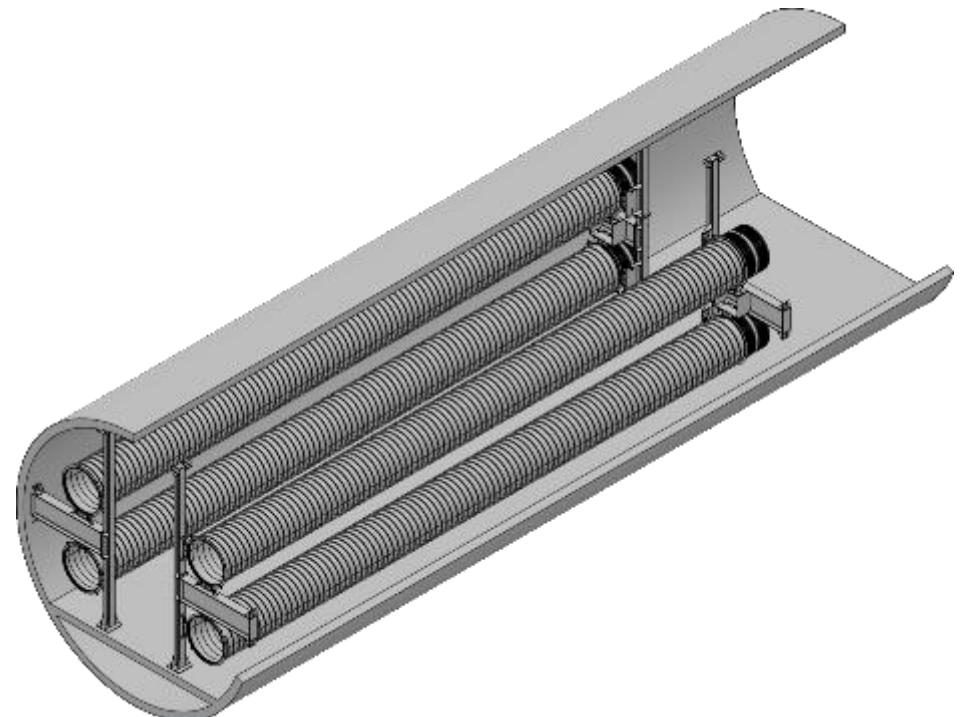


TUBE À VIDE POUR EINSTEIN TELESCOPE

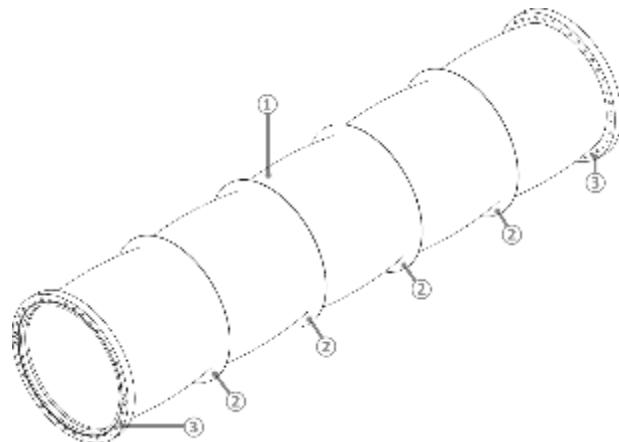
ALEXANDRE LACROIX (CNRS LAPP)
RÉUNION ET FRANCE 2025

07/10/2025

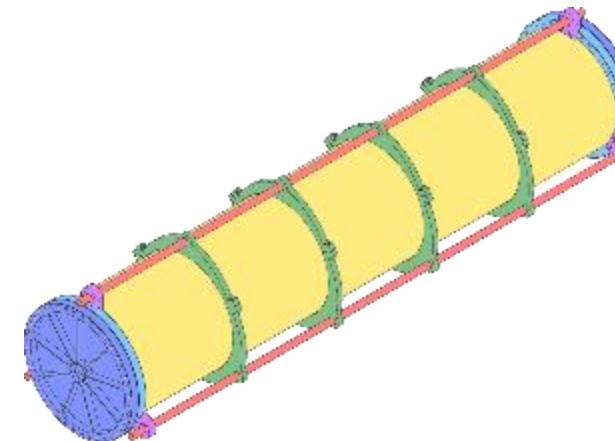
- 01 - TRAVAUX EN COURS LAPP
- 02 - SECTEUR PILOTE CERN
- 03 - RÉSUMÉ DU WORKSHOP CE/ET III



01 - GÉOMÉTRIE BOMBÉE RAIDIE



02 - EXOSQUELETTE DE FABRICATION



03 - PROTOTYPE HYDROFORMÉ



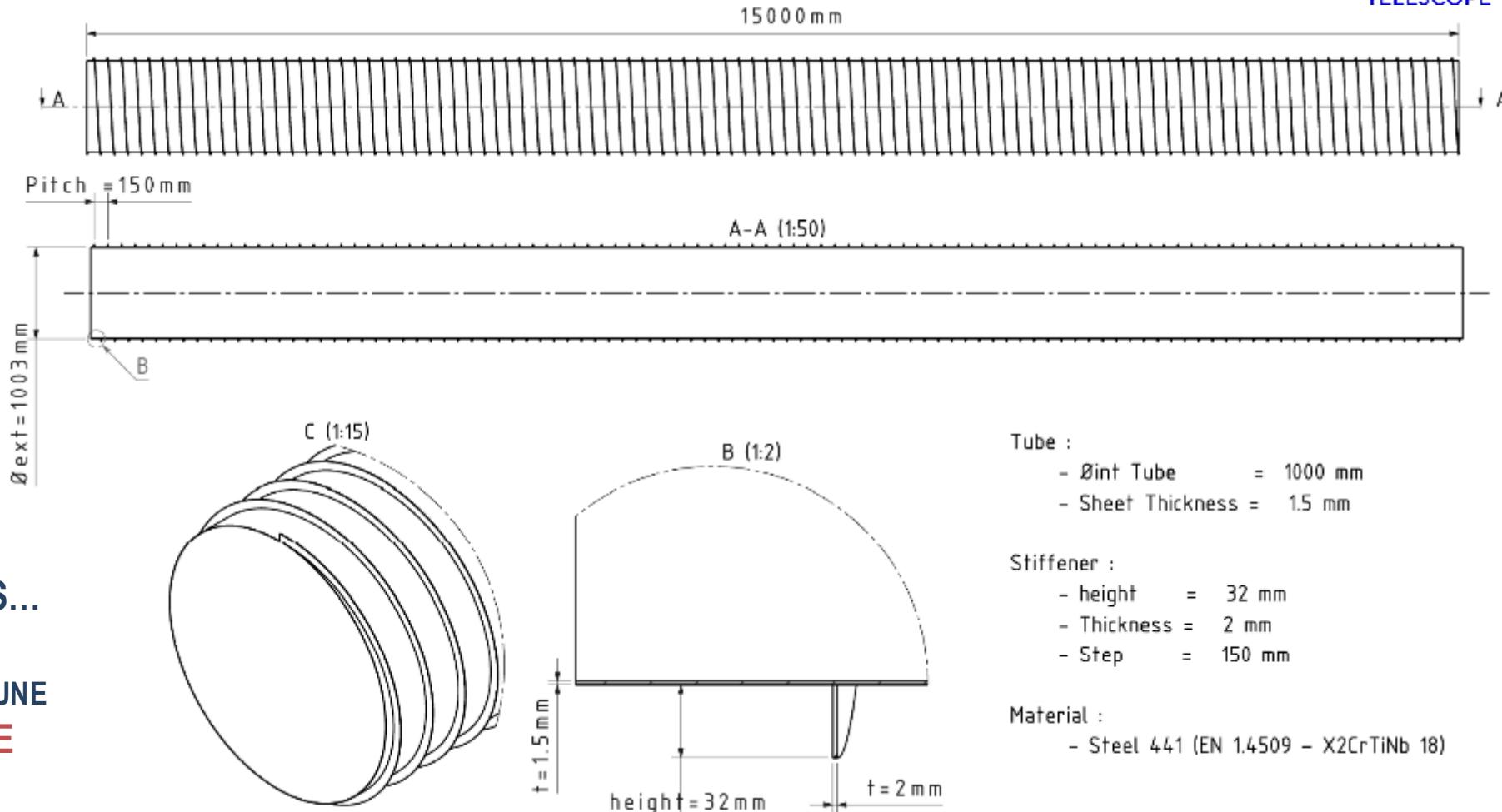
04 - ECHEC : ÉCLATEMENT DE LA SOUDURE



Remise en
Cause

Fabrication
Complexe

- **LONGUEUR :**
 - 15 m,
 - Φ_{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 COUTS 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

