÉSULTATS PROVISOIRES DONNÉS POUR UNE EXCITATION DE 1 mm. ILS DOIVENT ÊTRE MULTIPLIÉS PAR LE SPECTRE SISMIQUE MESURÉ SUR LE SITE D'INSTALLATION FINAL AFIN DE S'ASSURER QU'ILS SONT ACCEPTABLES.**



- 37 FROM THE BELLOWS
- 28 FROM THE TUBES
- 5 FROM THE SUPPORTS



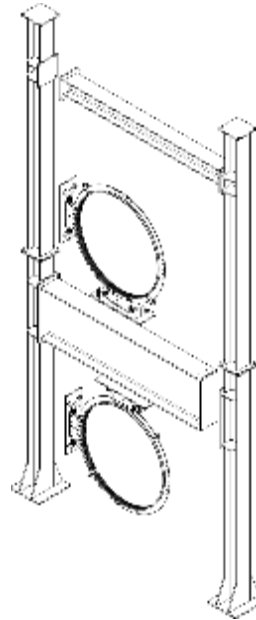
**2025 - 2026**



**PROTOTYPE**



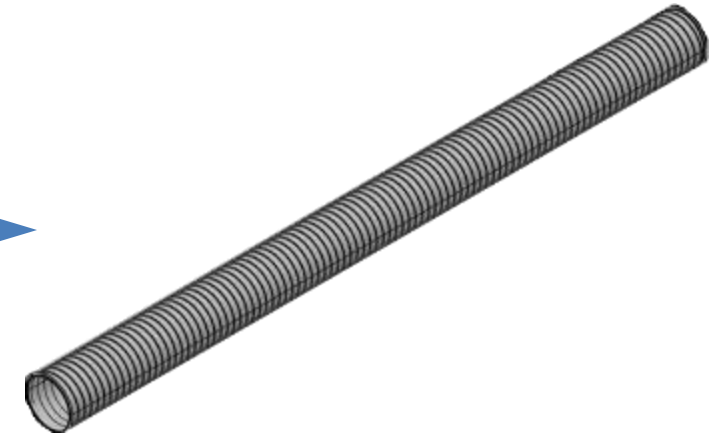
