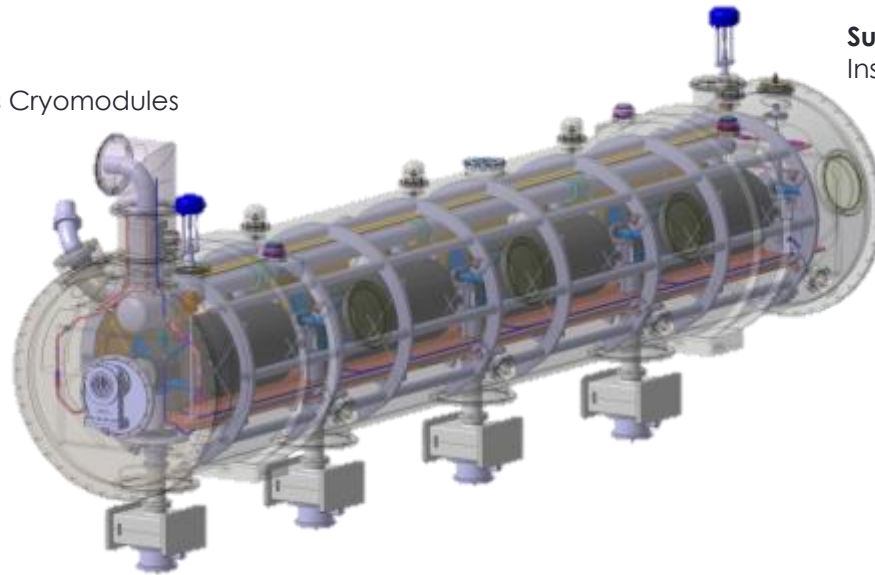




CEA - Centre de Saclay
Laboratoire d'Intégration et de
Développement des Cavités et des Cryomodules



Supméca Paris
Institut Supérieur de Mécanique de Paris



Assemblage et outillages – Cryomodule ECCTD

Amaury MARTIN
Elève ingénieur de 4^{ème} année
Supméca Paris

Tuteur: N.BAZIN
Septembre 2013 à Janvier 2014

- Introduction
- Le cryomodule prototype pour le projet ESS
- Etude des phases d'assemblage
- Besoin et conception des outillages

Sujet de stage

Etude des séquences d'assemblage et conception des outillages associés pour l'intégration de cryomodules à cavités supraconductrices pour ESS

- Définir les séquences d'assemblage du cryomodule ESS
 - Assemblage du train de cavités en salle blanche
 - Assemblage en dehors de la salle blanche
- Conception des outillages pour l'intégration
 - Caractériser le besoin d'outillages
 - Conception des outillages

Le projet ESS



- Source de neutrons de spallation Européenne.
- Accélération de protons jusqu'à une cible en Tungstène : création de neutrons.

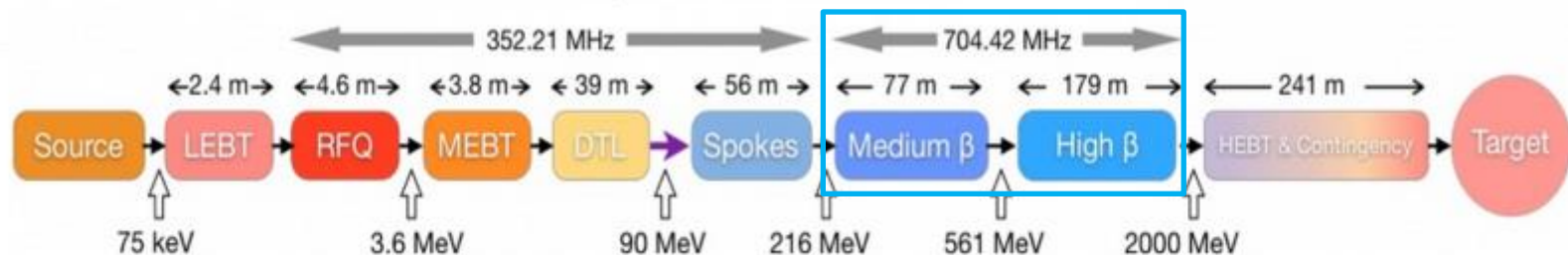
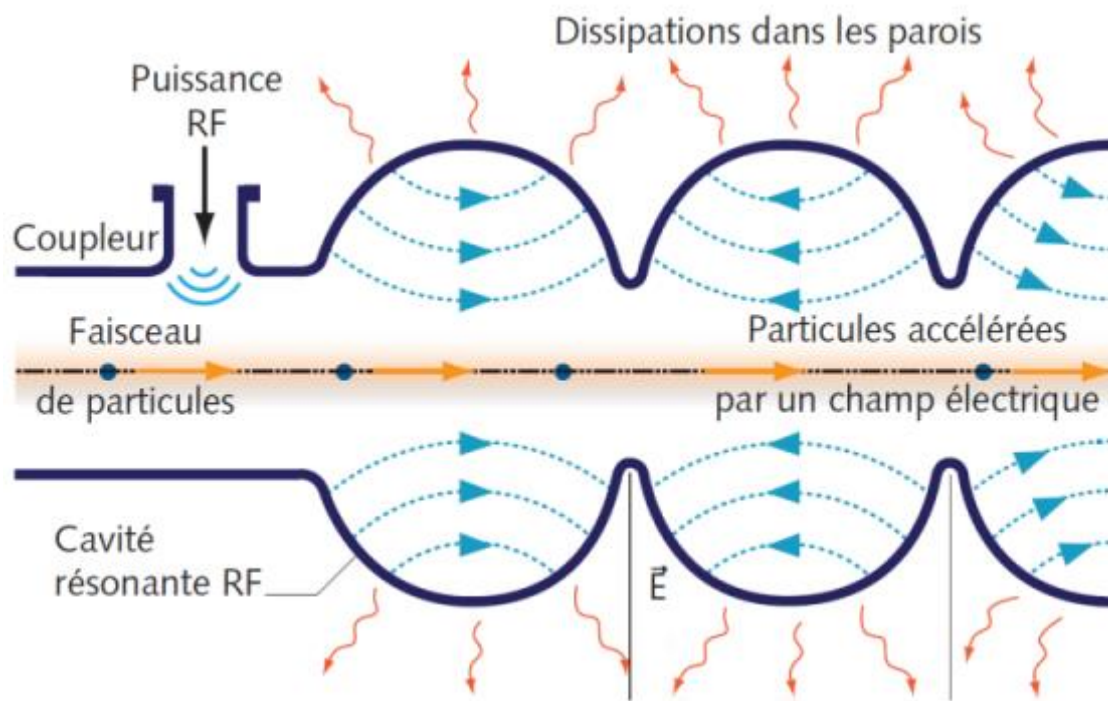


Schéma de l'accélérateur ESS

- Le CEA est entre autre en charge des sections à cavités elliptiques Medium β et Haut β .

Fonctionnement d'une cavité radiofréquence

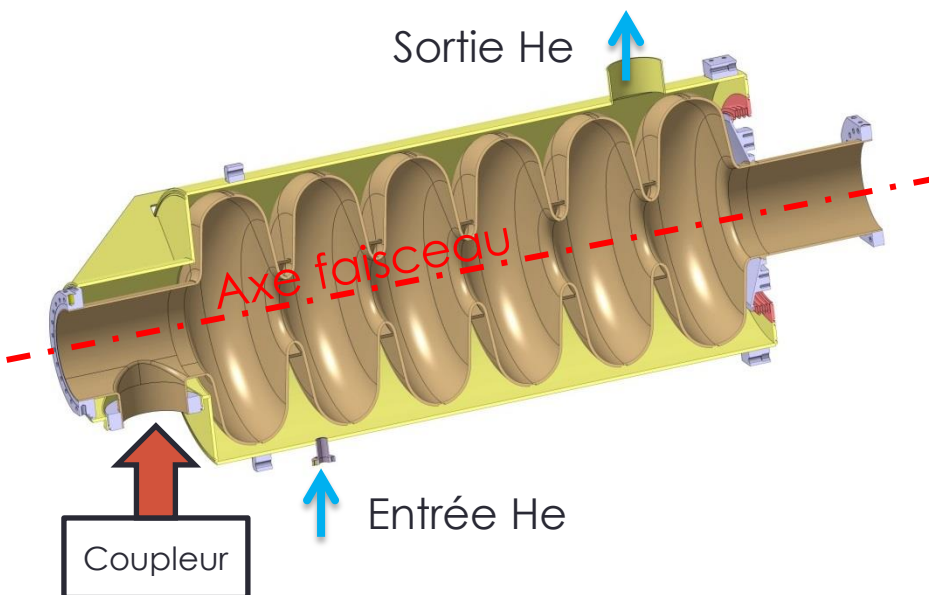
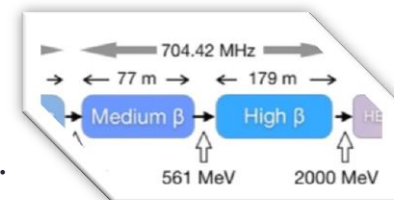
- Volume vide délimité par des parois métalliques.
 - Siège d'une onde électromagnétique (RF) injectée par un coupleur de puissance.
 - Matériau:
 - #Cuivre, résistance de surface: $m\Omega$
 - #Niobium, matériau supraconducteur (Température critique : 9,2K), résistance de surface: $n\Omega$
- une puissance dissipée 10^6 inférieure au cuivre.



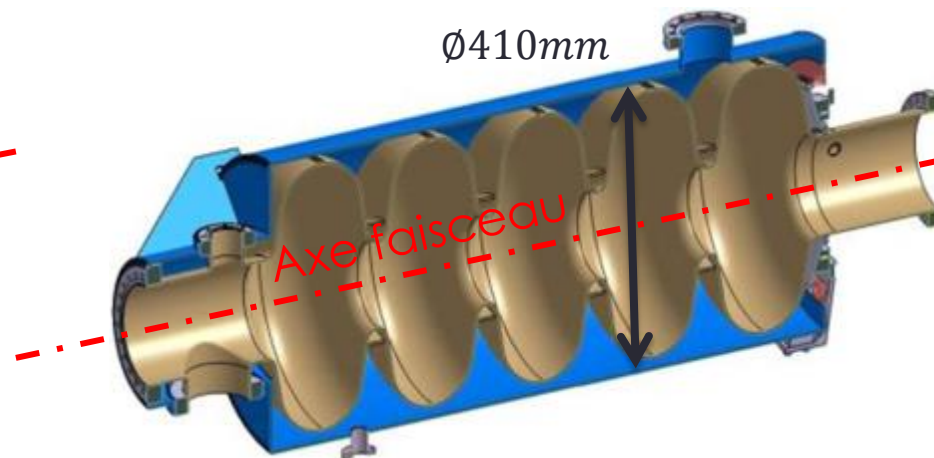
Une cavité supraconductrice est sensible à la poussière. Préparation en salle blanche nécessaire.

La cavité elliptique supraconductrice RF

- Réservoir d'hélium liquide en titane soudé à la cavité.
- Cavité en niobium à haute pureté (RRR >250). Brides en niobium-titane.
- Masse de la cavité et du réservoir environ de 100 kg.
- 2 types de cavités:
 - Medium β ($\beta=0,67$), longueur bride à bride de 1 258 mm.
 - Haut β ($\beta=0,86$), longueur bride à bride de 1 316 mm.