PCVS



PROTOTYPE EN COURS DE FABRICATION

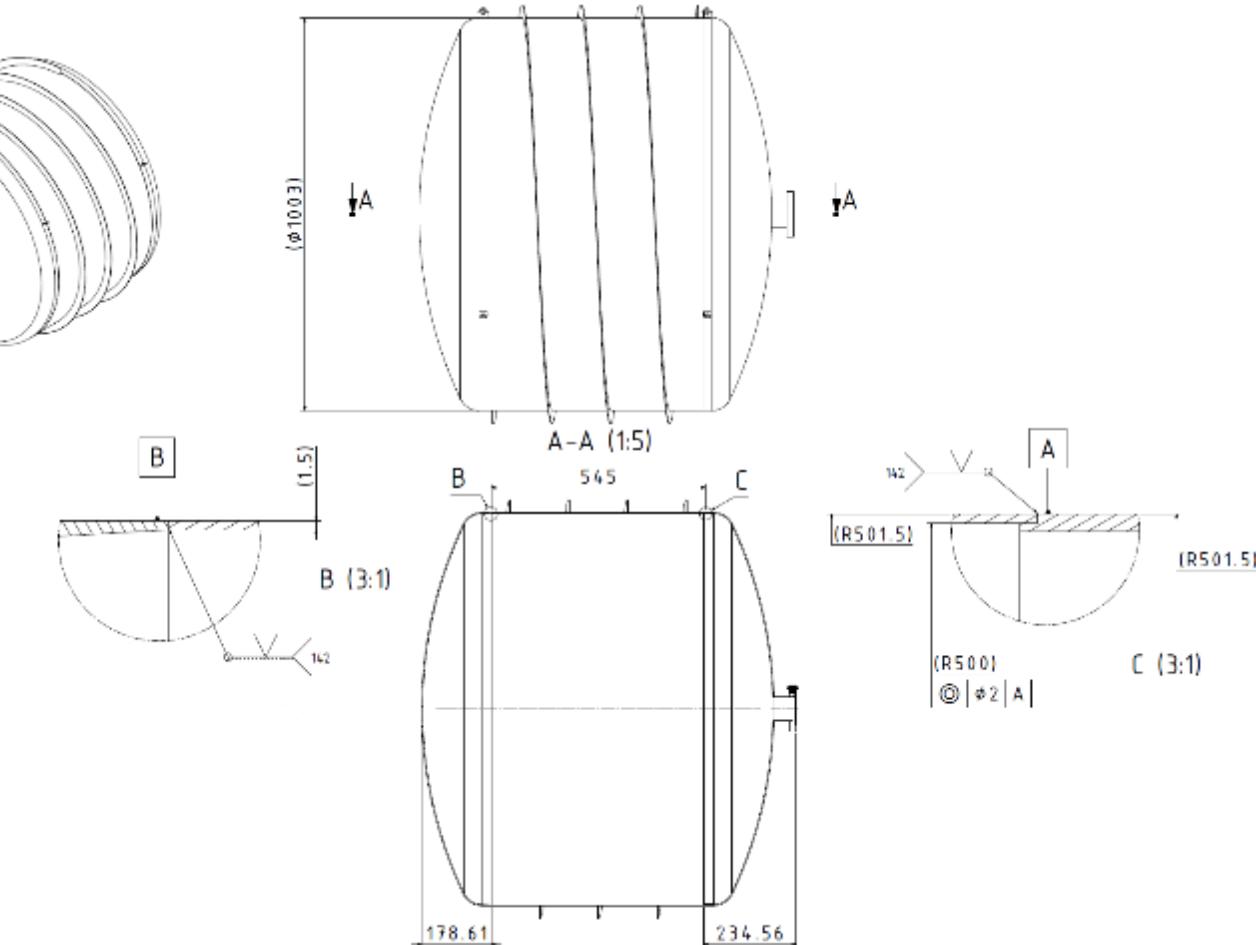
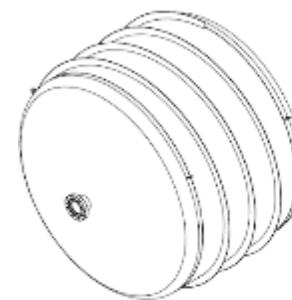
- **Dimensions:** longueur : 0.5 m, Ø1 m interne, 1.5 mm épaisseur
- **Raidisseur Spiral:** 2 mm, 150 mm pas
- **Extrémité:** Fonds bombés + port de pompage
- **Materiau:** Acier Inoxydable 441

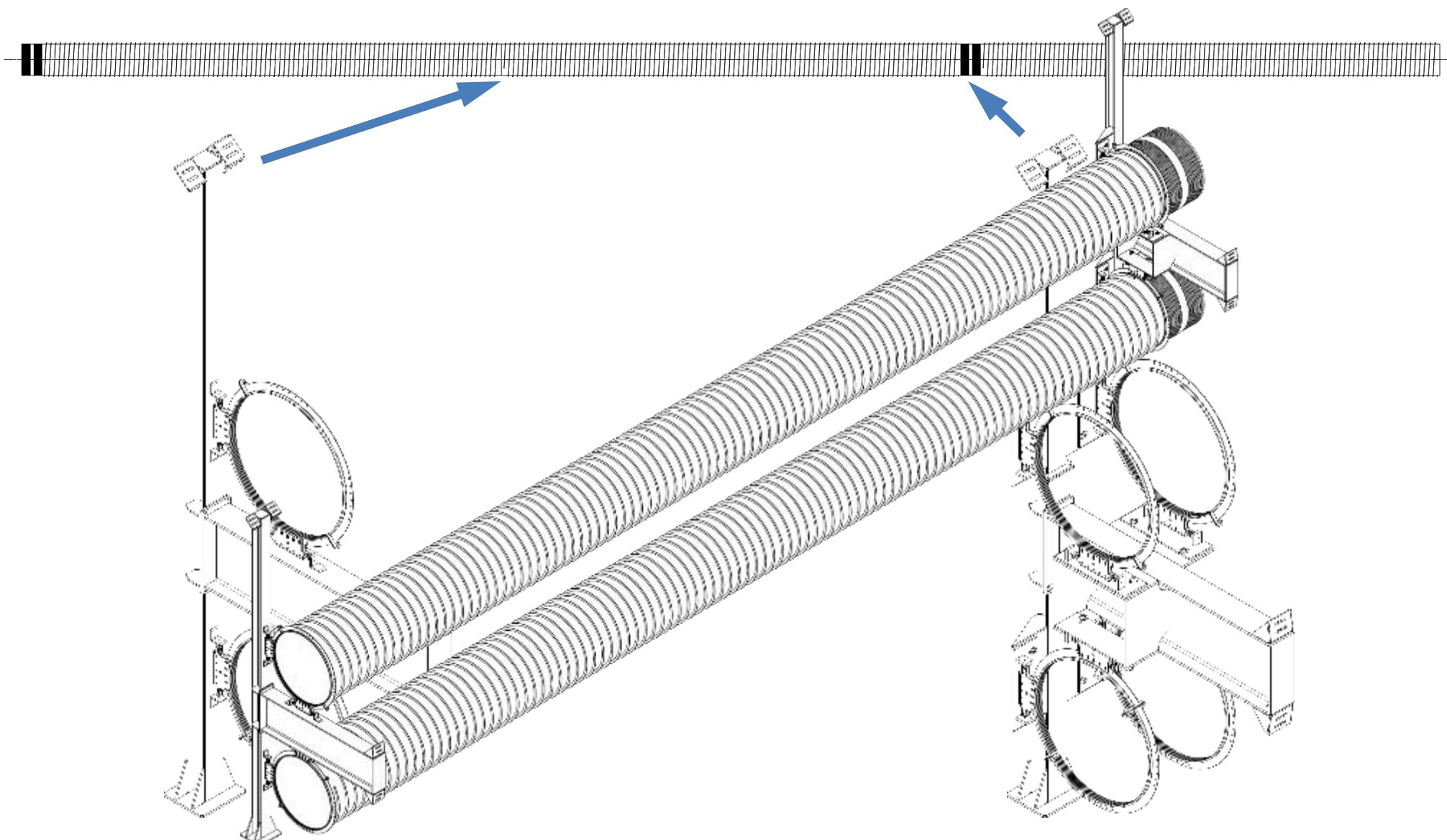
Objectifs:

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

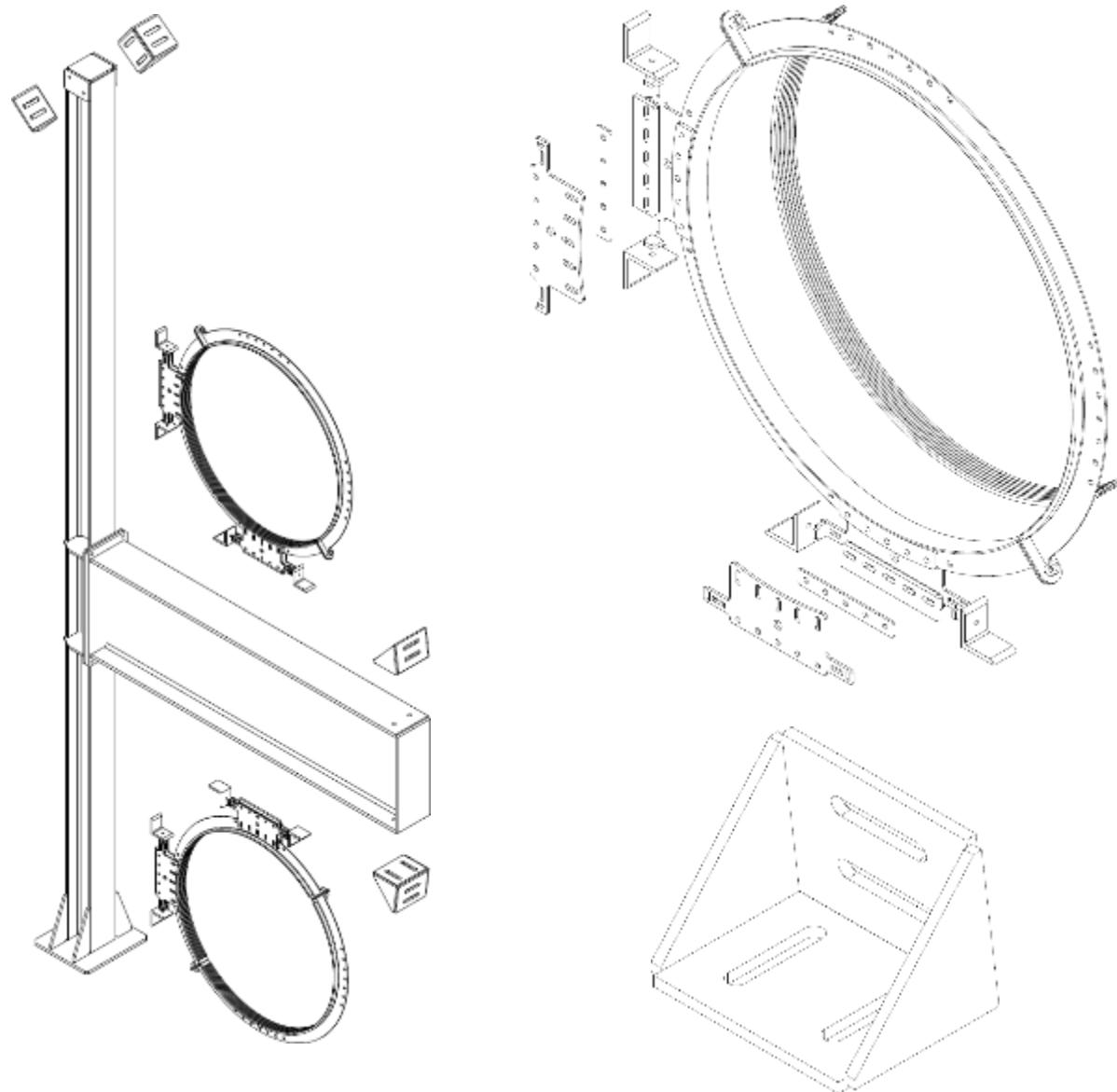
Status:

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

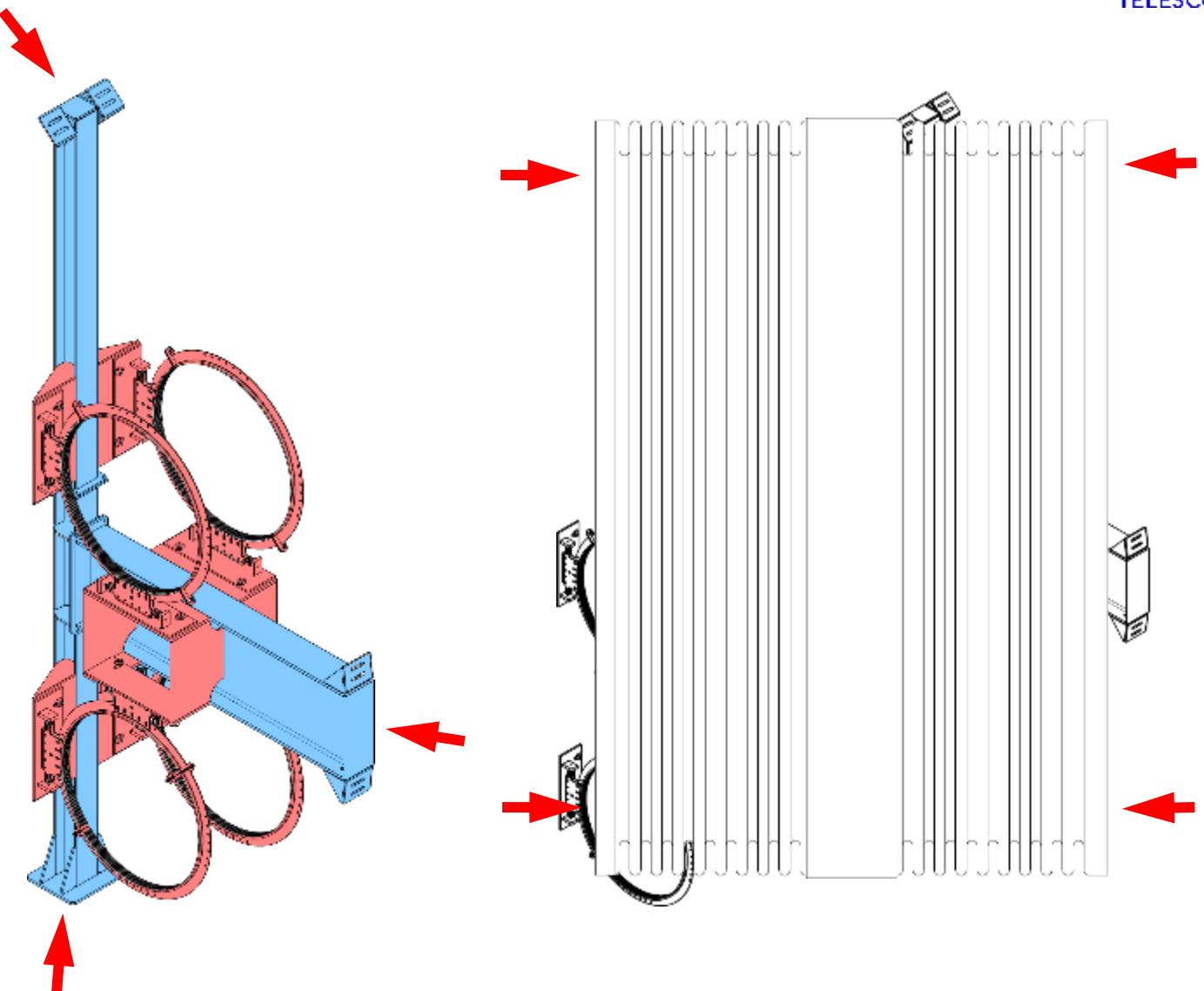




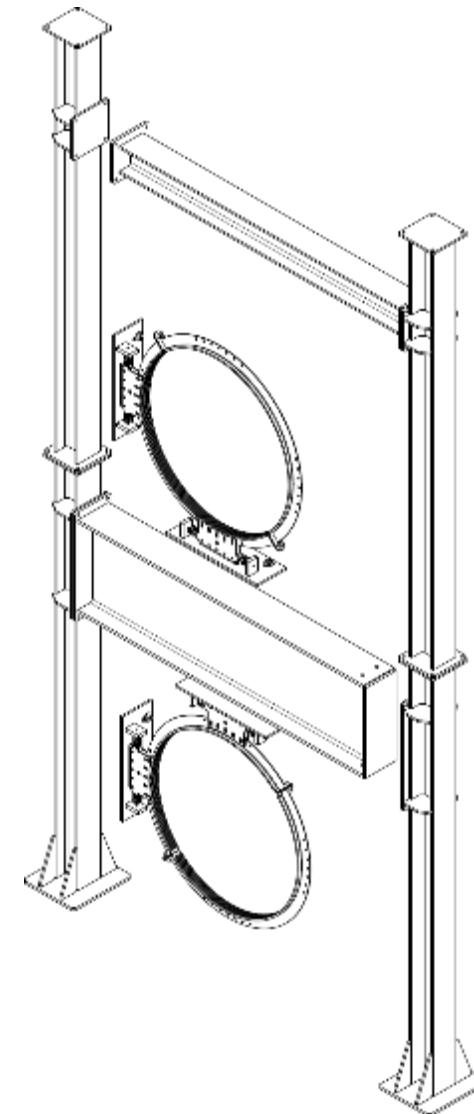
- POUTRE H: VERTICAL + HORIZONTAL → SUPPORTENT 2 TUBES (DESSUS/DESSOUS)
- ANNEAUX DE SERRAGE DU TUBE, AVEC MÂCHOIRES AJUSTABLES → ASSURE L'ALIGNEMENT & TOLÉRANCES
- ISOLATION ÉLECTRIQUE DURANT BAKEOUT (SUPPORTE 200 °C)
- ANCRÉ DANS LE SOL (PLAQUE D'ANCRAGE) ET DANS LES MURS DU TUNNEL (CONNEXION GLISSANTE)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

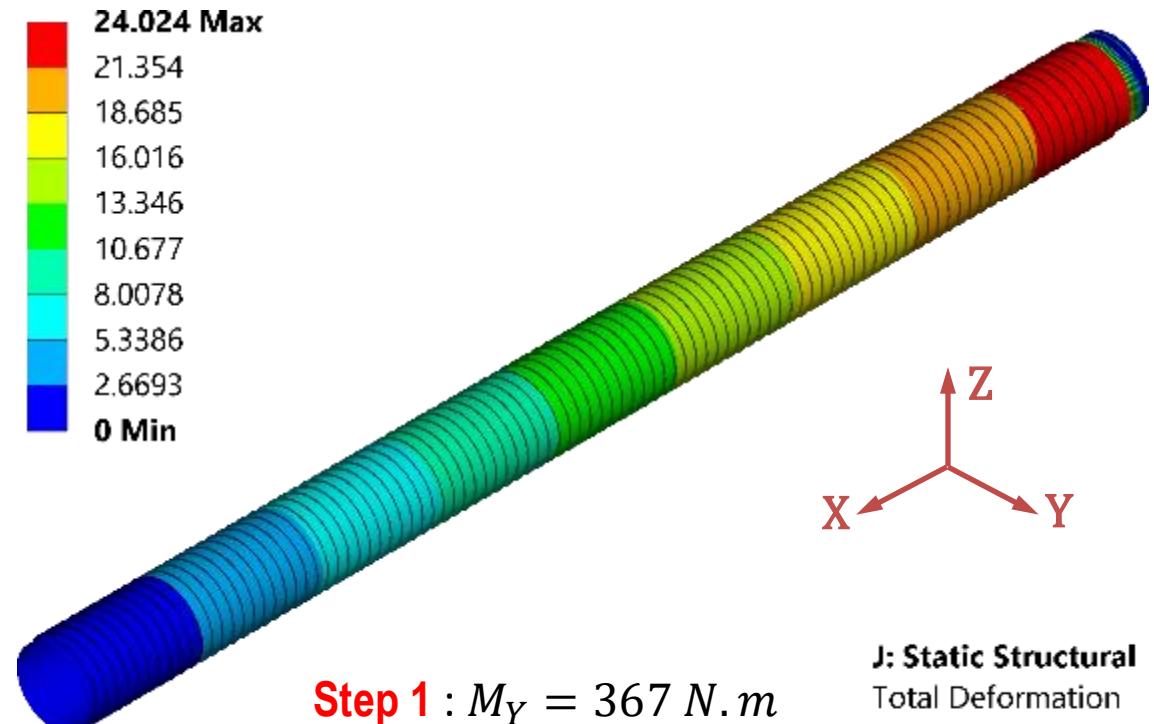


- DESIGN MODULABLE : LES COMPOSANT PEUVENT ÊTRE RÉUTILISÉ DANS UNE NOUVELLE CONFIGURATION (“*COMME DES BRIQUES DE LEGO*”)
- MÉTHODE CAO DE SQUELETTE → CHANGEMENT DIMENSIONNEL FACILITÉ, MISE A JOUR AUTOMATIQUE DE L’ASSEMBLAGE
- PERMET L’ADAPTATION AU FUTUR SECTEUR PILOTE DU CERN (2026)