**2026**



**CERN PILOTE SECTOR  
EVOLUTION  
+  
NEW SUPPORTS**

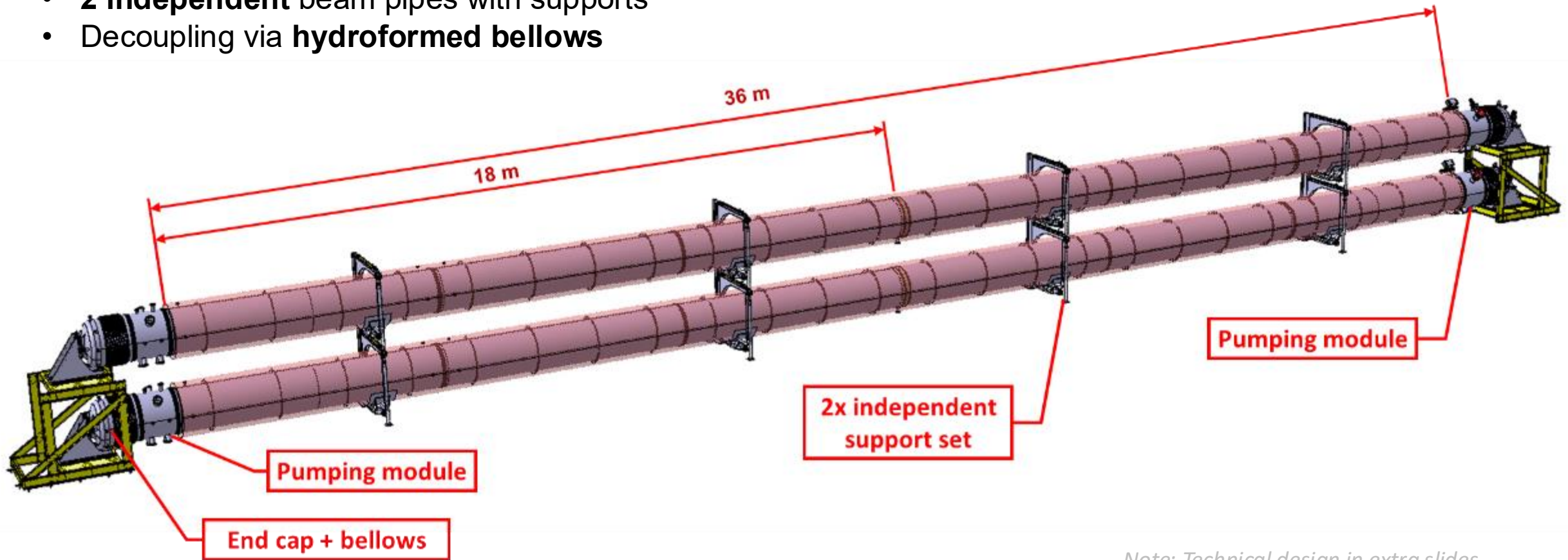


**2027**

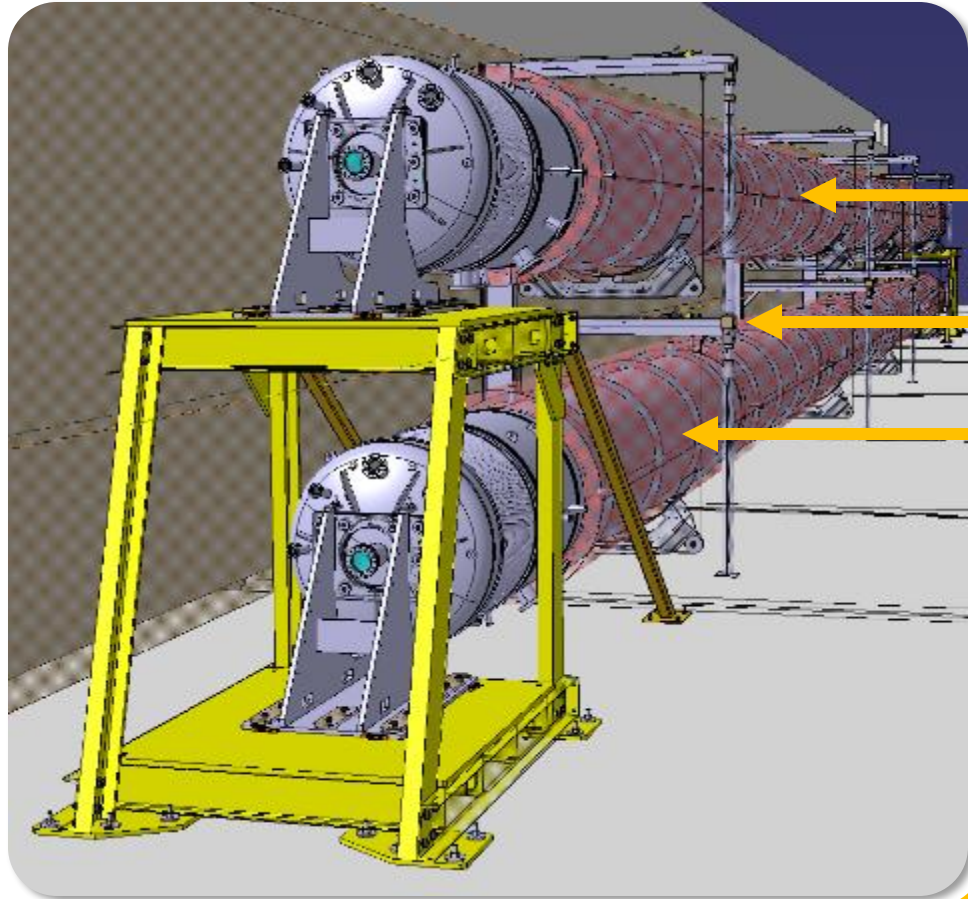


**NEW PILOT SECTOR  
DESIGN**

- Installed in **tunnel TT4** at CERN
- 40 m total length (**36 m pipes + end modules**)
- **2 independent** beam pipes with supports
- Decoupling via **hydroformed bellows**