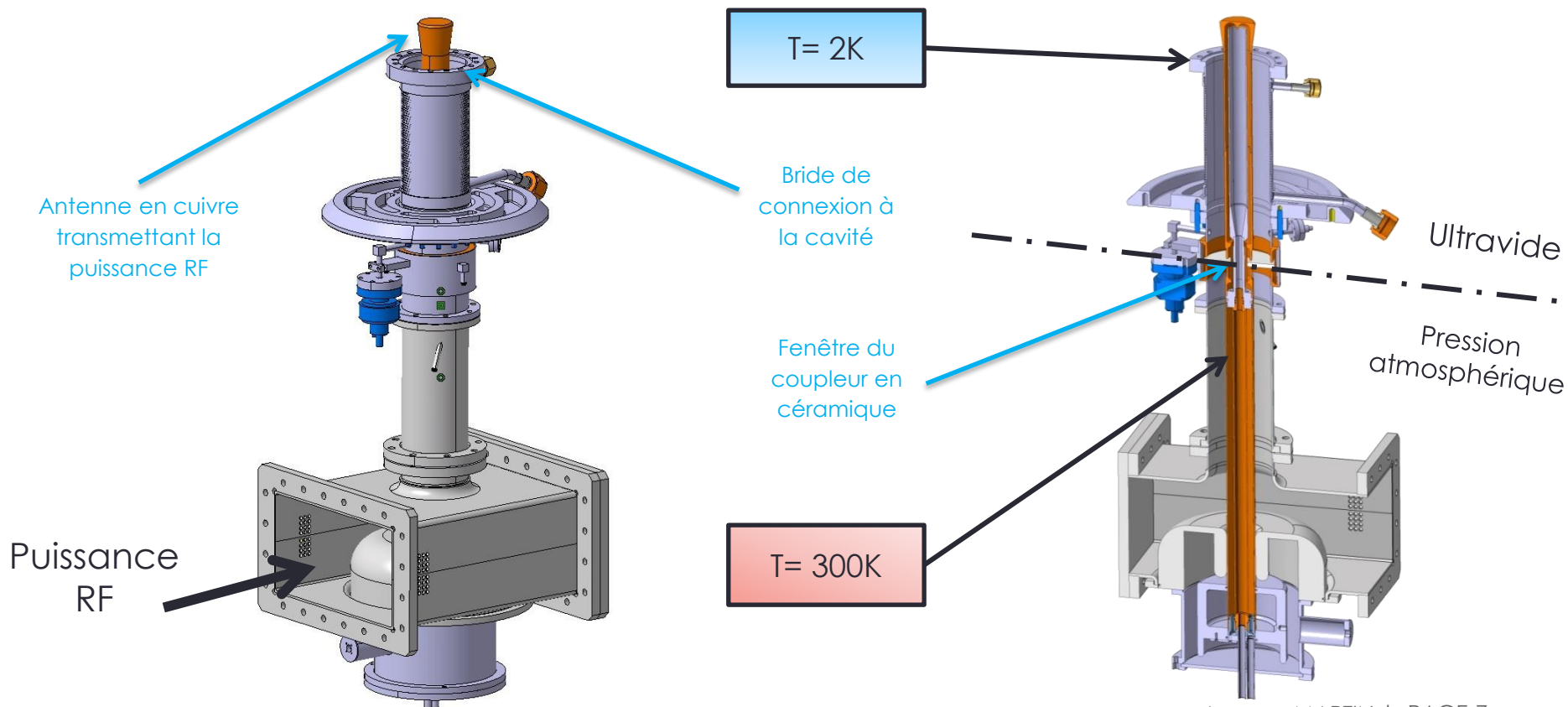
Coupe d'une cavité Medium β



Coupe d'une cavité Haut β

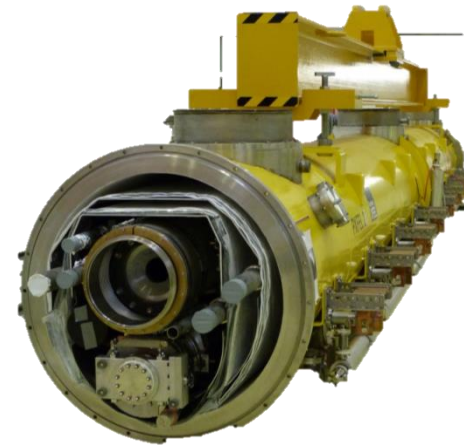
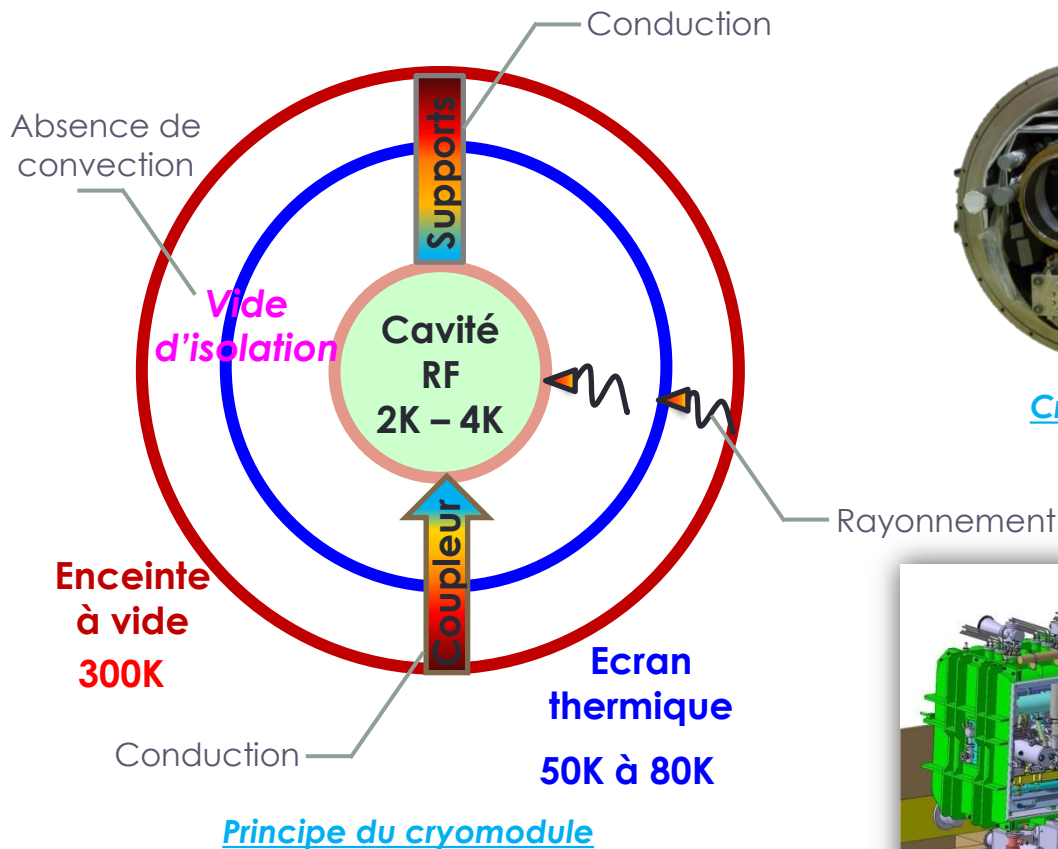
Le coupleur de puissance

- Coupleur monté sur une cavité.
- Identique au Medium et Haut β .



Le cryomodule

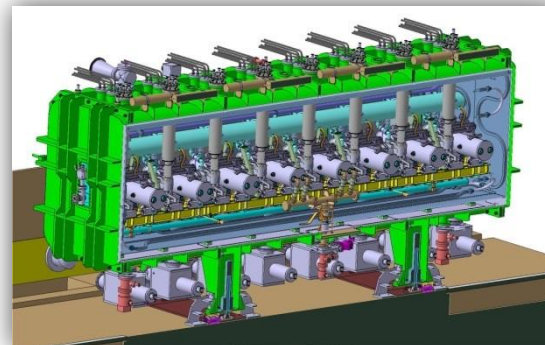
- Supporter les cavités supraconductrices dans un environnement thermalisé et sous vide.



Cryomodule XFEL



Cryomodule Spiral 2



Cryomodule IFMIF

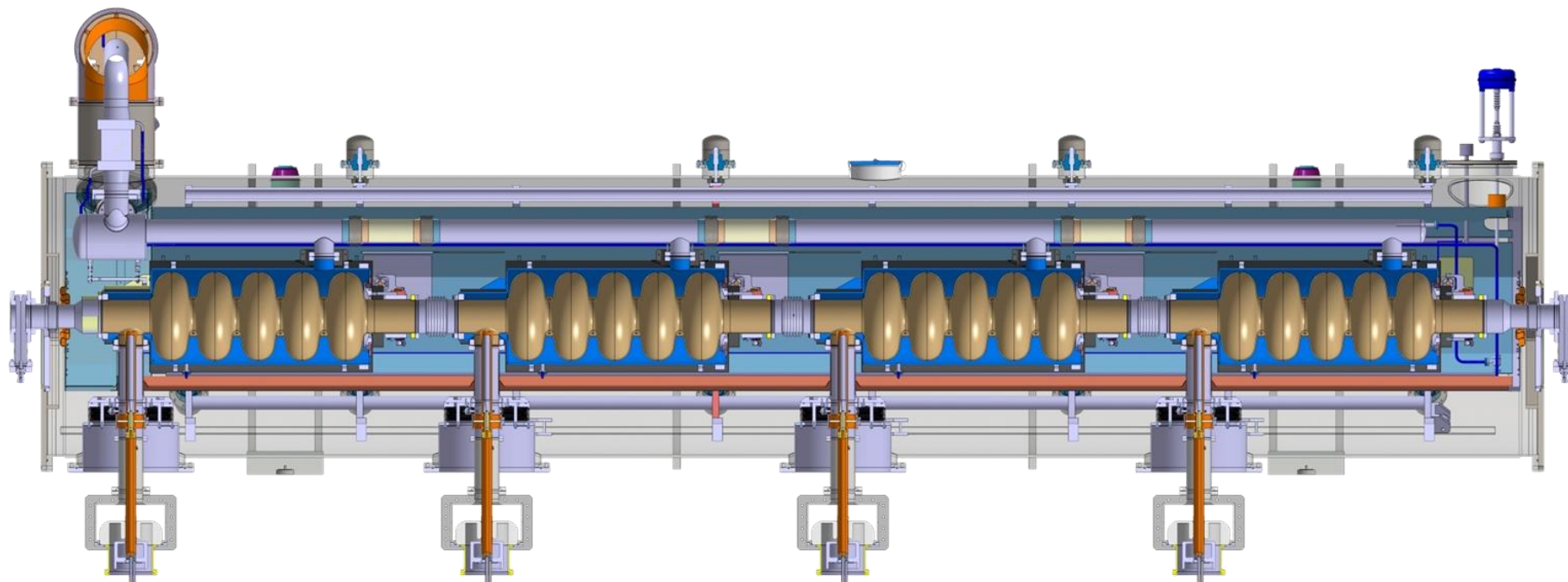
- Introduction
- **Le cryomodule prototype pour le projet ESS**
- Etude des phases d'assemblage
- Besoin et conception des outillages

Le cryomodule prototype pour le projet ESS

Cryomodule prototype ECCTD

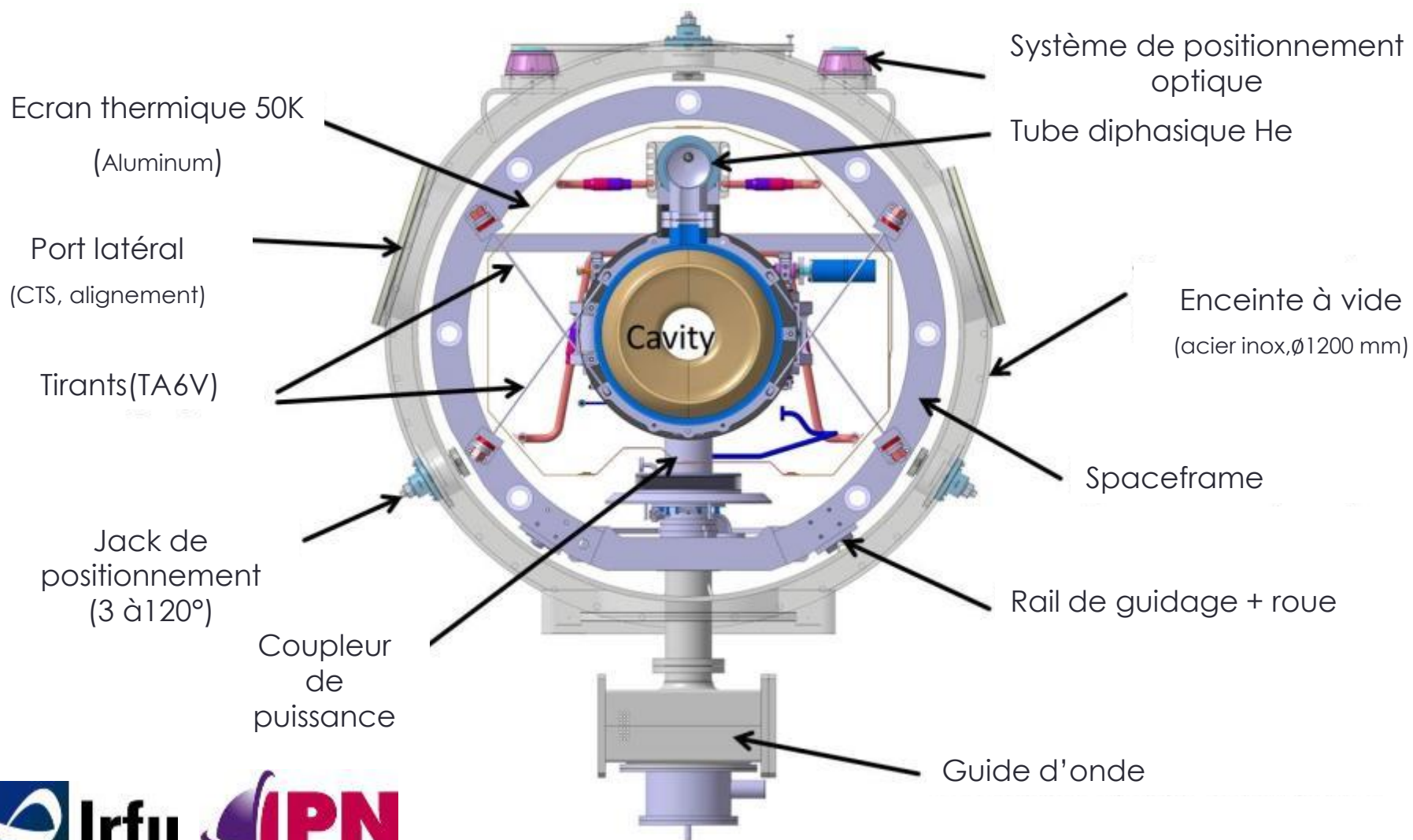
Elliptical Cavity Cryomodule Technology Demonstrator

- Design commun pour les cavités medium bêta et les haut beta
 - ✓ Petite différence de longueur entre les cavités 6-cellules medium et les 5-cellules haut beta.
 - ✓ Les composants principaux sont identiques : enceinte à vide, écran thermique, supports, systèmes d'alignement.
 - ✓ Seules petites différences: détails du circuit cryogénique, des soufflets inter-cavités.



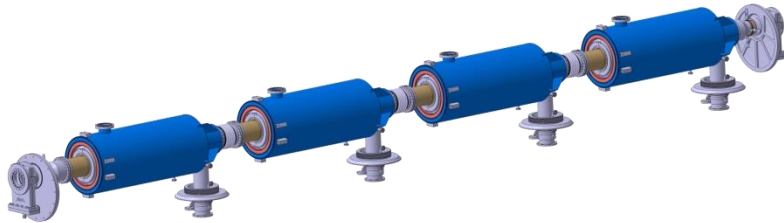
6600 mm

Le cryomodule prototype pour le projet ESS

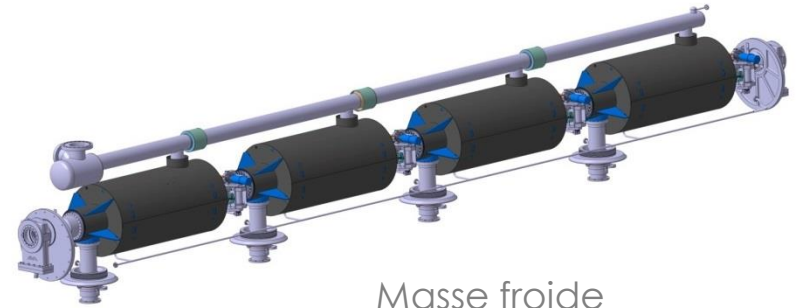


- Introduction
- Le cryomodule prototype ECCTD
- **Etude des phases d'assemblage**
- Besoin et conception des outillages

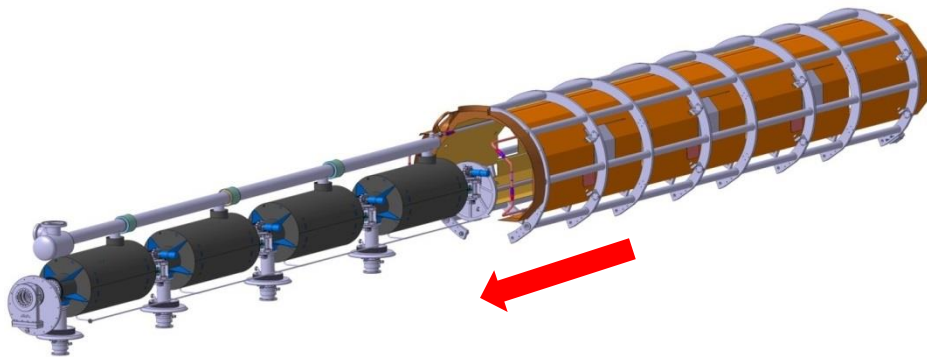
Grandes phases d'assemblage



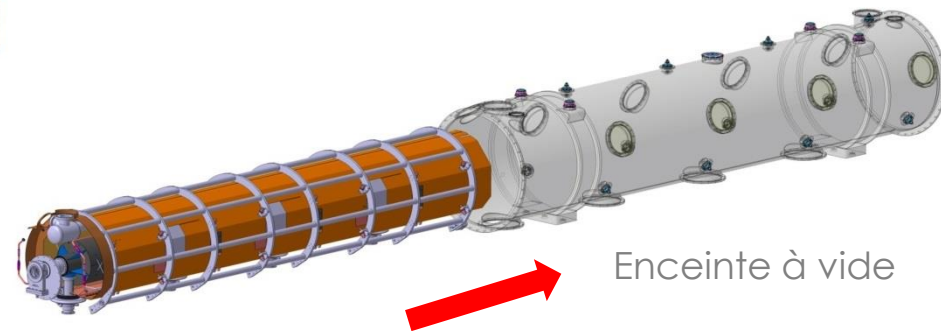
Assemblage du train de cavités
en salle blanche