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

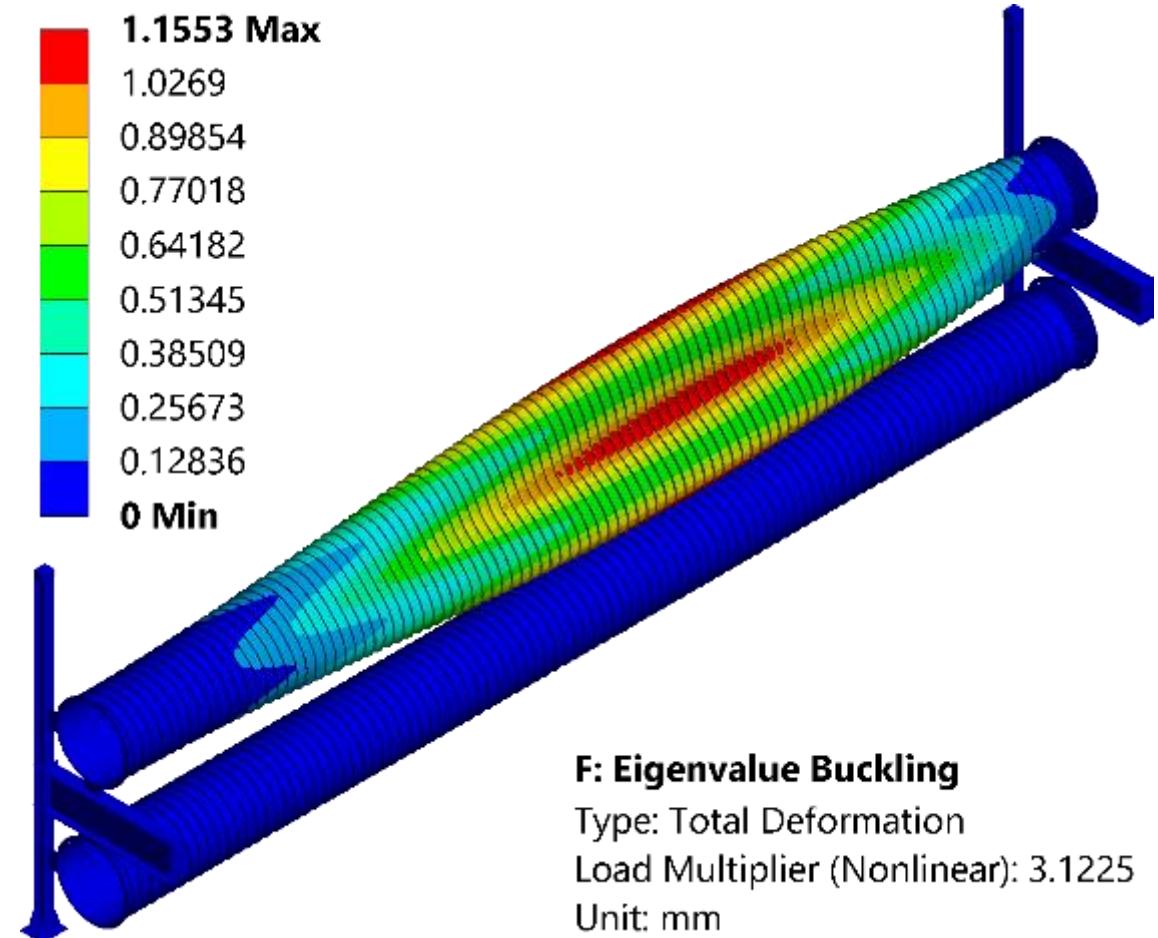
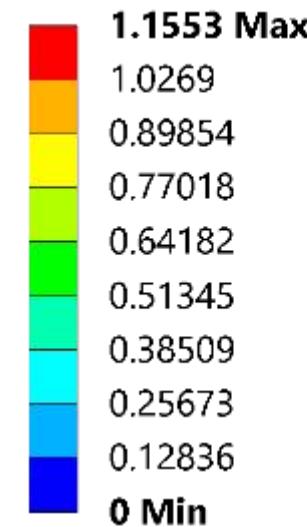
Step 2 : $M_Y = 347 \text{ N.m}$

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

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

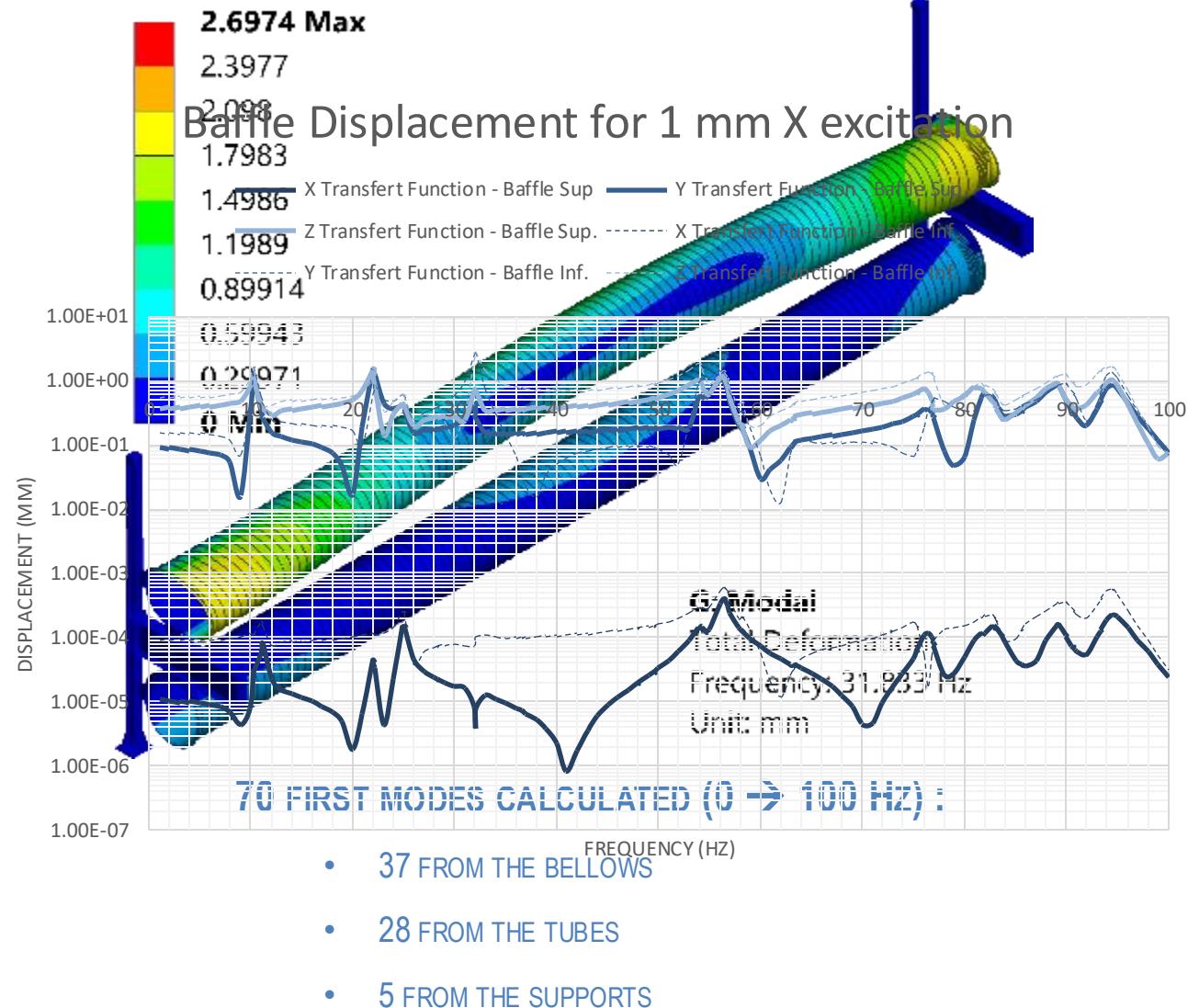
ANALYSE DE DÉFORMATION STATIQUE & FLAMBAGE

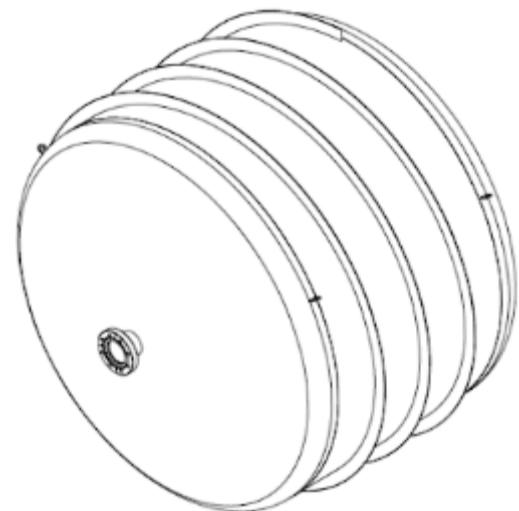
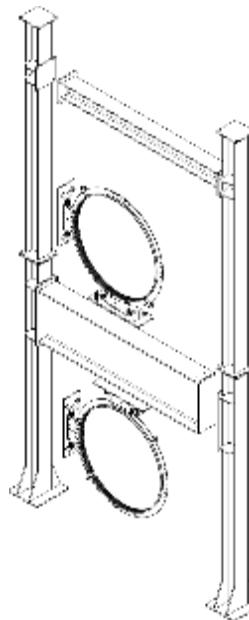
- DEUX TUBES AVEC SUPPORTS (ANCIENNE CONCEPTION, RELIÉS PAR DES SOUFFLETS).
- CHARGES : GRAVITÉ + VIDE + ISOLATION THERMIQUE & SYMÉTRIE
- DÉFLEXION MAXIMALE : < 7 MM SUR 15 M (< 3 MM SANS SOUFFLET)
- ANALYSE DE FLAMBAGE RÉALISÉE À PARTIR DE L'ÉQUILIBRE STATIQUE (COEFFICIENT DE SÉCURITÉ : 4,1)
-  CHOIX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