*Note: Technical design in extra slides*



## Beamtubes:

Design  
Materials  
Manufacturing & QA  
Installation

## Supports

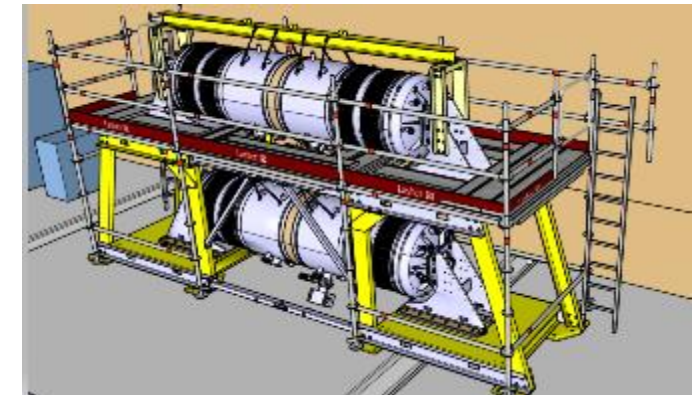
## Insulation

## Lessons learned & Perspectives

## Preliminary tests:



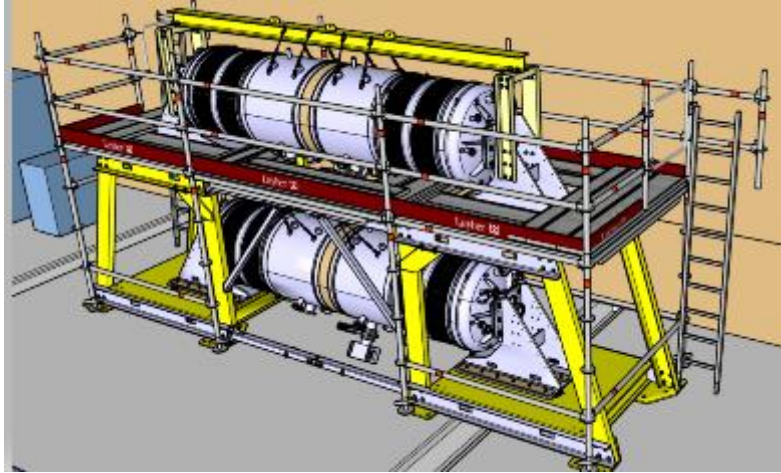
*Mock-up Ø850mm  
to validate assembly strategy*



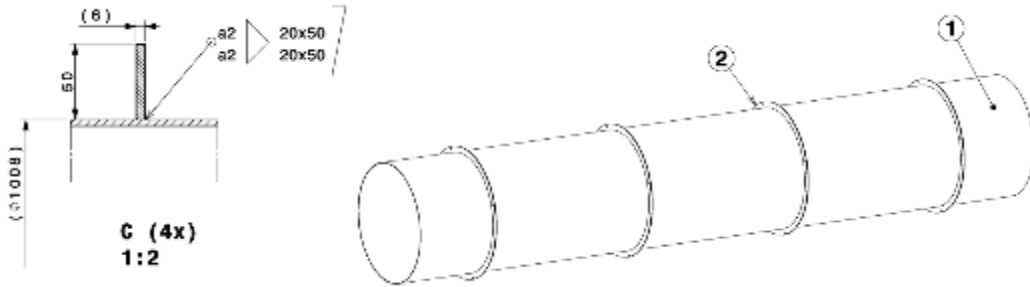
*Background system to assess total gas  
load without prior to tubes installation*



Same approach used for background system → **still no leaks so far!**







Note: Pipe' technical design in extra slides

Based on VIRGO-like vacuum pipes

Pipe	Material	Thickness	Dimensions
VIRGO	AISI 304L	4 mm	Ø1.2 m x 15 m
PILOT SECTOR	Alternative	4 mm	Ø1.0 m x 6 m

Exploring **alternative materials** to **optimize total cost & performance**  
**Ø1.0m** = ET requirement and **6-m length** = maximum length accessible in TT4 tunnel



Handling & transport of 6 m sections into TT4



- 29 Sept. 02 Oct, 2025
- LIGO Hanford (Etat de Washington)



01.