Masse froide



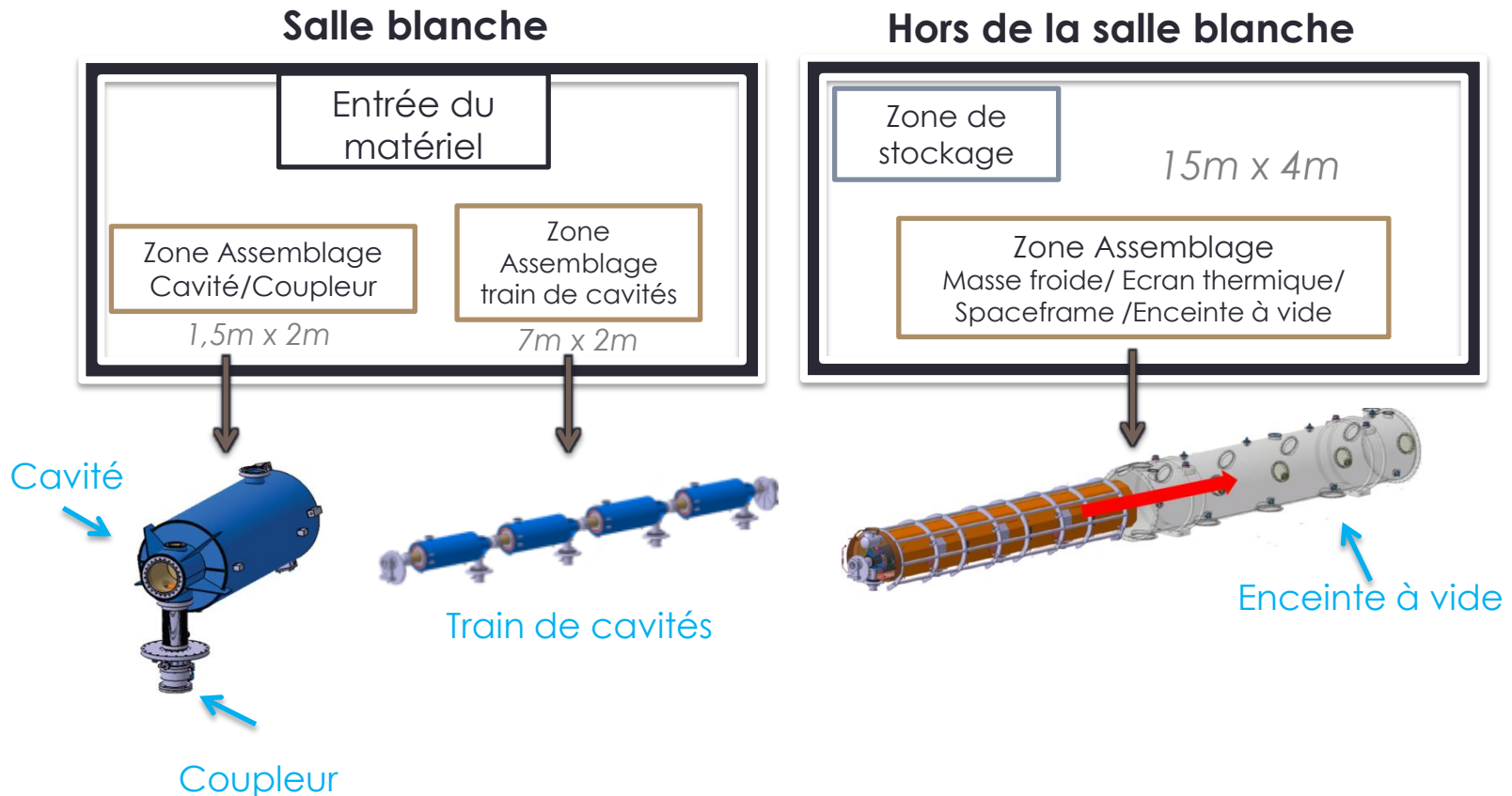
Spaceframe + Ecran thermique



Enceinte à vide

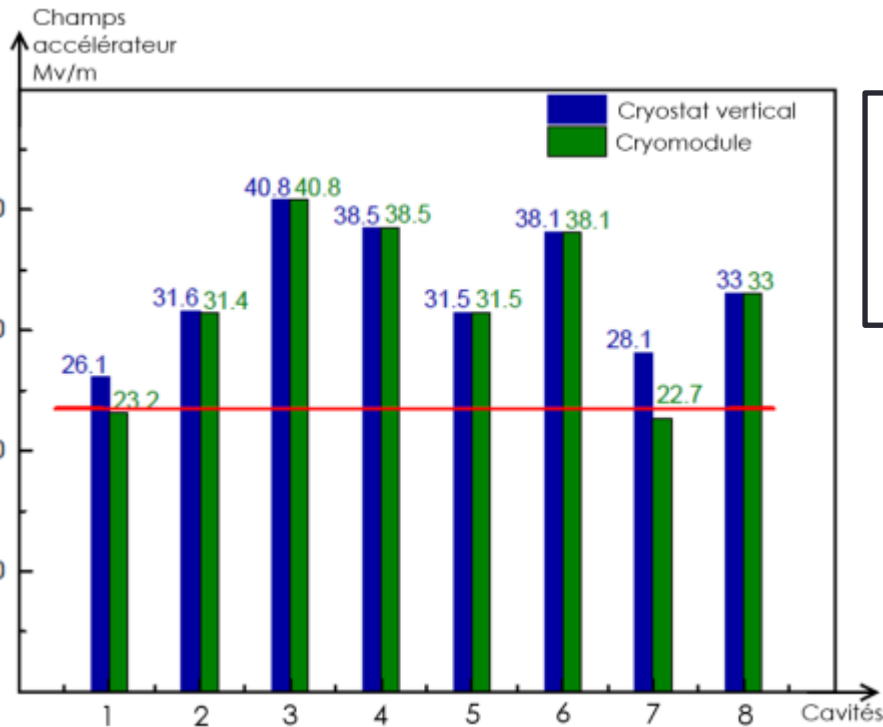
Installations requises pour l'intégration

- 2 grandes phases d'intégration.



Introduction du montage en salle blanche

- La contamination particulaire de surface influe sur la performance d'une cavité supraconductrice .
- Les cavités sont testées individuellement en cryostat vertical puis assemblées dans le cryomodule.
- Les performances entre le test en cryostat et l'assemblage peuvent être dégradées.



Entre le test et l'assemblage:

- Remise à la pression atmosphérique.
- Ouverture de la cavité.
- Montage du coupleur.

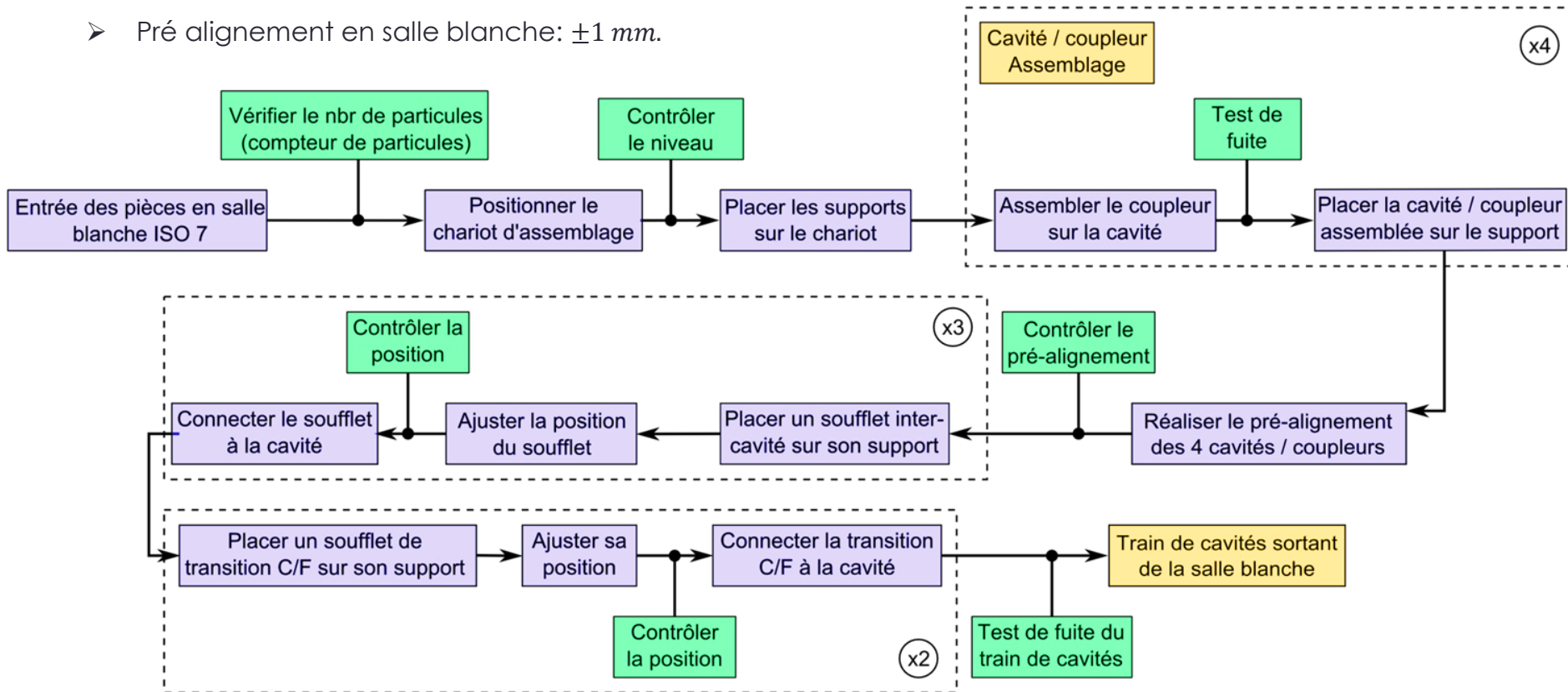
Opérations sensibles.
Risque de contamination du
vide faisceau

[Performances individuelles des cavités RF du cryomodule XFEL XM-3 assemblé à Saclay](#)

Etude des phases d'assemblage

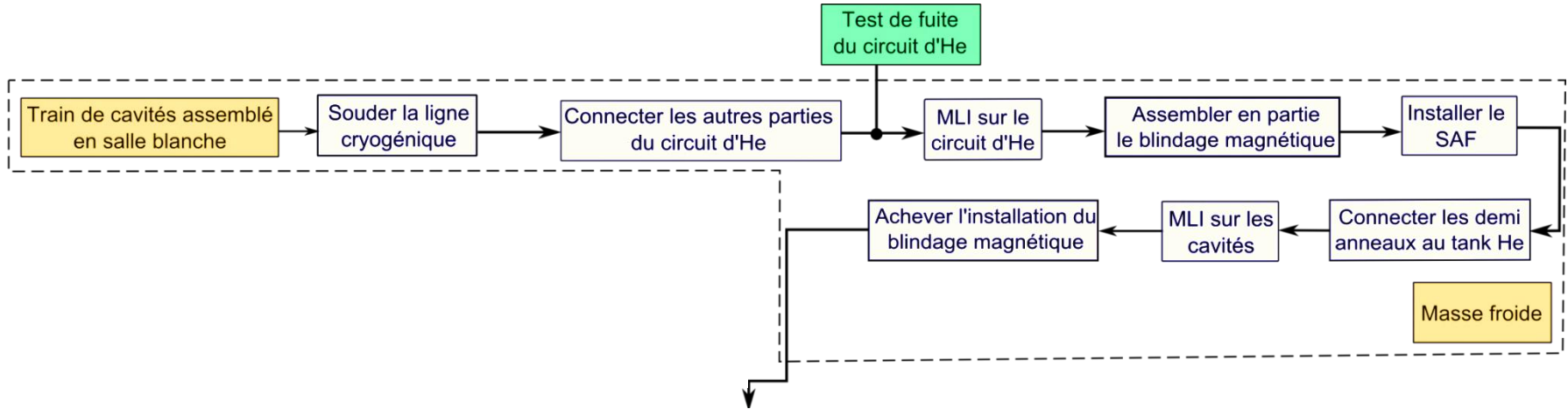
Procédure d'assemblage en salle blanche

- Procédure pensée pour limiter le risque de contamination.
- Les cavités et les coupleurs sont laissés à l'air le moins longtemps possible.
- Pré alignement en salle blanche: ± 1 mm.