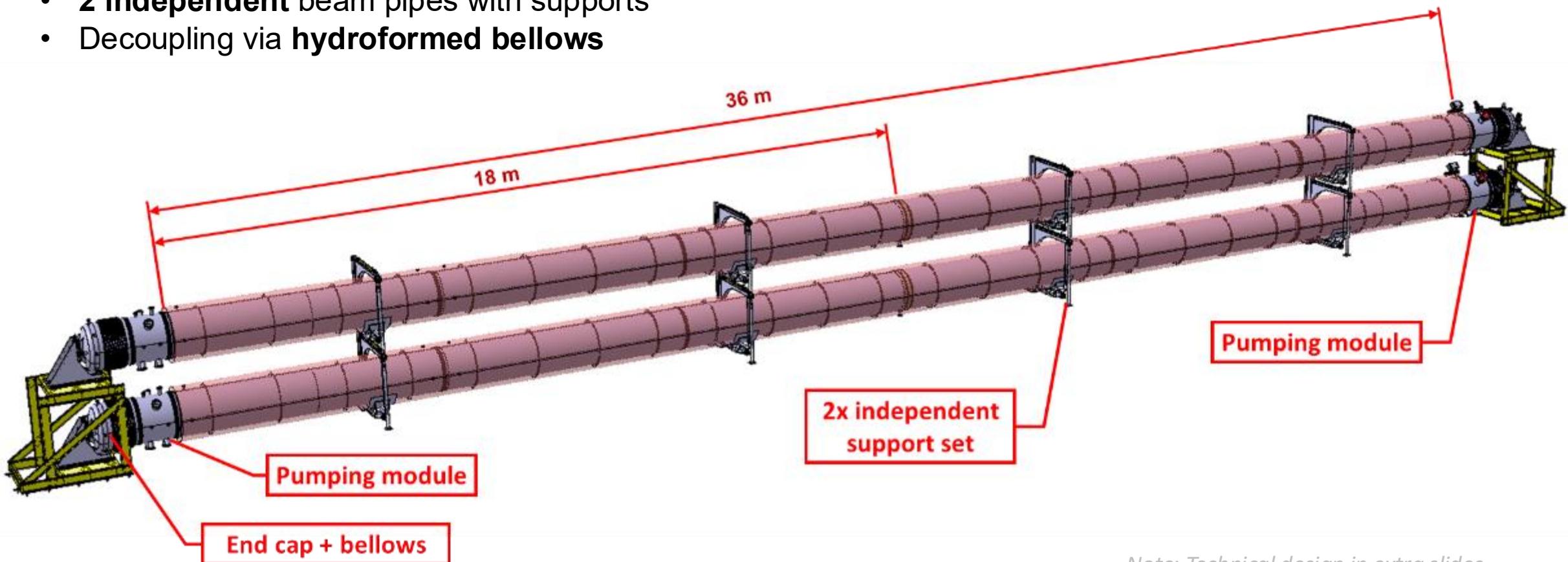
COMPORTEMENT MODAL ET RÉPONSE HARMONIQUE

- 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.

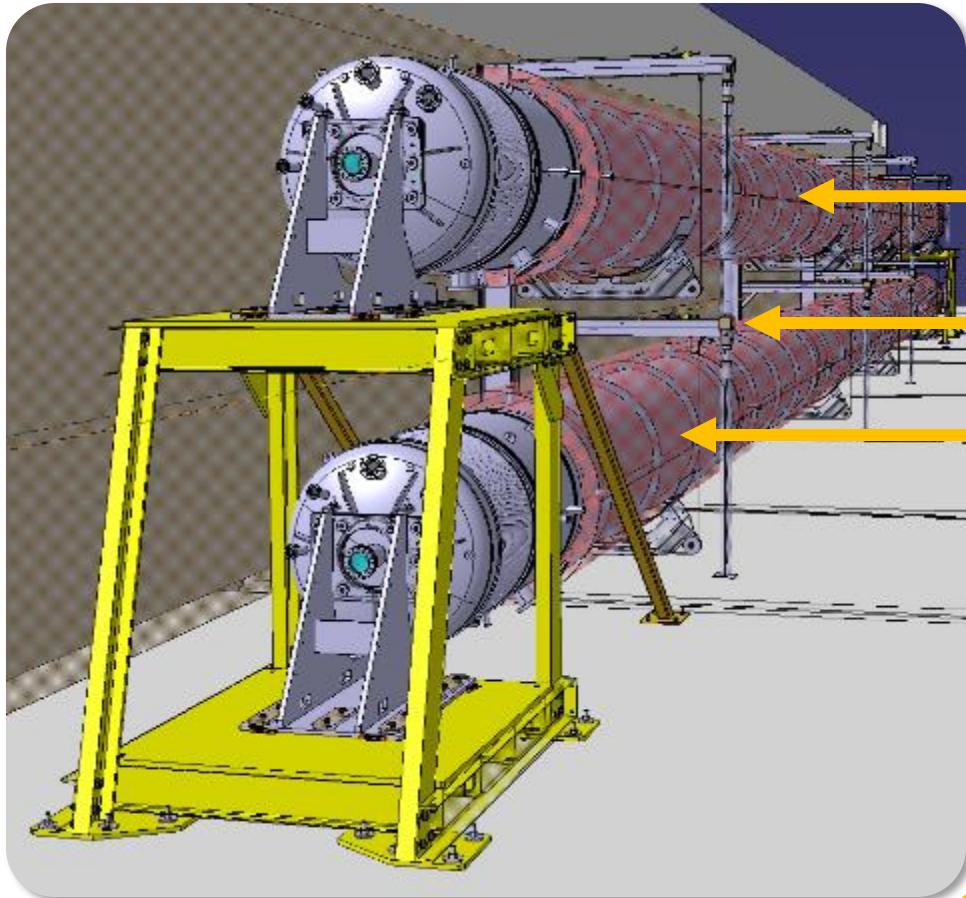


2025 - 2026**PROTOTYPE****2026****CERN PILOTE SECTOR
EVOLUTION**
+
NEW SUPPORTS**2027****NEW PILOT SECTOR
DESIGN**

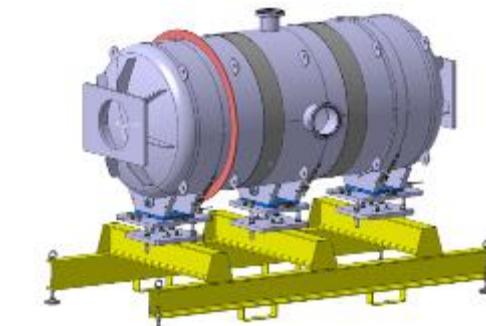
- Installed in **tunnel TT4** at CERN
- 40 m total length (**36 m pipes + end modules**)
- **2 independent** beam pipes with supports
- Decoupling via **hydroformed bellows**