## DESIGN

*Tube Raidi*  
*Tube Ondulé*

04.

## NETTOYAGE / PROPRETÉ

*Bain / Plasma*  
*(Iso 8 → Iso 5)*

02.

## MATÉRIAU

*Acier Doux vs*  
*Acier Ferritique*

05.

## ASSEMBLAGE

*Connexion entre Tube*  
*Maintien de la propreté*

03.

## SOUDAGE

*TIG*  
*Laser*

06.

## BAKEOUT

*Courant électrique*  
*Induction*

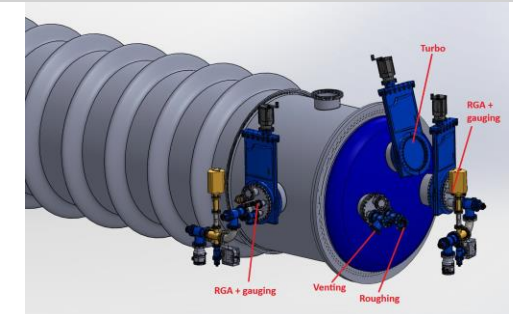
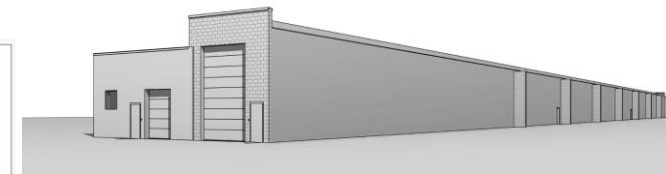
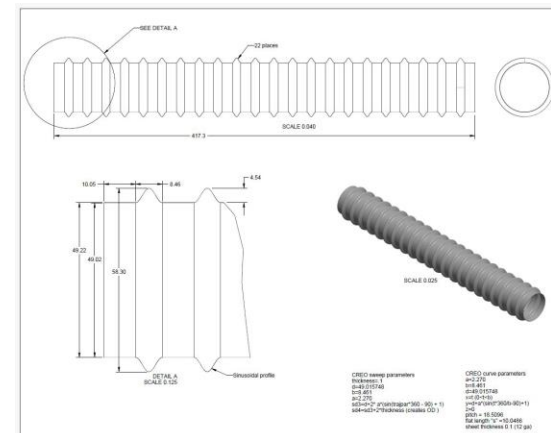
## CERN

- Tube lisse raidi à l'aide de disques (VIRGO)
- Solution éprouvée
- Fabrication par RAVANAT
- Ovalisation des extrémités
- Réalisation concrète



## CE/LIGO

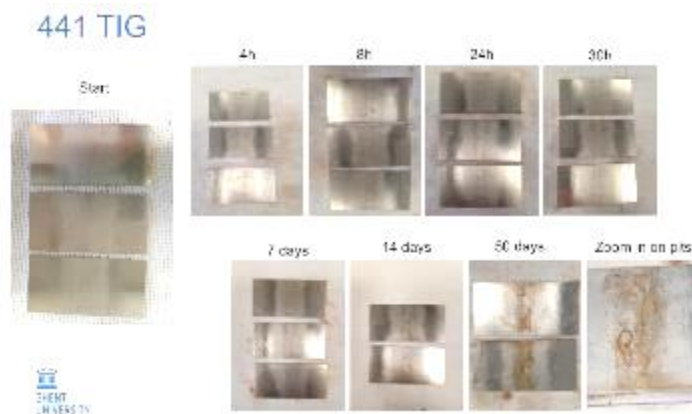
- Tube ondulé par des convolutions sinusoïdales
- Solution nouvelle (inspiré par GEO600)
- Pas de processus de fabrication identifiée
- Création de CEBEX (Cosmic Explorer Beamtube EXperiment)
- Encore sur la planche à dessin



## CERN

## CE/LIGO

- Acier 441 (EN 1.4509 – X2CrTiNb 18)
- 2x fois moins cher que le 304L
- Peu d'hydrogène à dégazer
- Risque de corrosion → Étude CETIM en cours