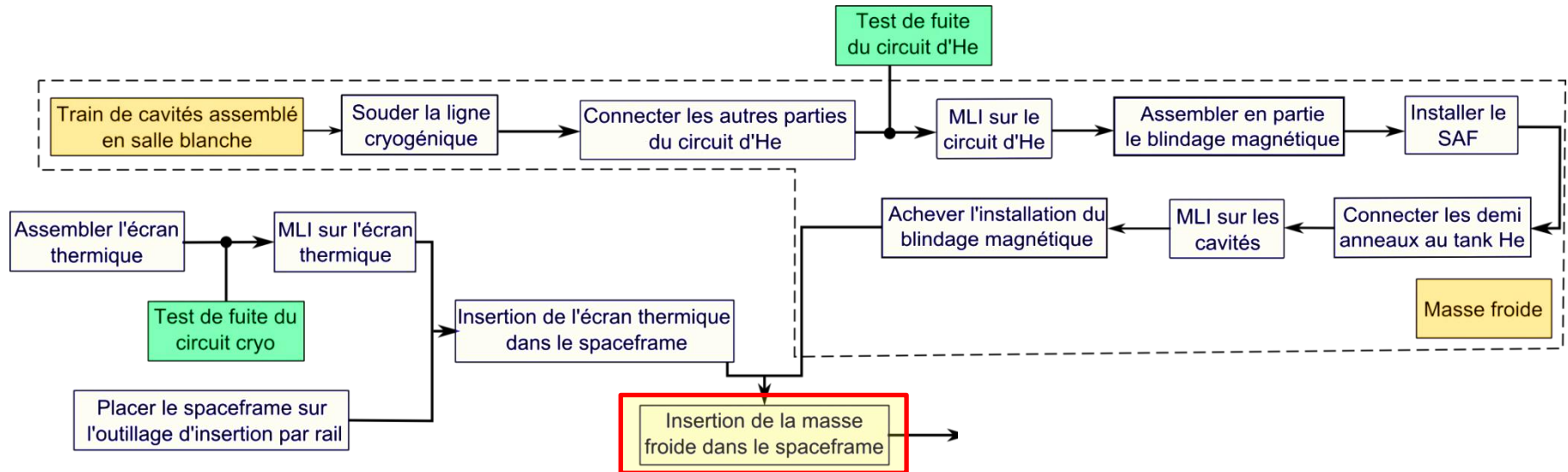
Etude des phases d'assemblage

Procédure d'assemblage hors salle blanche



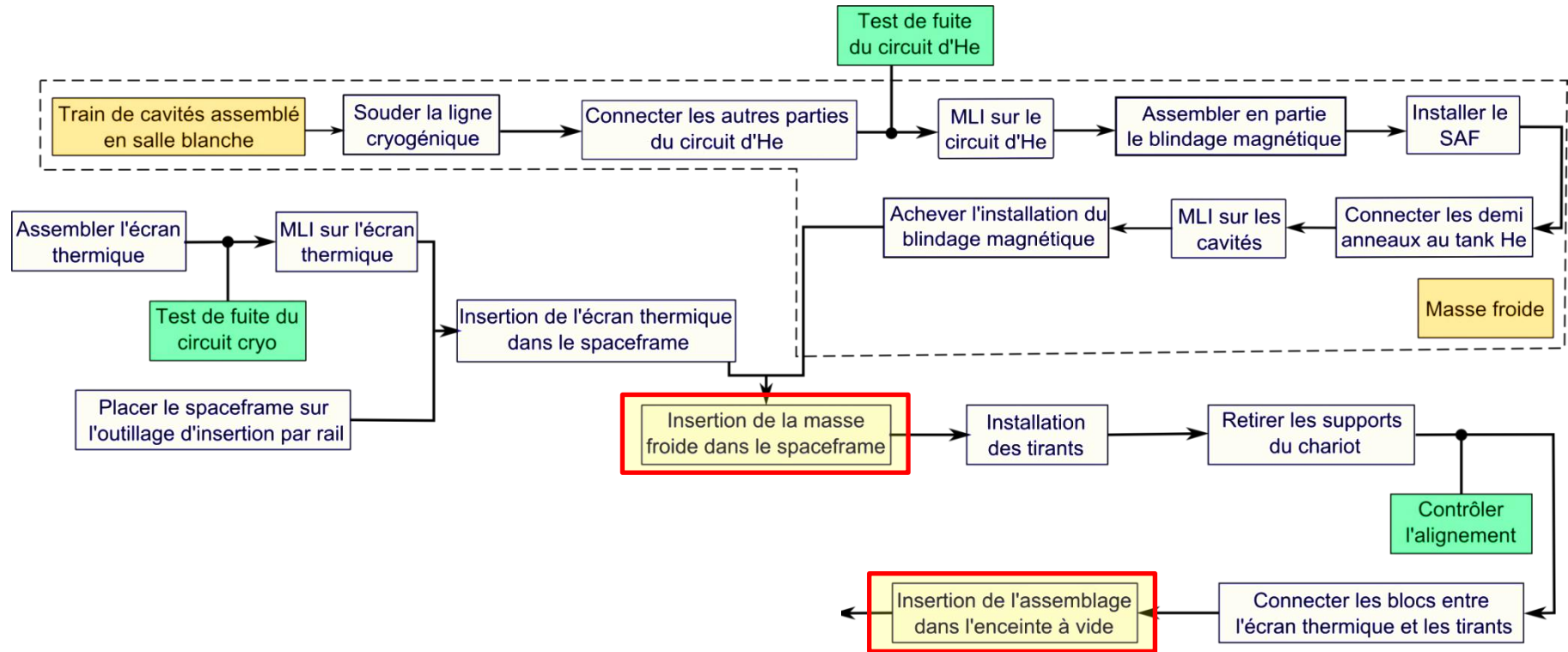
Etude des phases d'assemblage

Procédure d'assemblage hors salle blanche



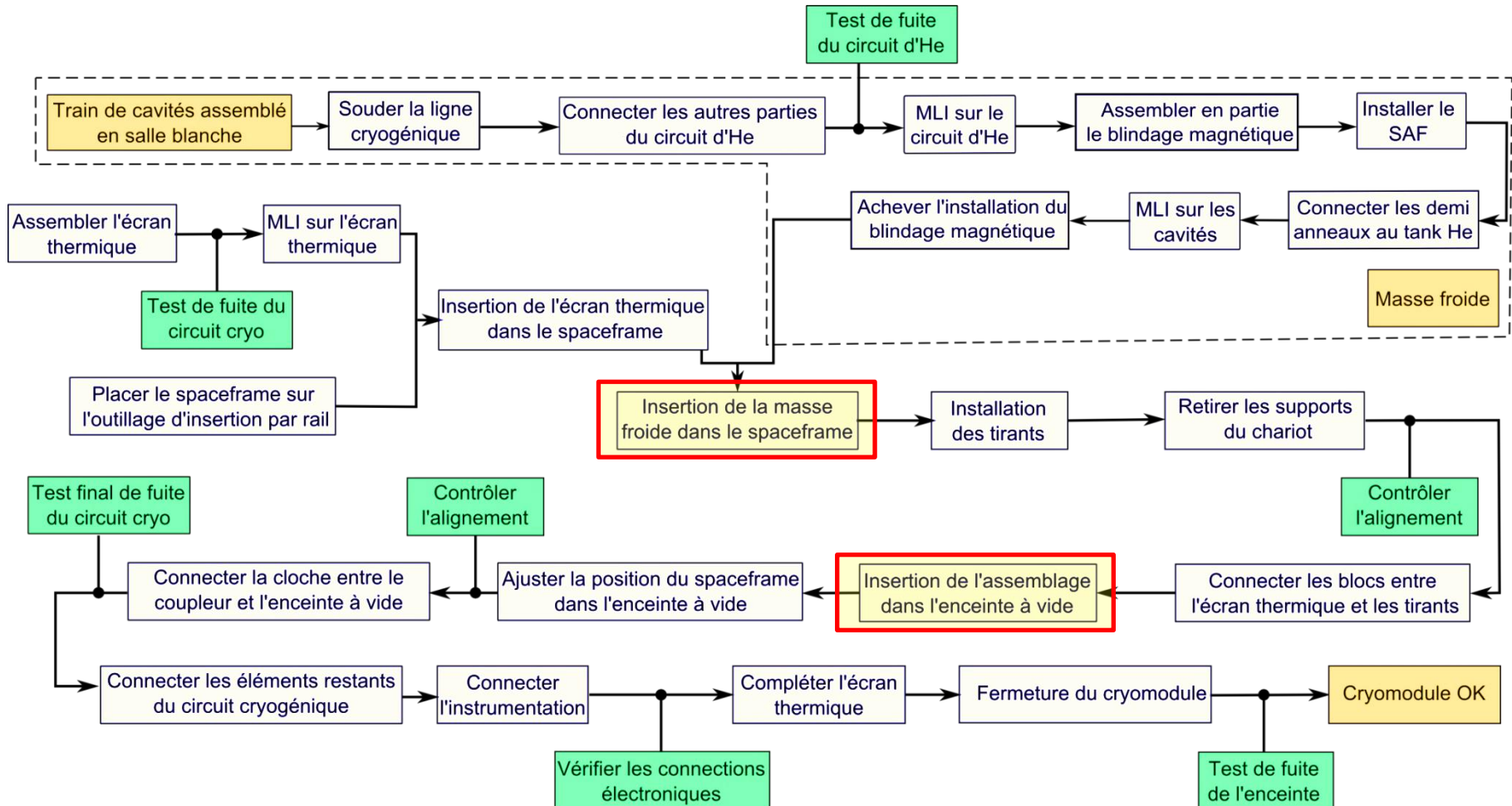
Etude des phases d'assemblage

Procédure d'assemblage hors salle blanche



Etude des phases d'assemblage

Procédure d'assemblage hors salle blanche

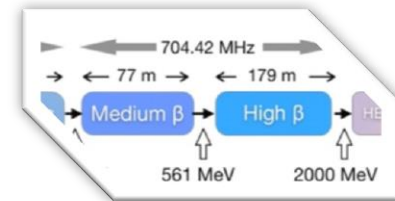


- Introduction
- Le cryomodule prototype ECCTD
- Etude des phases d'assemblage
- **Besoin et conception des outillages**

Les contraintes de conception

Contrainte générale:

- Outillage générique : compatible Haut et Medium béta.



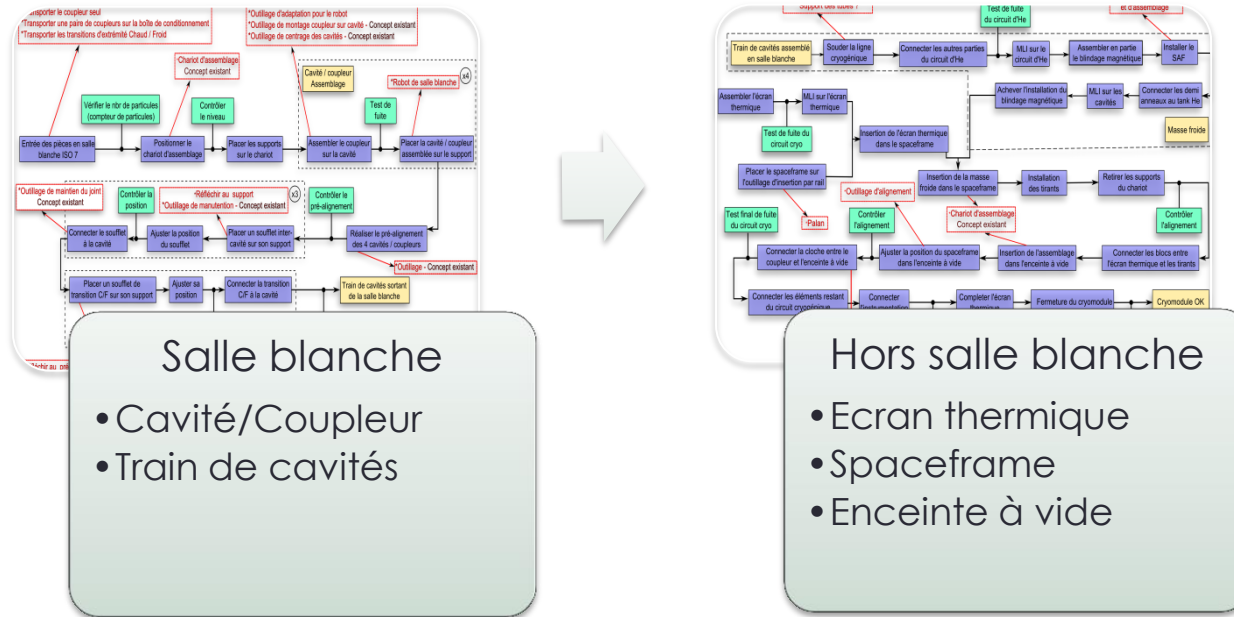
Contrainte de salle blanche

- Absence de lubrifiants graisseux.
- Choisir des couples de matériaux adaptés.
- Intégration sous flux laminaire: ne pas déplacer de poussière dans les zones critiques.
- Géométrie simple, facilité de nettoyage.



Prise en compte des contraintes dès la conception

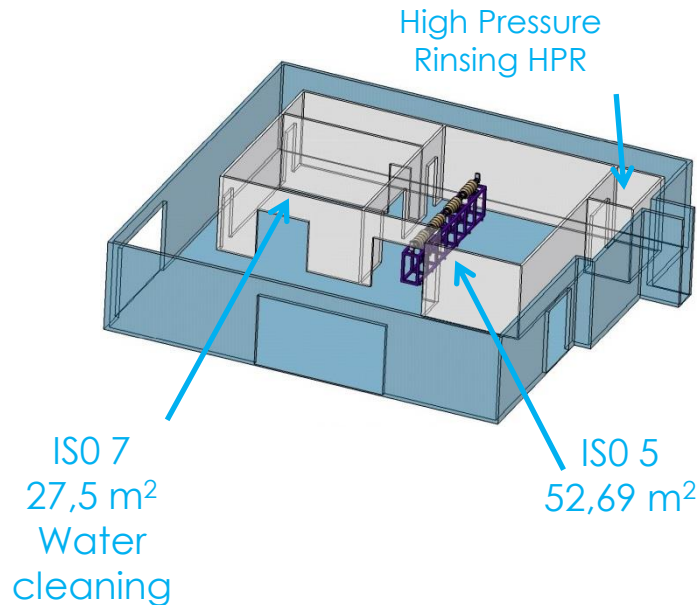
Le besoin en outillages: la démarche



Cahier des charges, listes de contraintes, spécification de conception.

Les contraintes de conception: la salle blanche

- Salle blanche bâtiment 124 E: concentration particulaire , température et taux d'humidité contrôlé.
- 2 pièces: ISO7 et ISO5.