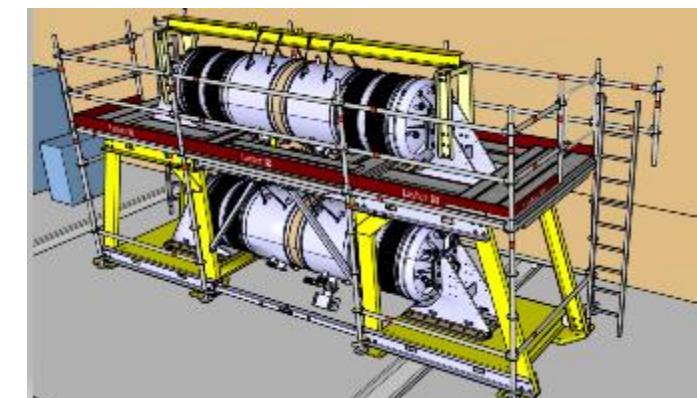
Note: Technical design in extra slides

**Beamtubes:**

Design
Materials
Manufacturing & QA
Installation

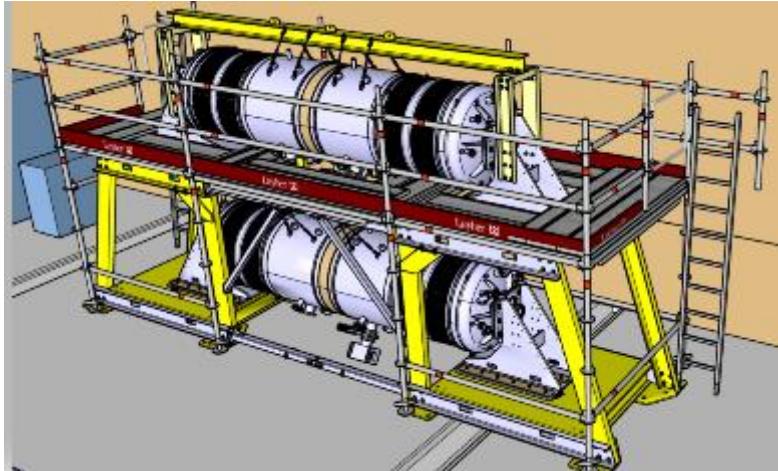
Supports**Insulation****Preliminary tests:**

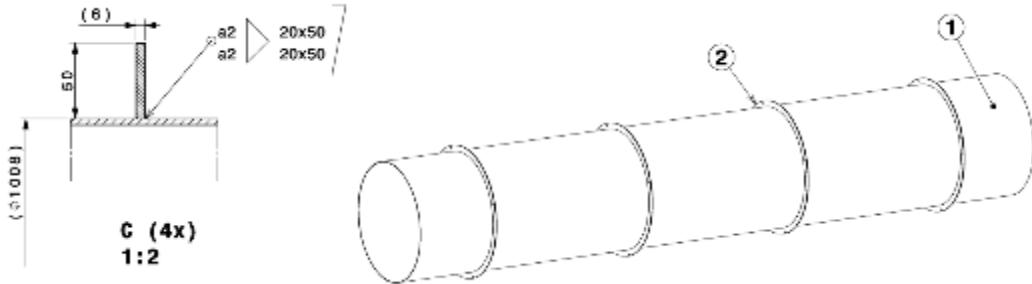
*Mock-up Ø850mm
to validate assembly strategy*



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. MATÉRIAUX***Acier Doux vs**Acier Ferritique***05. ASSEMBLAGE***Connexion entre Tube**Maintien de la propreté***03. SOUDAGE***TIG**Laser***06. BAKEOUT***Courant électrique**Induction*

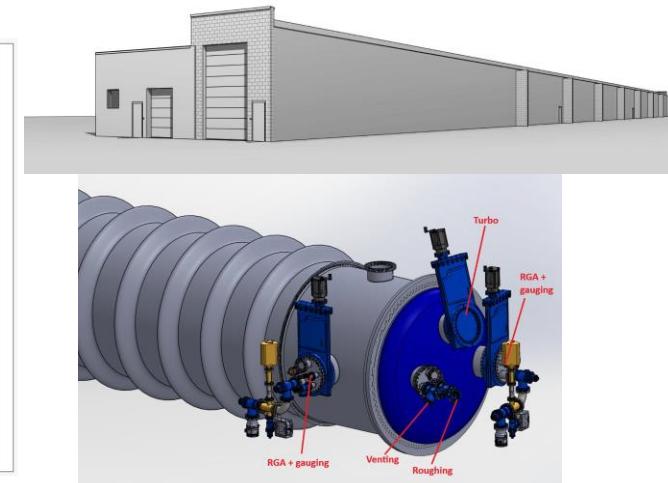
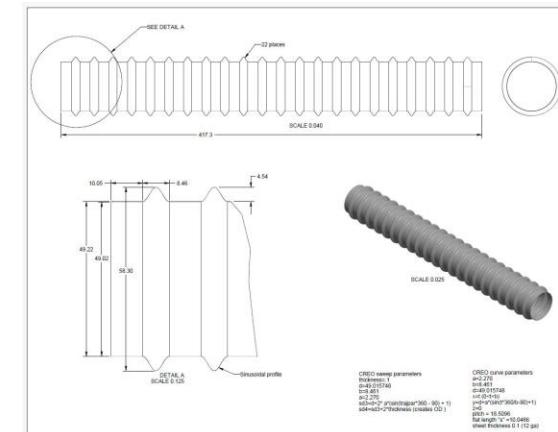
CERN

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



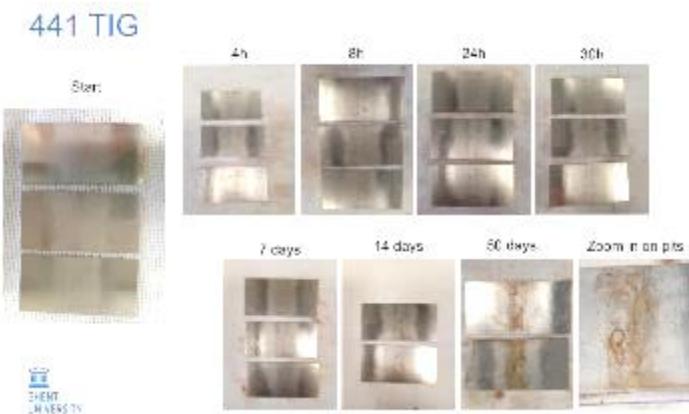
CE/LIGO

- 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 a dessin



CERN

- 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



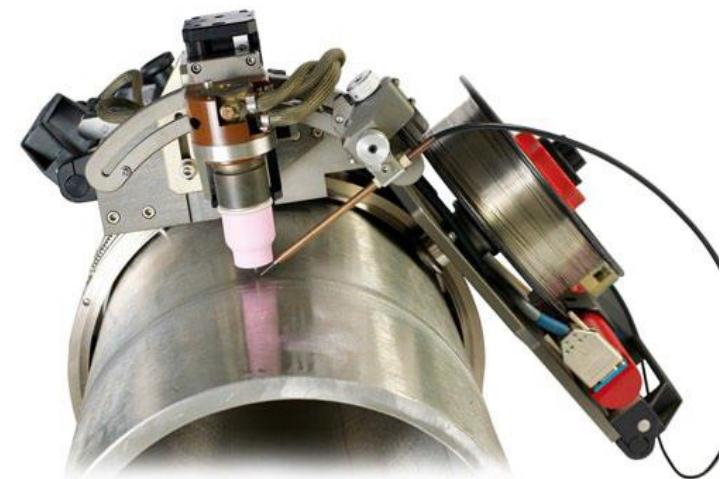
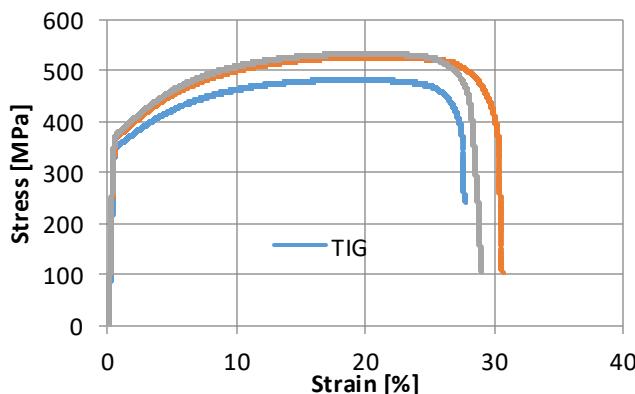
CE/LIGO