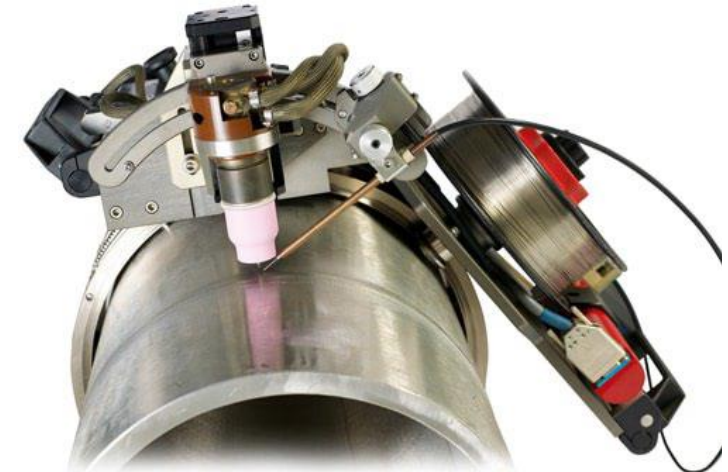
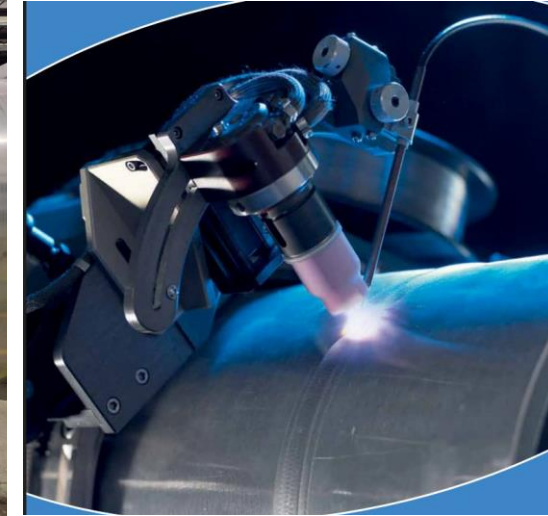
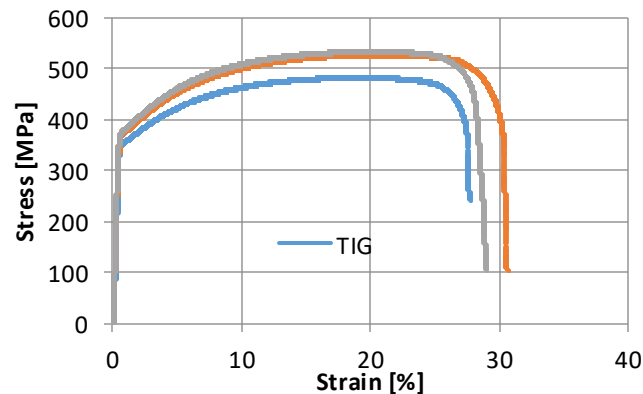
- Acier Doux
- 2x à 3x fois moins cher que le 304L
- Peu d'hydrogène à dégazer (absent du processus de fabrication)
- Processus de fabrication existant dans l'industrie pétrolière
- Couche de passivation protectrice possible



## CERN

- Acier 441 = Acier “Capricieux”
- AISI 441 → Qualifié**  
Conforme aux exigences UHV du CERN  
TIG, plasma et laser (avec ou sans métal d'apport)  
Pas de martensite et grossissement limité des grains  
Pas de sensibilisation évidente (études en cours)

	Welding methods	Weld qualification	Tensile trans.	Tensile long.
AISI 441	TIG	OK	A= 24%	A=26%
	Laser	OK	A=30%	A= 29%





## CERN

• NETTOYAGE

Procédure UHV du CERN → nettoyage au détergent par agitation ultrasonique + rinçage  
Propreté vérifiée à l'aide d'échantillons témoins