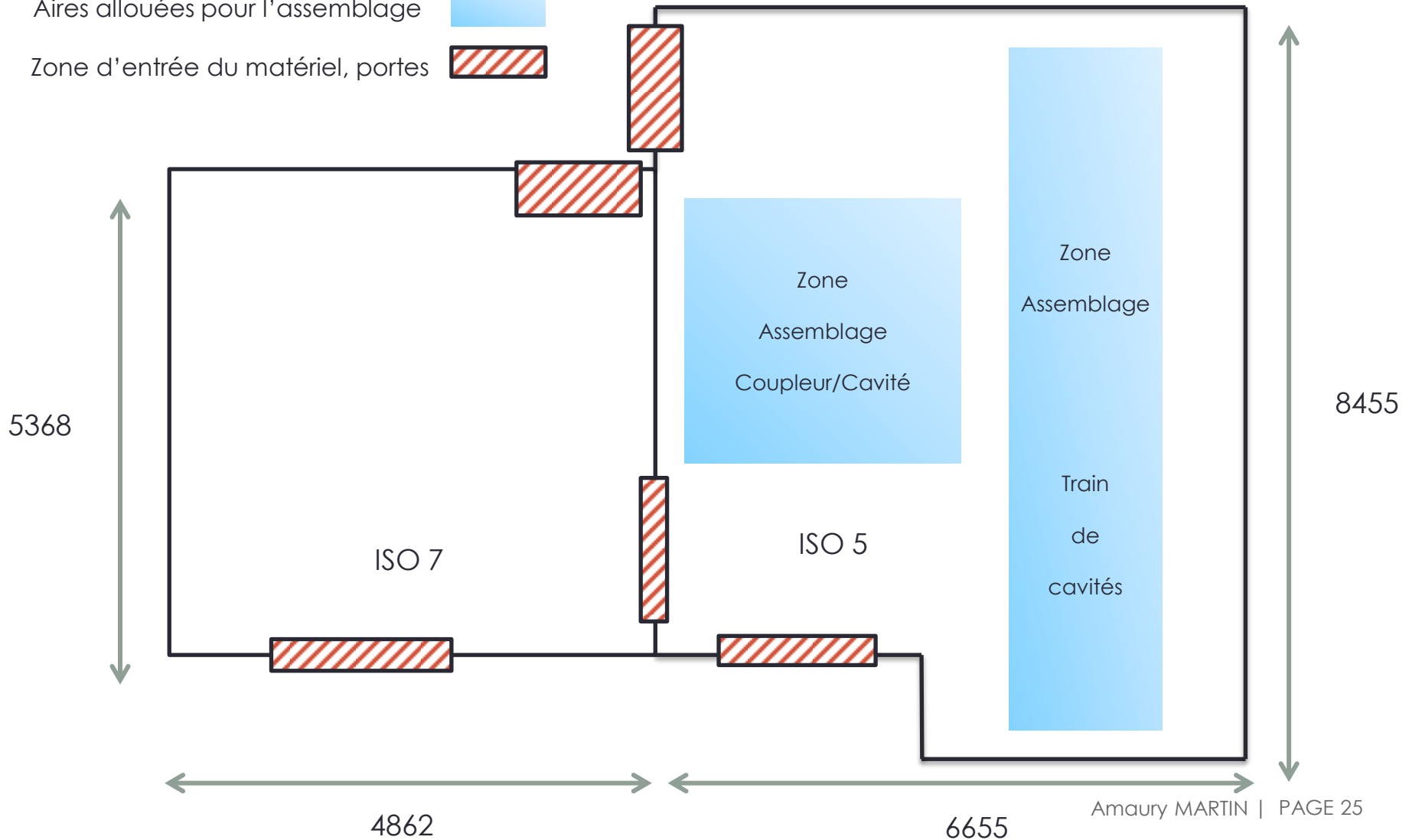
Salle blanche bâtiment 124 E, CEA Saclay, janv. 2013

Salle Blanche ISO5

- Préparation de la cavité pour le test vertical
- Assemblage du coupleur sur la cavité
- Assemblage du train de cavités en salle blanche

Espace de travail en salle blanche

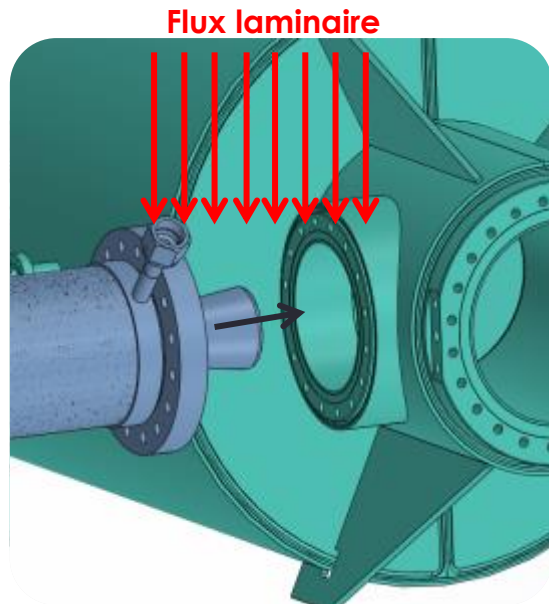
- Aires allouées pour l'assemblage 
- Zone d'entrée du matériel, portes 



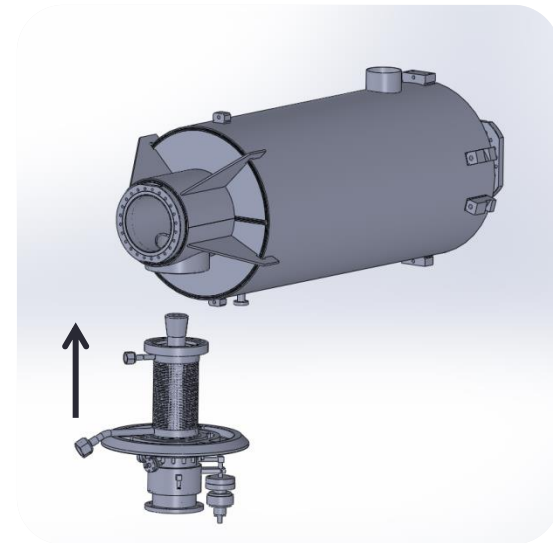
Assemblage Cavité/Coupleur

Etat de l'art:

- Assemblage bride à bride sous flux laminaire.



Flux laminaire tangent aux brides

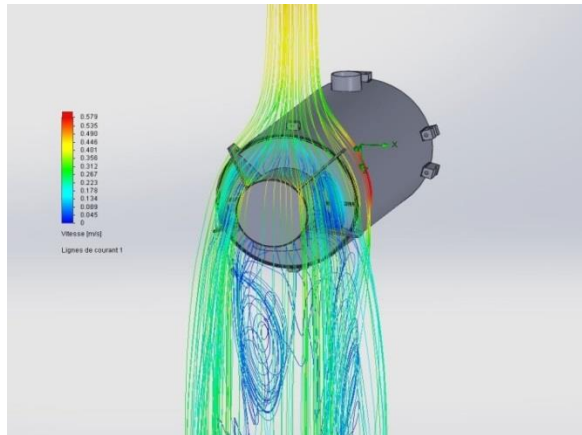


Montage vertical du coupleur

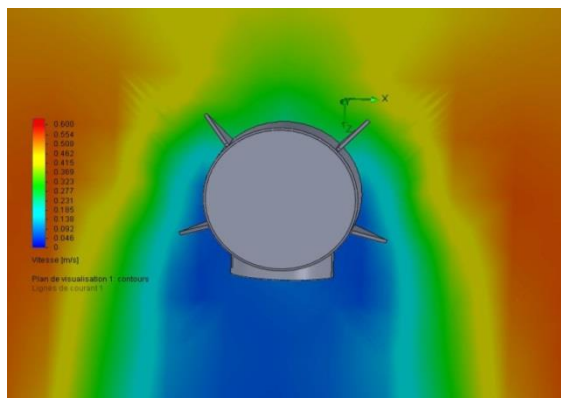
Assemblage du coupleur sur la cavité

- Flux d'air laminaire, vitesse verticale descendante de 0,5 m/s.

Montage vertical

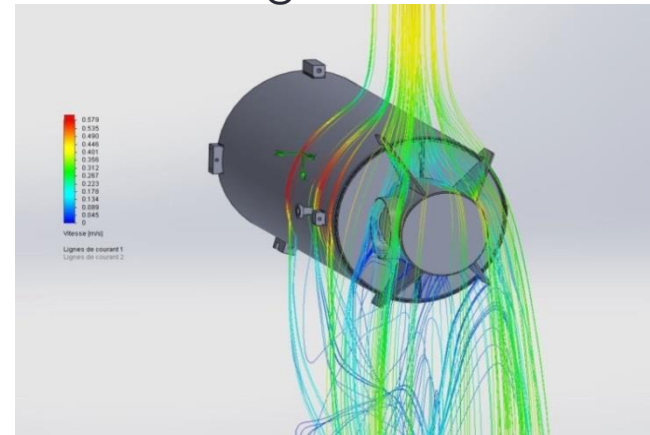


Ligne de courant - Vitesse

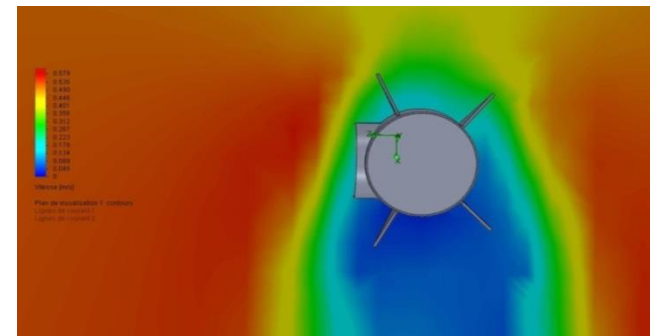


Contour - Vitesse

Montage horizontal



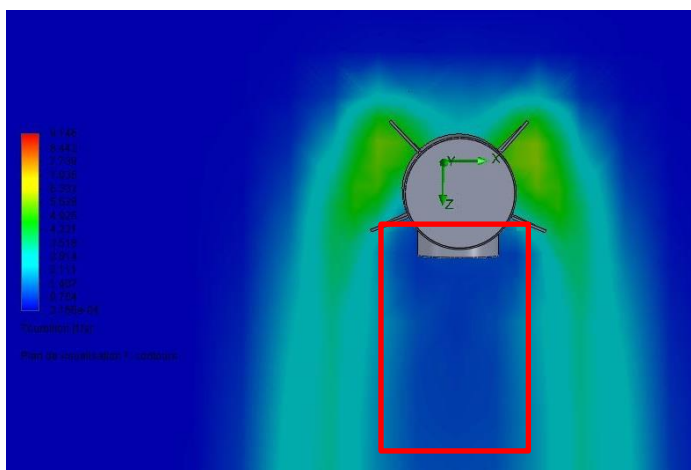
Ligne de courant - Vitesse



Contour - Vitesse

Assemblage du coupleur sur la cavité

Montage vertical

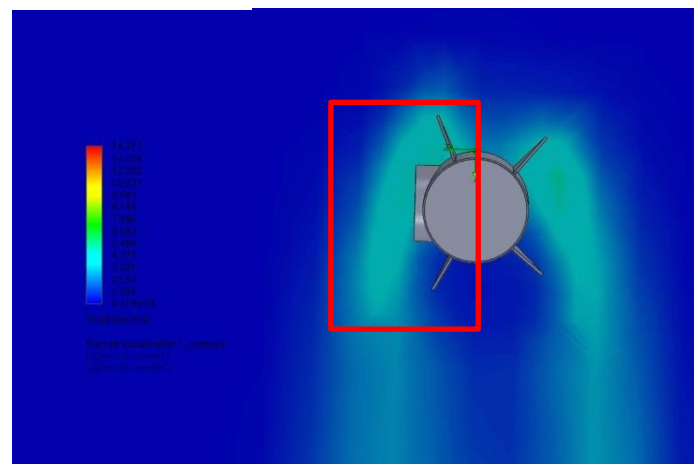


Contour - tourbillon/s

- Absence de tourbillons dans la zone du port coupleur.

• **Risque de pollution minimisé**

Montage horizontal

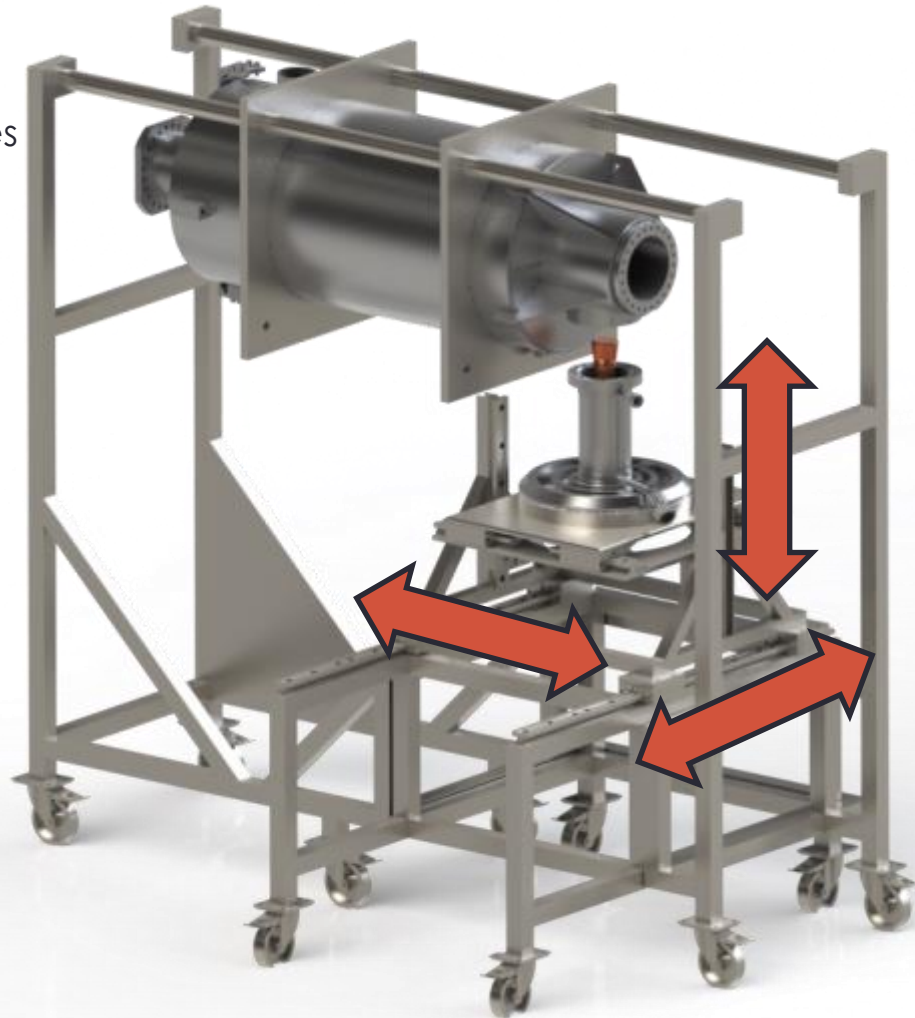


Contour - tourbillon/s

- Présence de tourbillons dans la zone du port coupleur.

Outillage conceptuel du montage du coupleur sur la cavité

- Outillage compatible pour les 2 types de cavités.
- Déplacement et rotation sur 3 axes.