- 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**

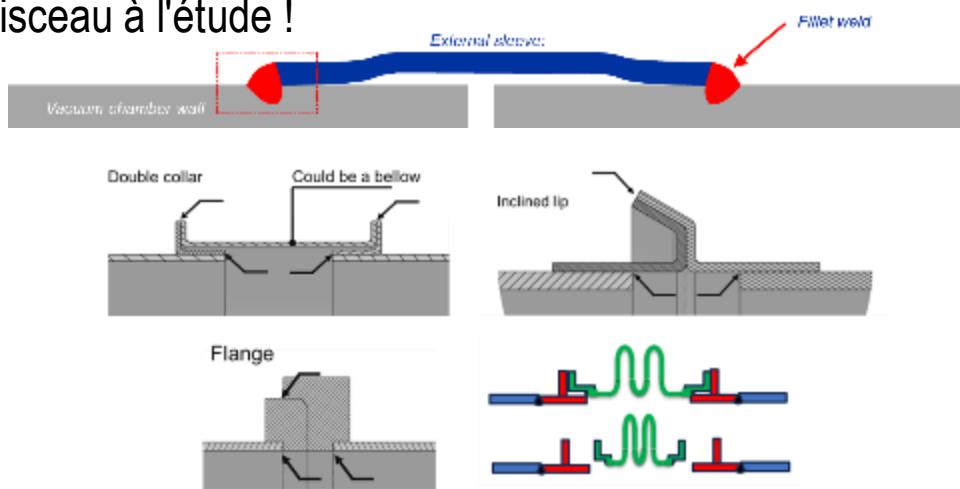
Essentiel pour répondre aux exigences ET
Norme ISO 6 (ISO 14644-1) attendue
Écoulement laminaire aux extrémités pendant le séchage
Emballage avec double sac + couvercles d'extrémité
Zone de travail propre sur le tunnel TT4

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



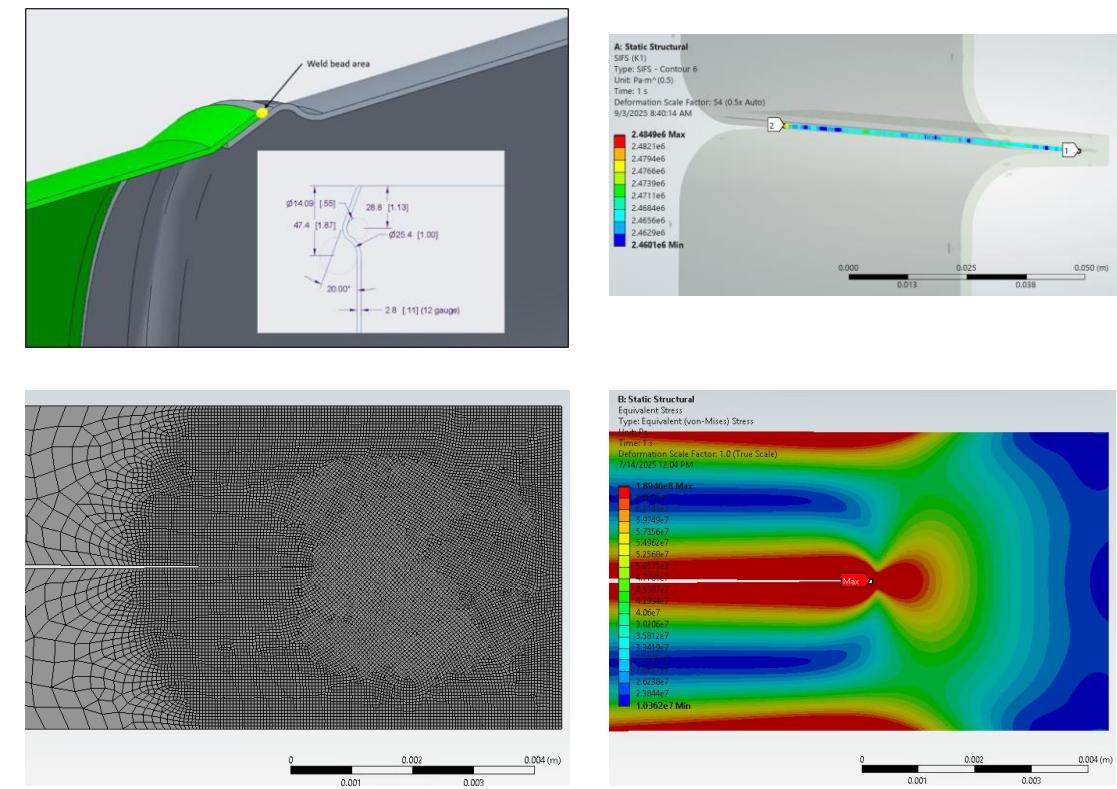
CERN

- 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 !



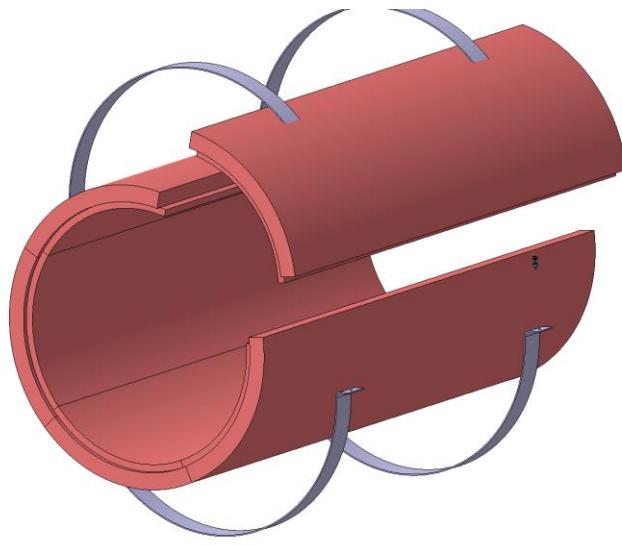
CE/LIGO

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



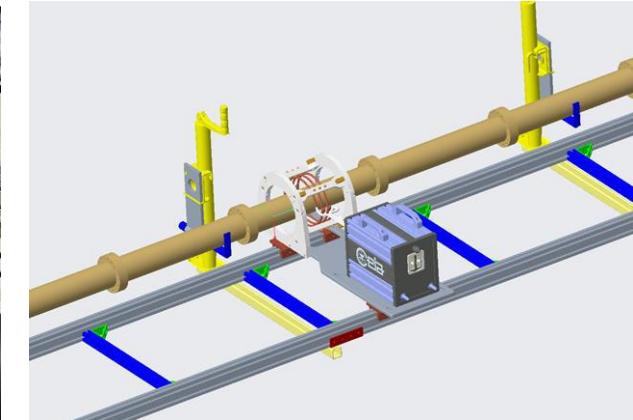
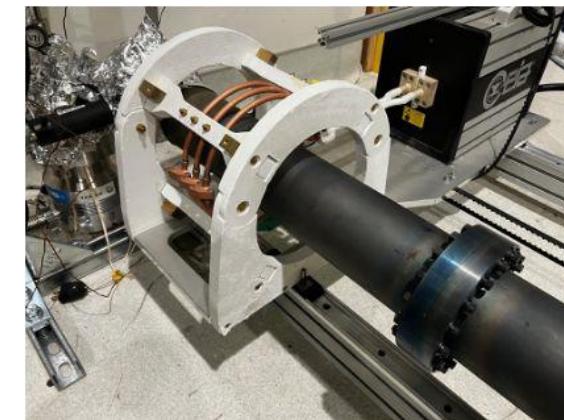
CERN

- 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**