• CONTRÔLE DE LA POUSSIÈRE

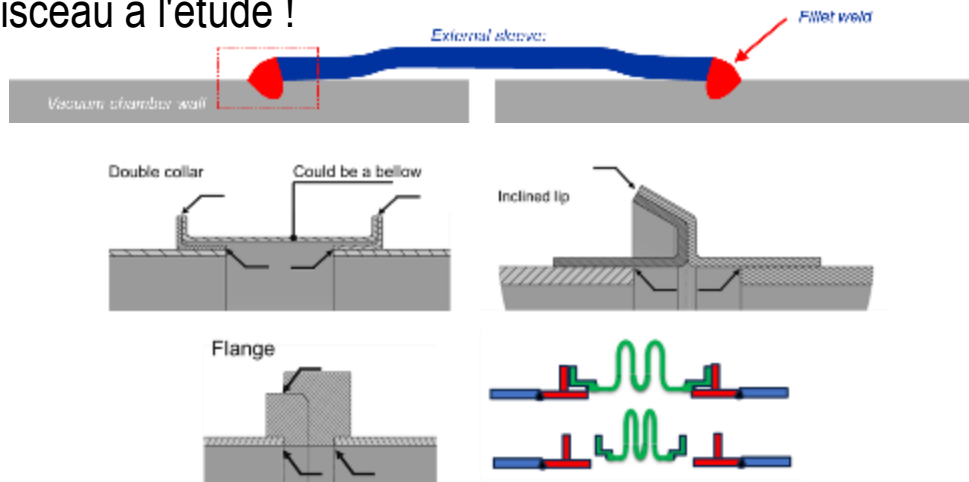
Essentiel pour répondre aux exigences ET  
Norme ISO 6 (ISO 14644-1) attendue  
Écoulement laminaire aux extrémités pendant le séchage  
Emballage avec double sac + couvercles d'extrémité  
Zone de travail propre sur le tunnel TT4

- Objectif → Minimiser l'accumulation de poussière dans le secteur pilote avec un investissement minimal



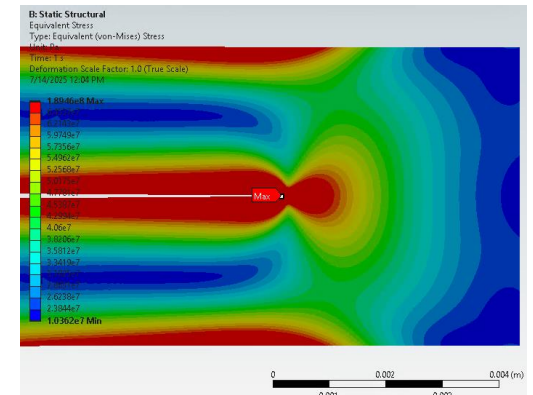
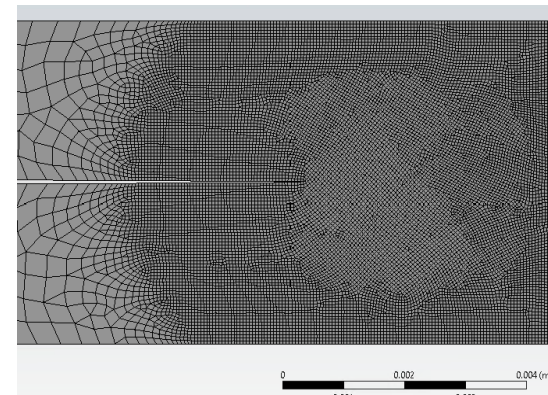
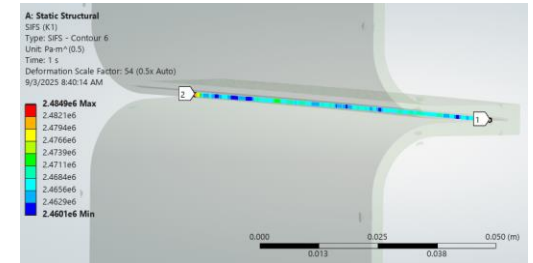
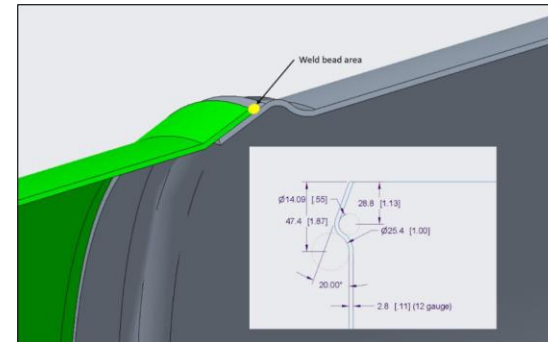
## CERN