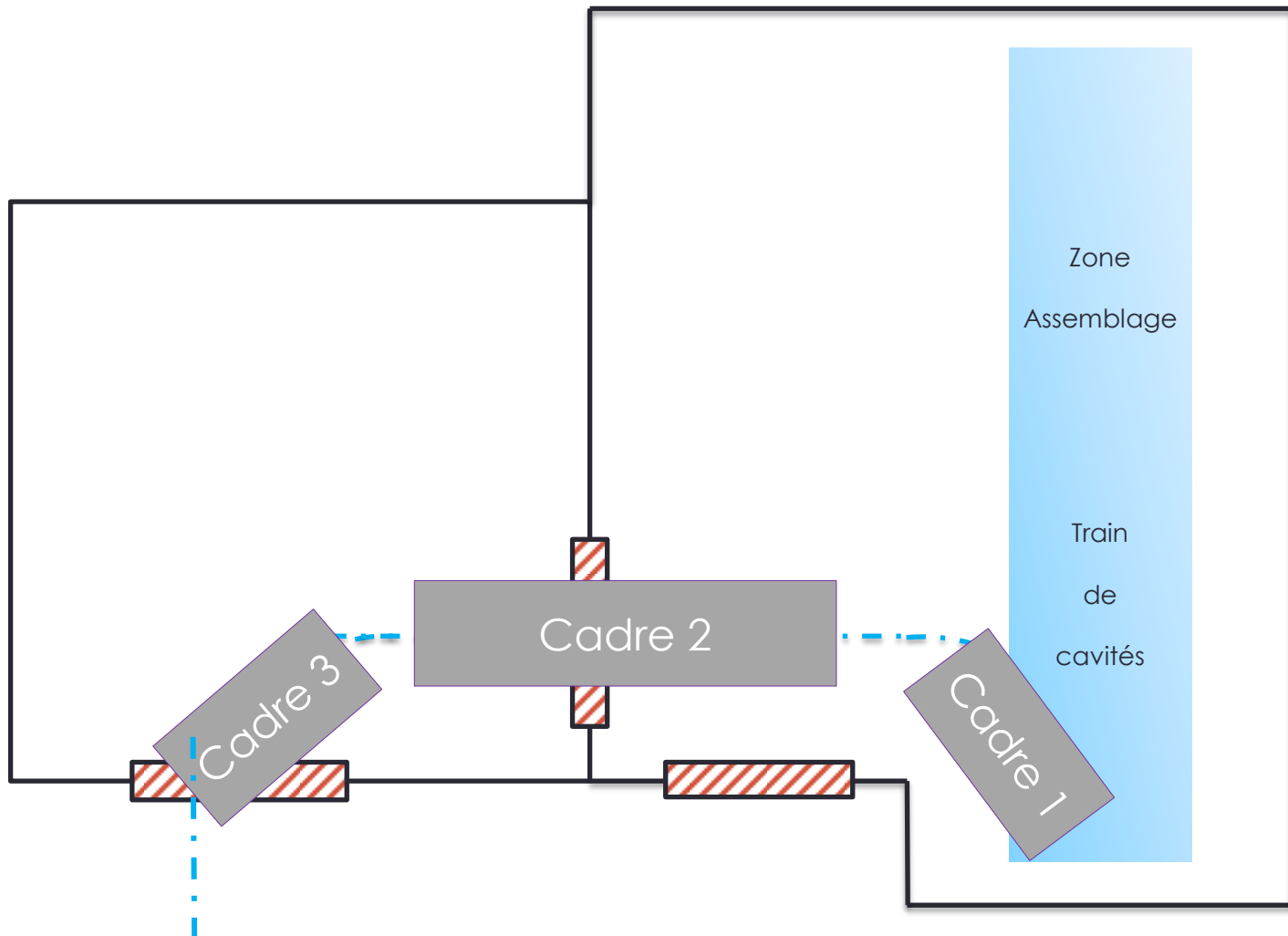
Assemblage du train de cavités



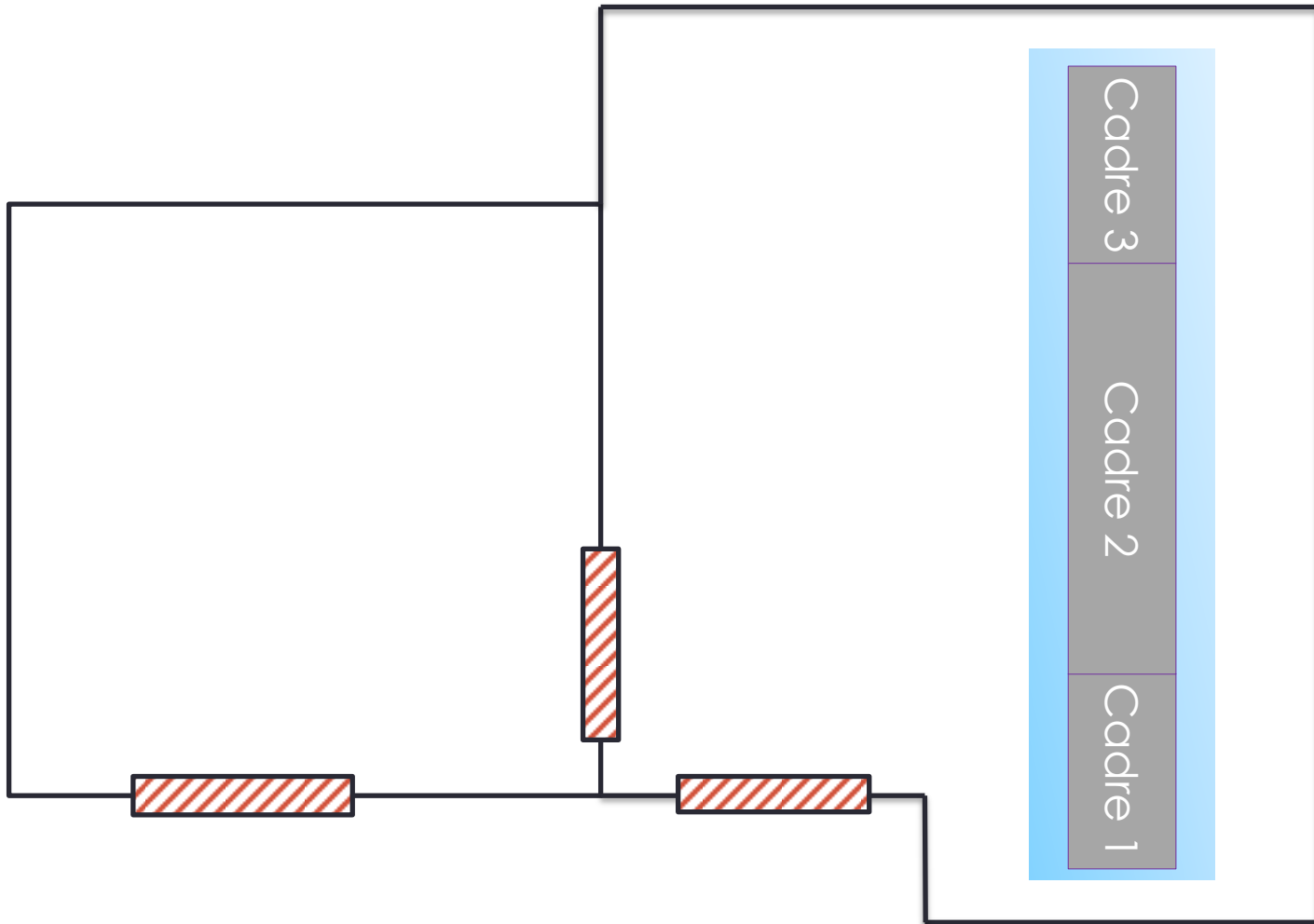
- Besoin de déplacer longitudinalement chaque cavité/coupleur (pré alignement).
- Outillage composé de chariots.

Entrée du support d'assemblage du train de cavités

- Cadre composé de 3 morceaux.



Support d'assemblage du train de cavités en ISO 5



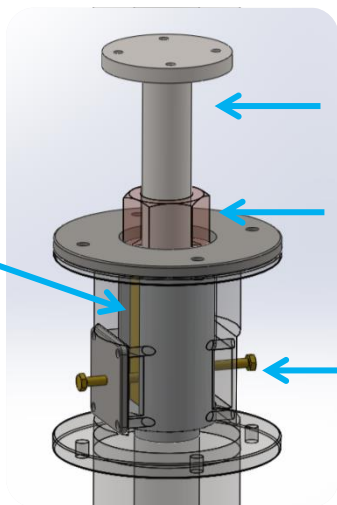
Assemblage du train de cavités: le chariot

- Guidage linéaire.
- Longueur totale de rail: 7,5m. Ecartement: 500mm.
- Poutre profilées simple pour le nettoyage.
- Roulettes pivotantes: nombre déterminé en fonction des dalles en ISO5.
- Pieds de nivellement, nécessaire pour ajuster le niveau en vue de l'alignement.



Assemblage du train de cavités: les poteaux

- Poteau permettant de régler la position de la cavité sur 3 axes.
- Tendeur réglable : utilisation pour les 2 types de cavités.
- Rotation de la cavité possible.



Tige

Ecou

Vis de réglage

Salle blanche ISO 5



Installation du chariot central



Installation des chariots d'extrémités

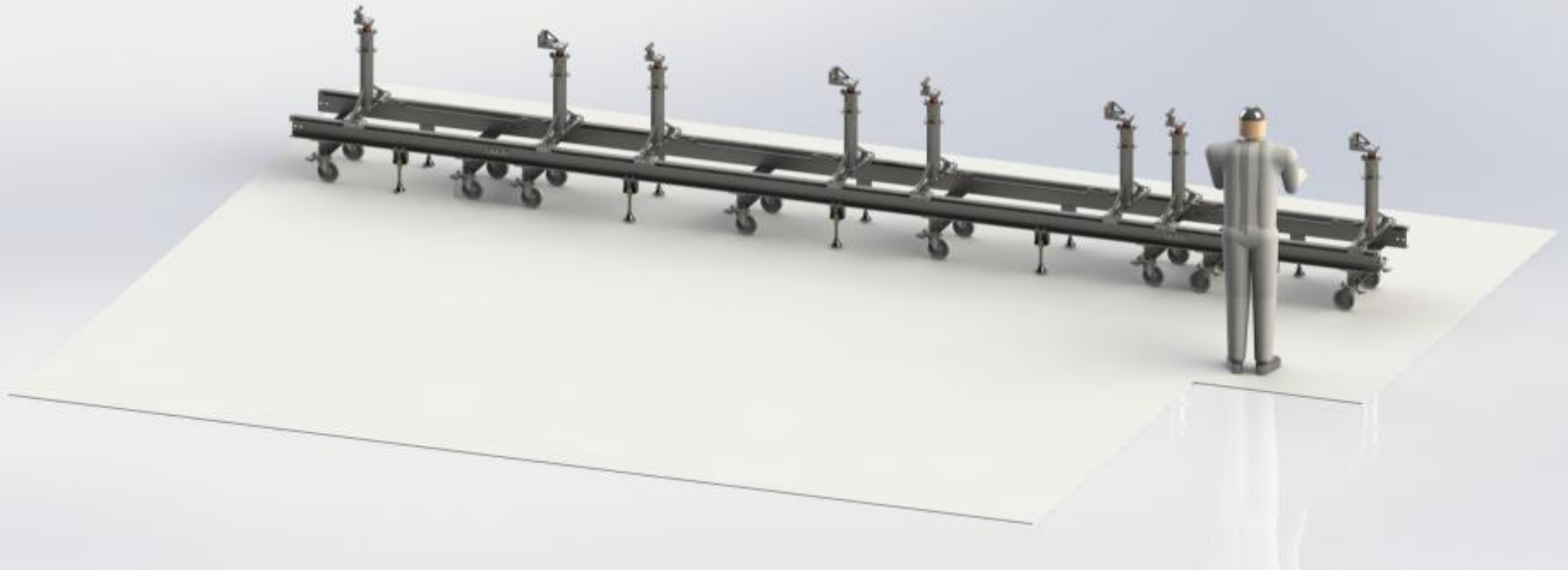


Installation des chariots d'extrémités



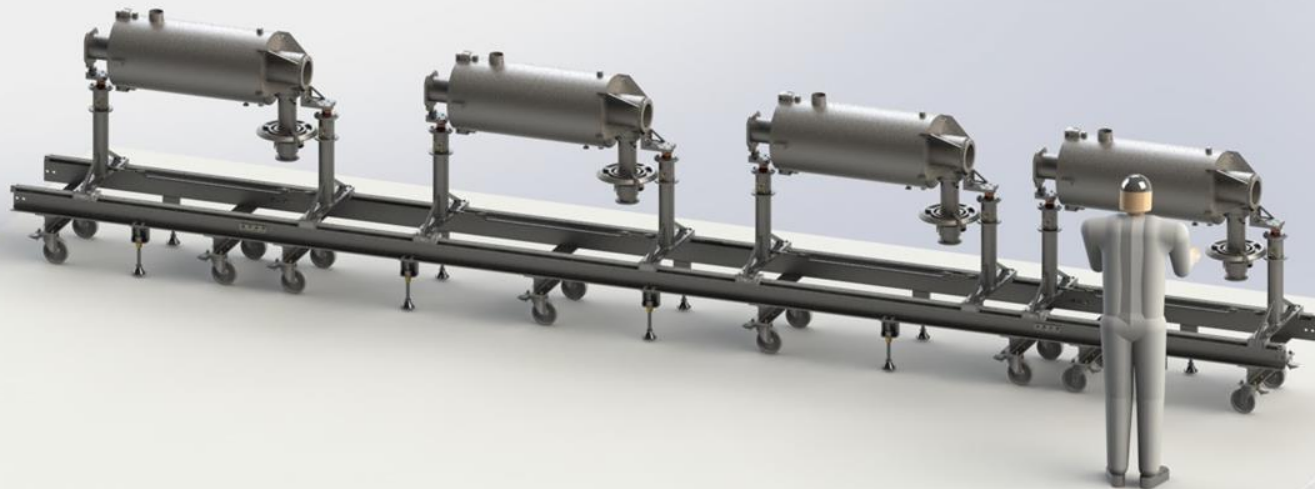
- Réglage du niveau de l'outillage.

Installation des poteaux de support

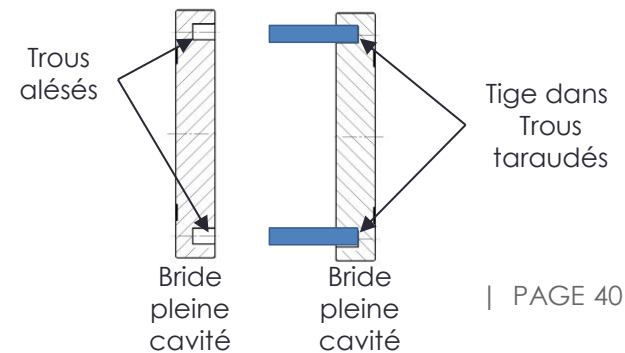


- Une paire de poteaux par cavité.

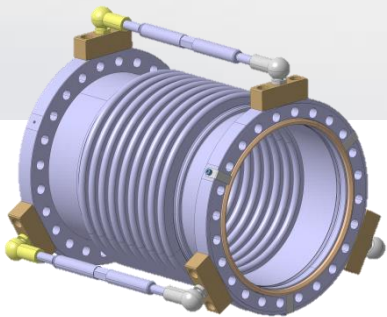
Dépose des Cavités/Coupleurs et pré alignement



- Débattement des cavités sur les rails.
 - Brides de l'axe faisceau fermées.
 - Réalisation du pré alignement: outillage d'alignement.
- On utilise 2 brides pleines, une avec des trous taraudés localisés, l'autre avec des trous alésés localisés, et des tiges en partie filetées pour l'alignement.