- Raccordement par manchon → économique et permet des réparations ultérieures
- Assemblage réussi sur la maquette → Aucune fuite virtuelle
- Positionnement du manchon et soudage par points → identifiés comme les étapes les plus critiques en termes de génération de poussière
- Positionnement fastidieux et chronophage → Nécessite une optimisation → Alternatives pour la deuxième ligne de faisceau à l'étude !



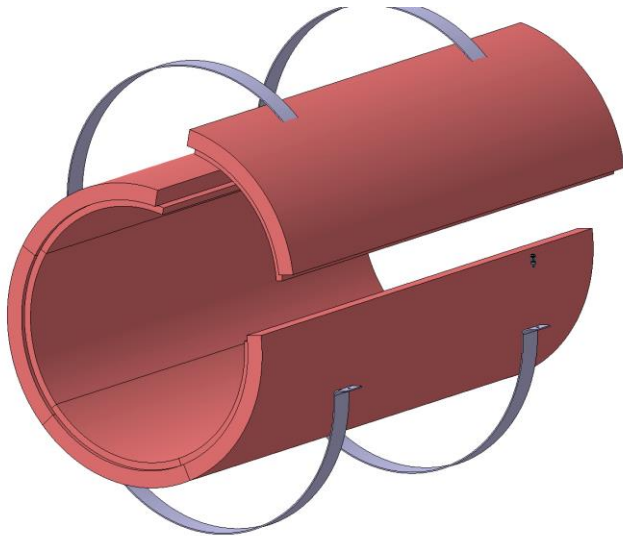
## CE/LIGO

- Étude théorique des soudures de connexion
- Pas de test ou d'essai concret



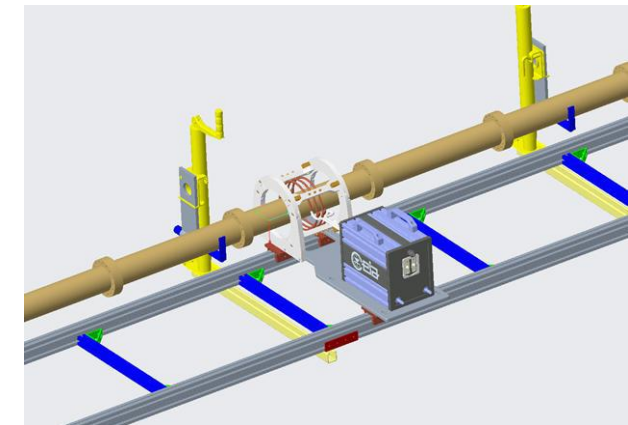
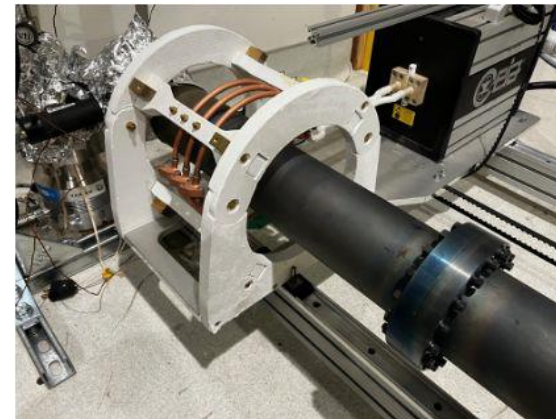
## CERN

- Chauffage à 150 °C
- Objectif du projet : développement d'un isolant durable, bon marché et ininflammable pour ET, à base de :
  - Liège + mousse biophénolique
  - PIR modifié ignifuge
- Le matériau sera coulable et fabriqué en coques.



## CE/LIGO

- Création de IBEX : Induction BakeOut EXperiment
- BakeOut réalisé par induction
- Solution existante dans l'industrie pétrolière
- Sur la planche à dessin pour l'adapter à Cosmic Explorer



# THANK YOU FOR YOUR ATTENTION