Montage des soufflets inter-cavités



- Outillage de maintien du soufflet.

Montage des soufflets de transitions



Séquence d'assemblage en salle blanche

Préparation pour la sortie du train

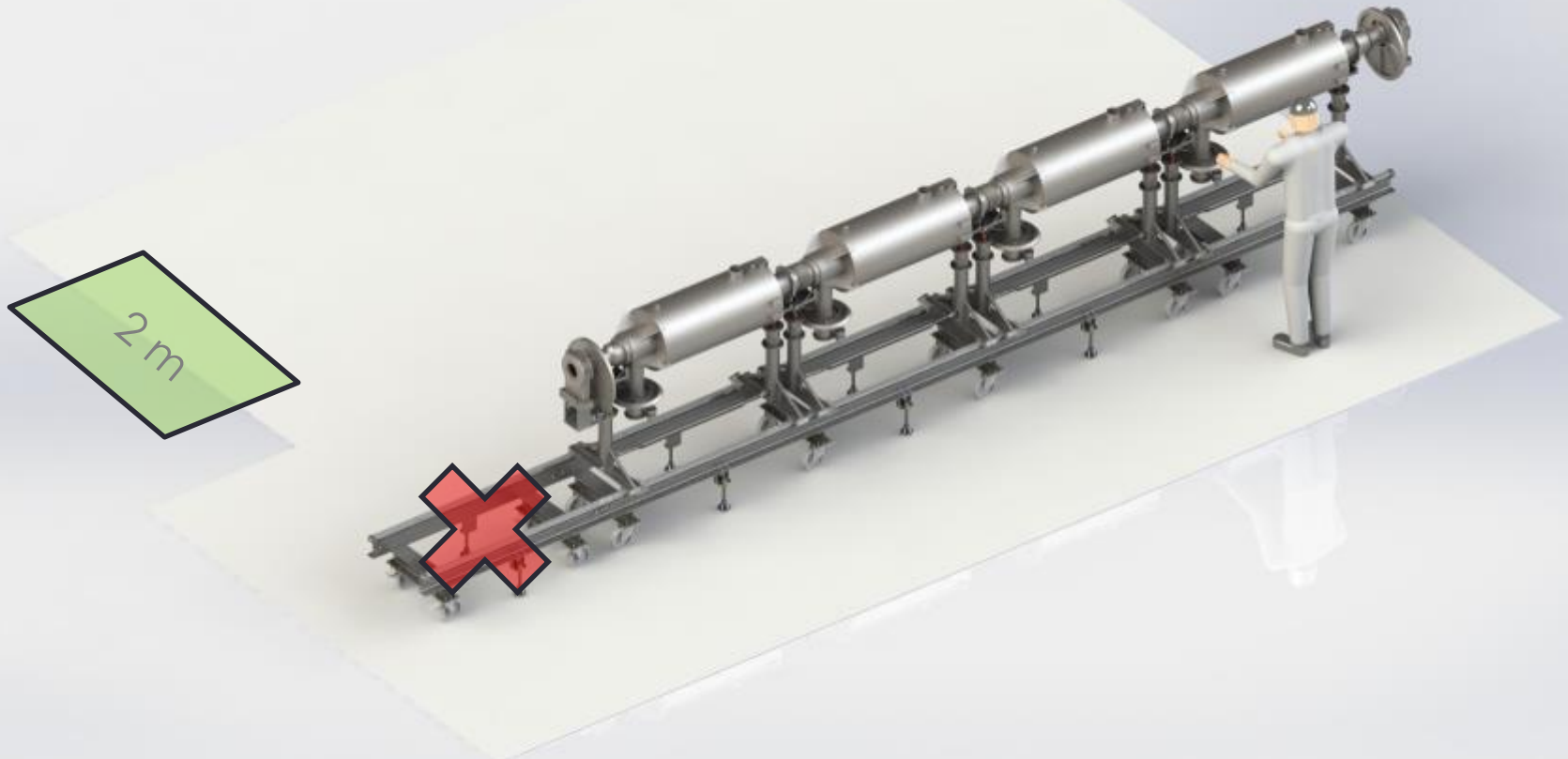


Préparation pour la sortie du train



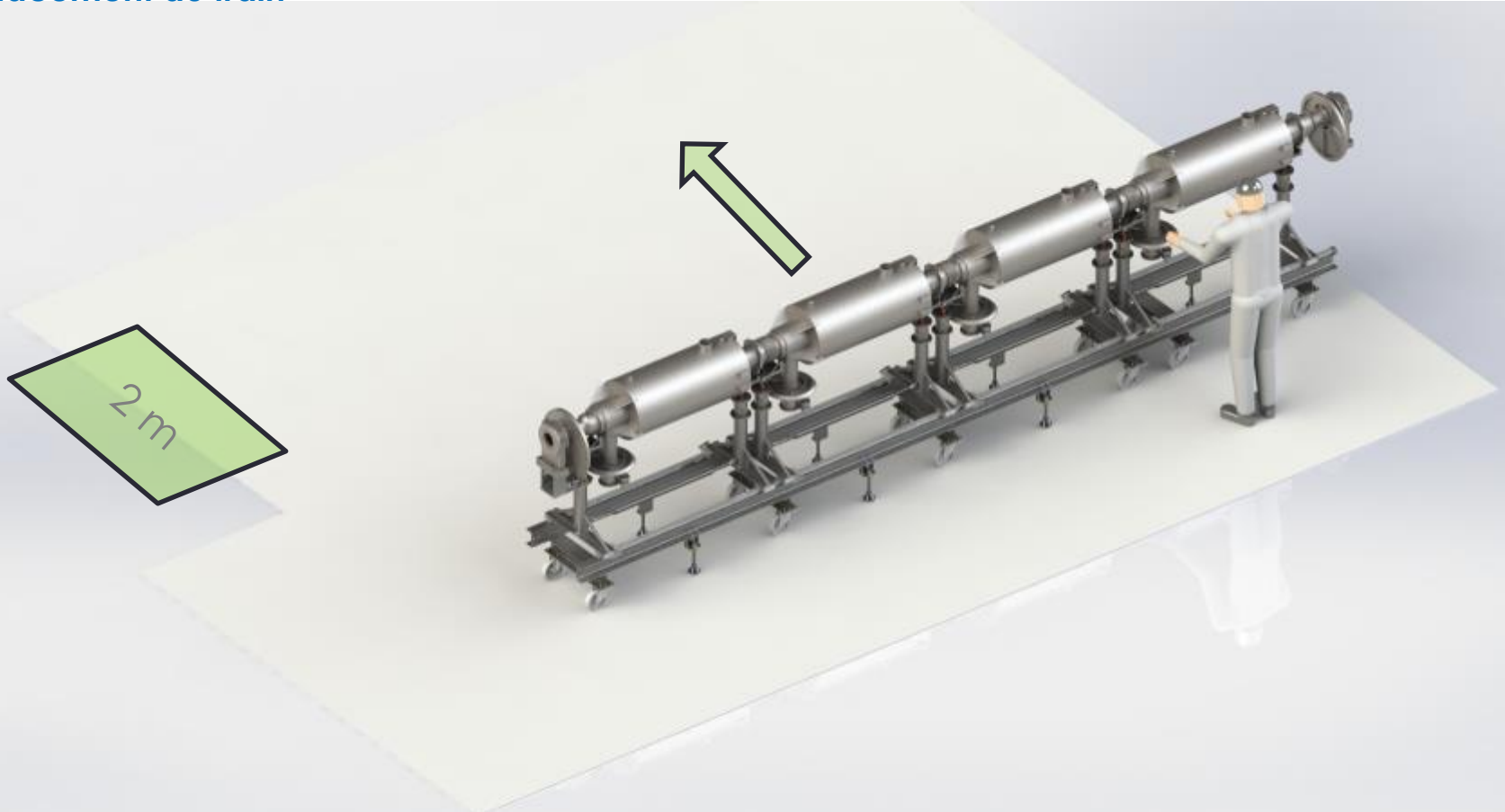
- Déplacement du train de cavités en buté des rails.

Préparation pour la sortie du train

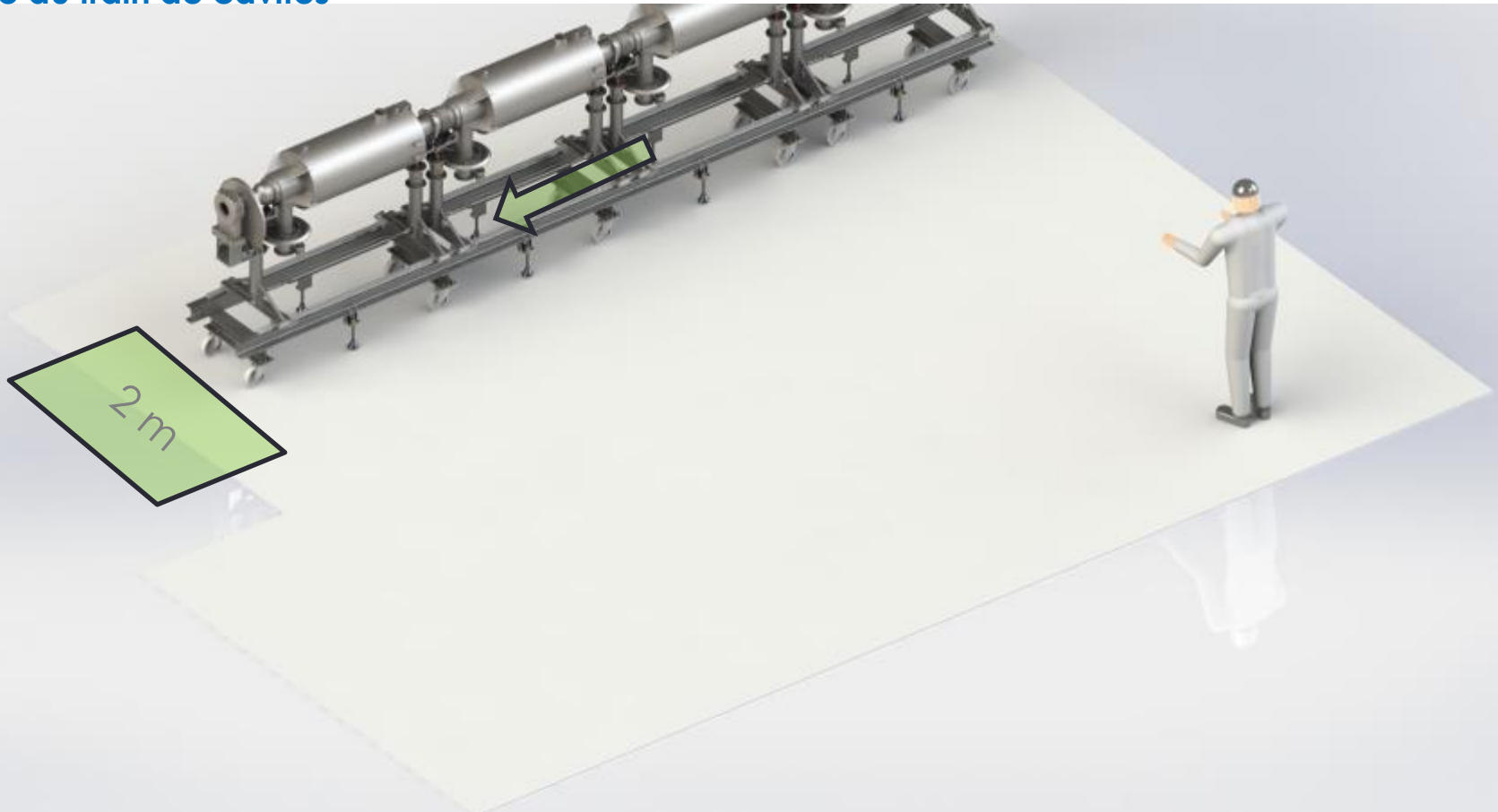


- On retire un chariot d'extrémité.

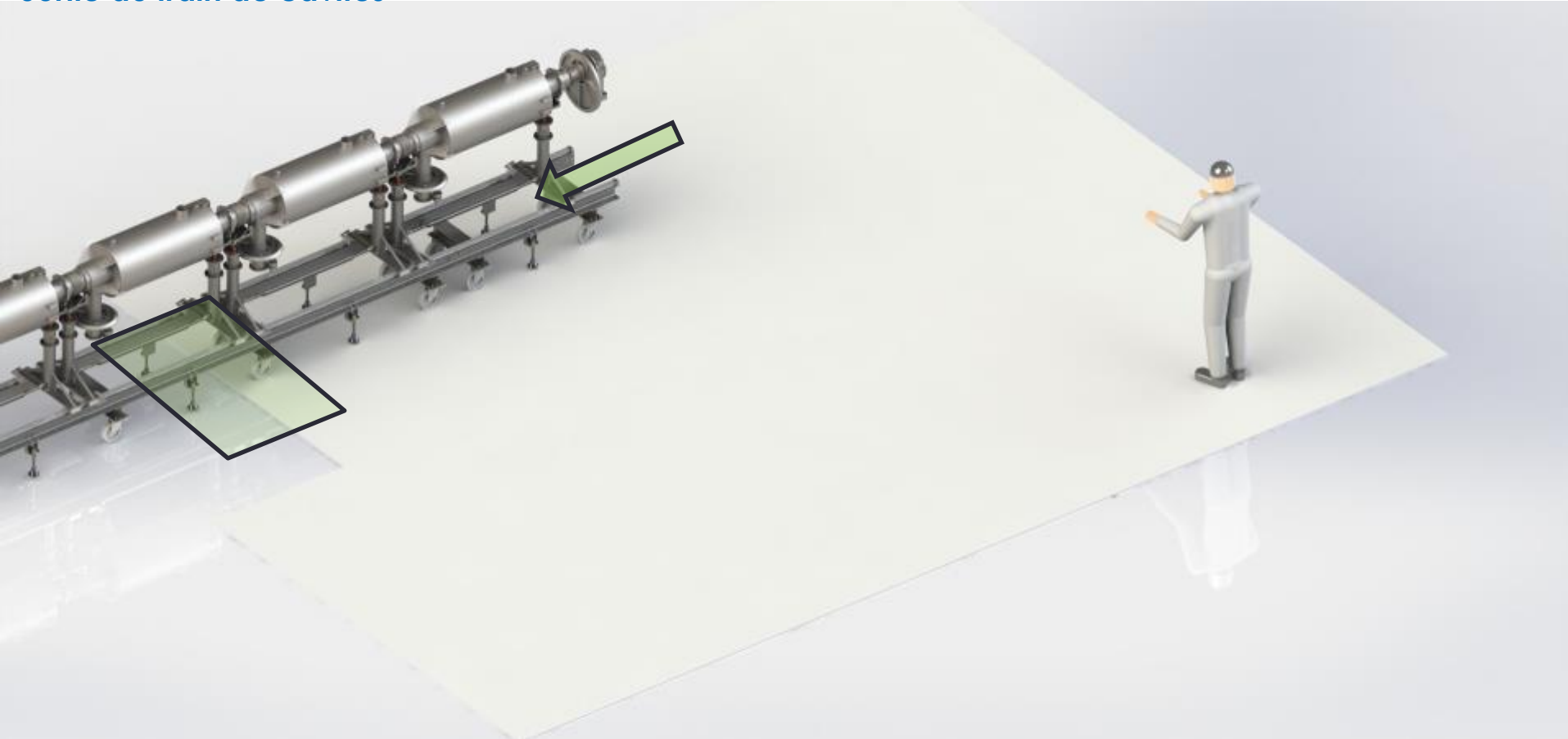
Déplacement du train



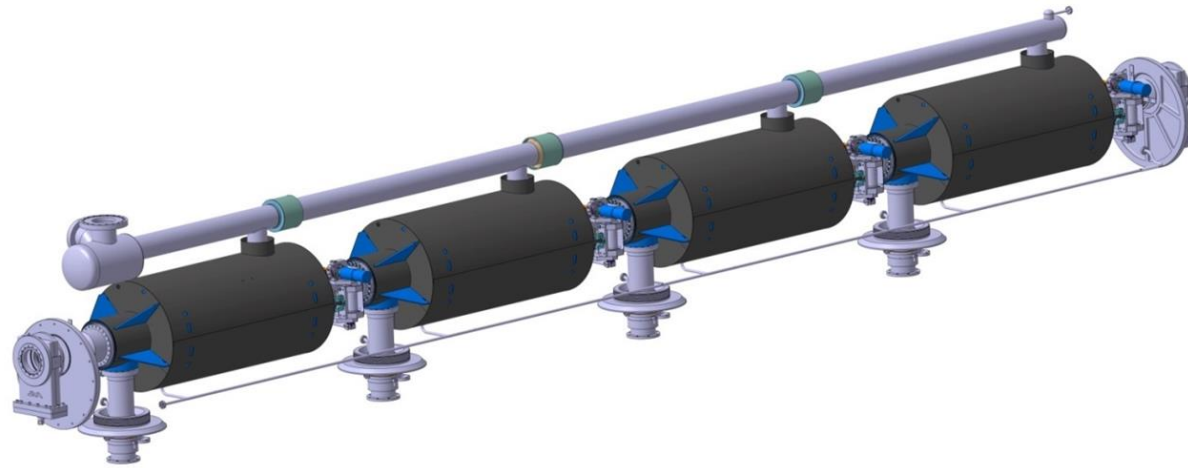
Sortie du train de cavités



Sortie du train de cavités

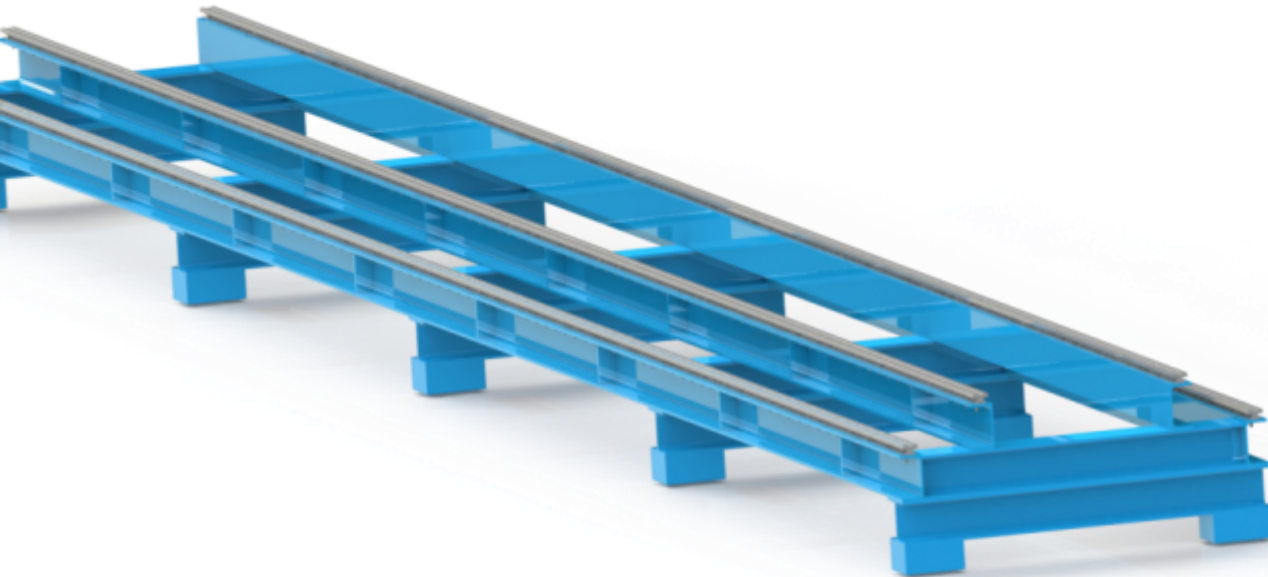


Assemblage de la masse froide



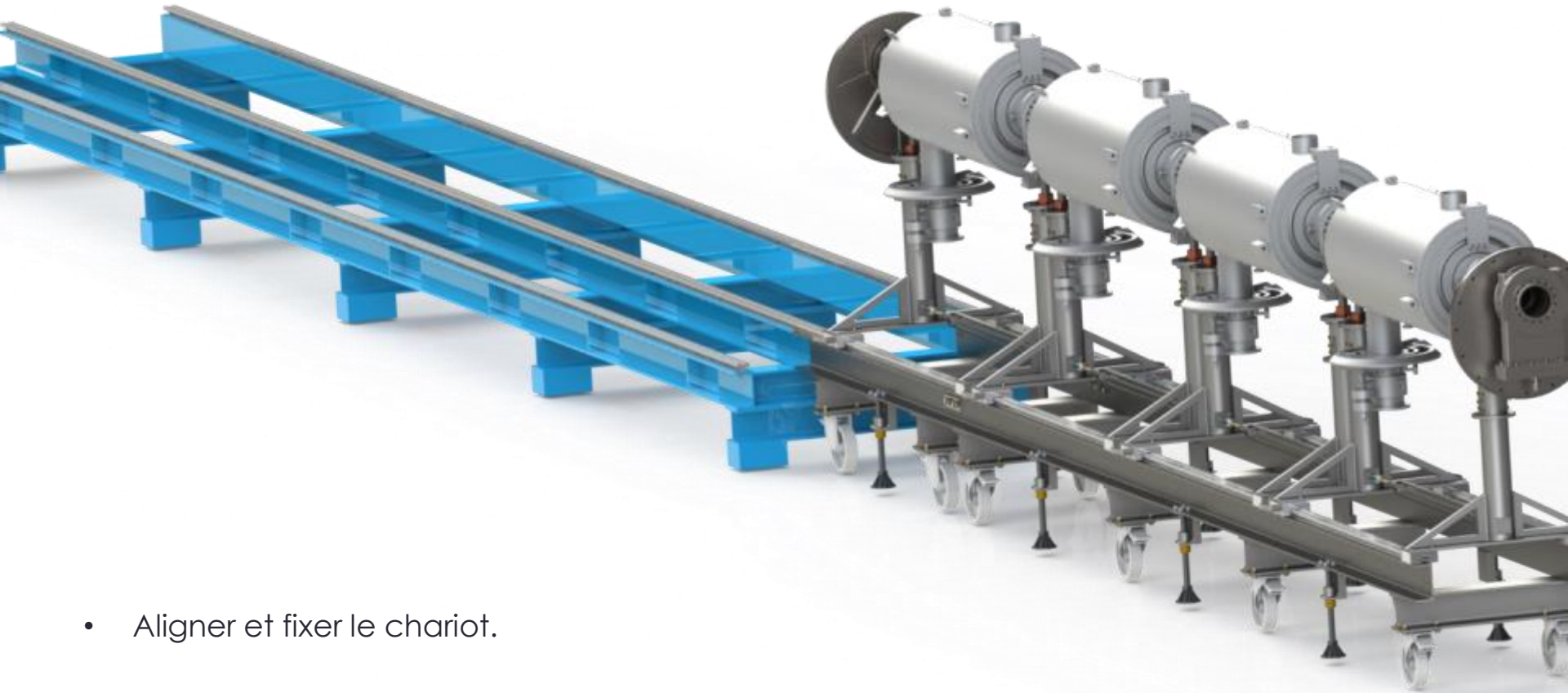
- Isolation, blindage magnétique, système d'accord à froid, assemblage des circuits cryogéniques.

Châssis de transfert



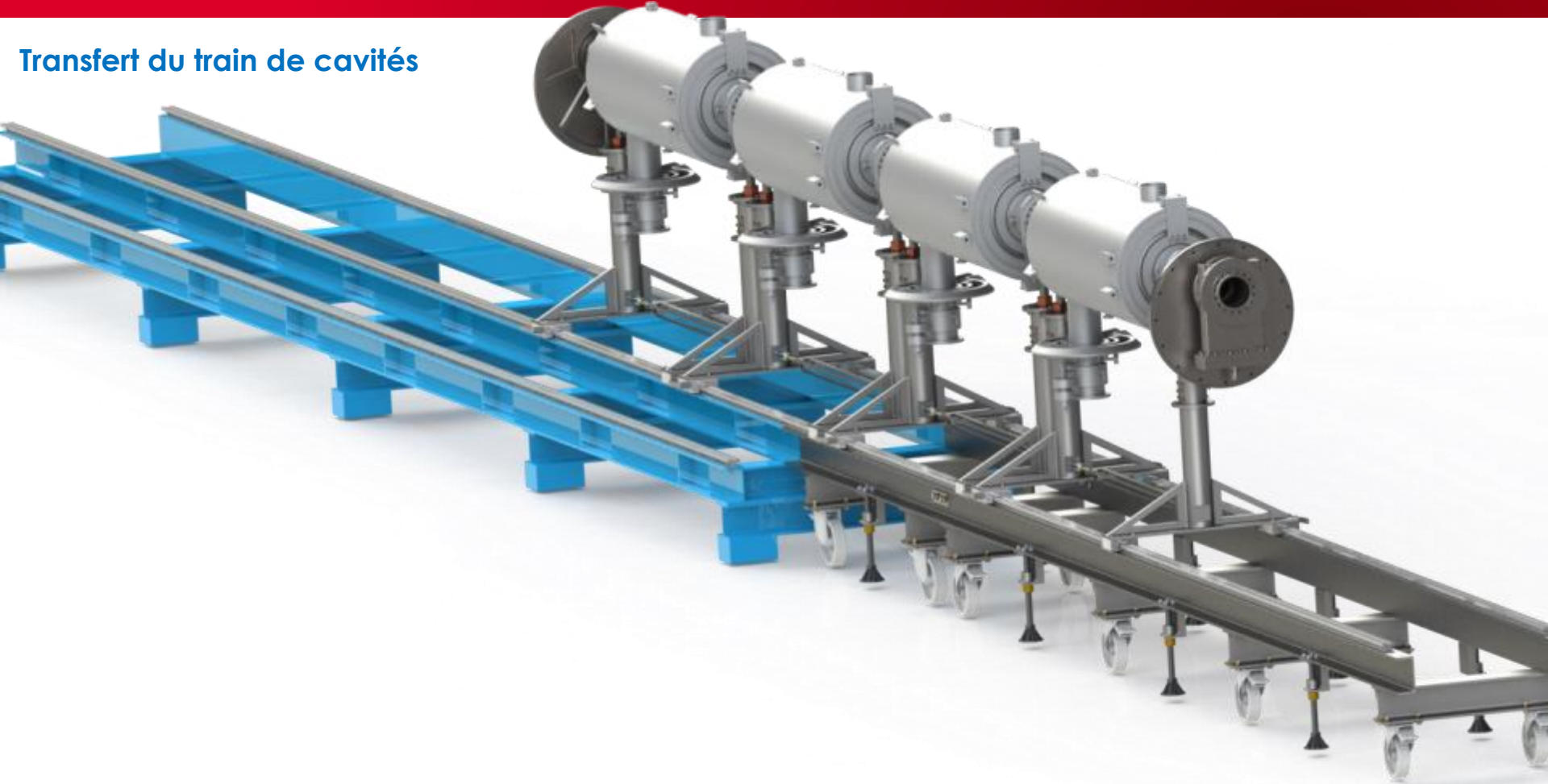
- Support fixe.
- Jeu de 4 rails parallèles.
 - Ecartement des rails internes: 500mm.
 - Ecartement des rails externes: 900mm.
- Poutres profilées identiques.
- Élément de compensation de niveau.
- Longueur des rails: 8m.

Positionnement du train de cavités



- Aligner et fixer le chariot.

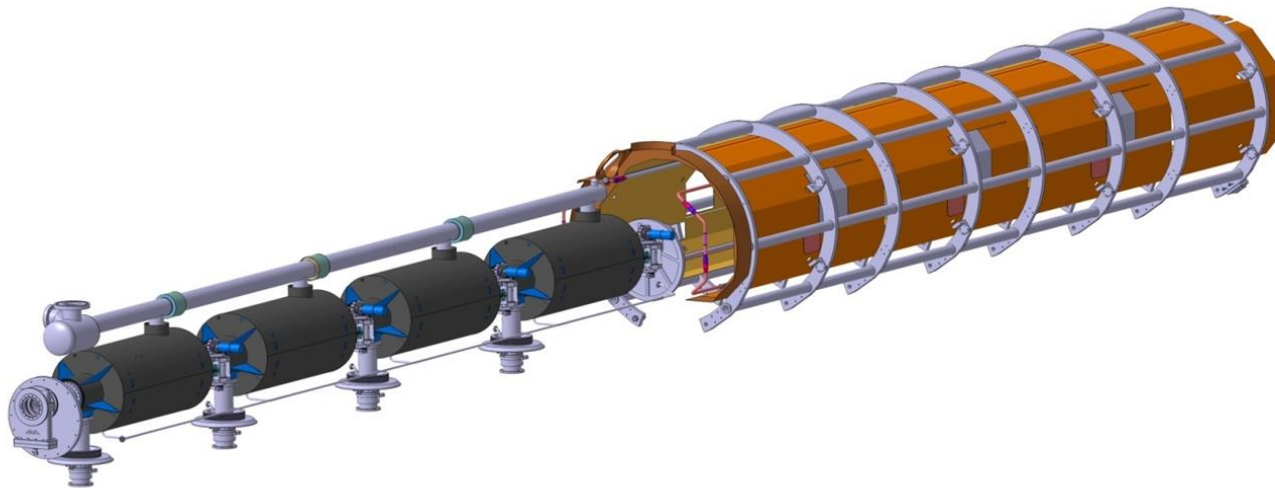
Transfert du train de cavités



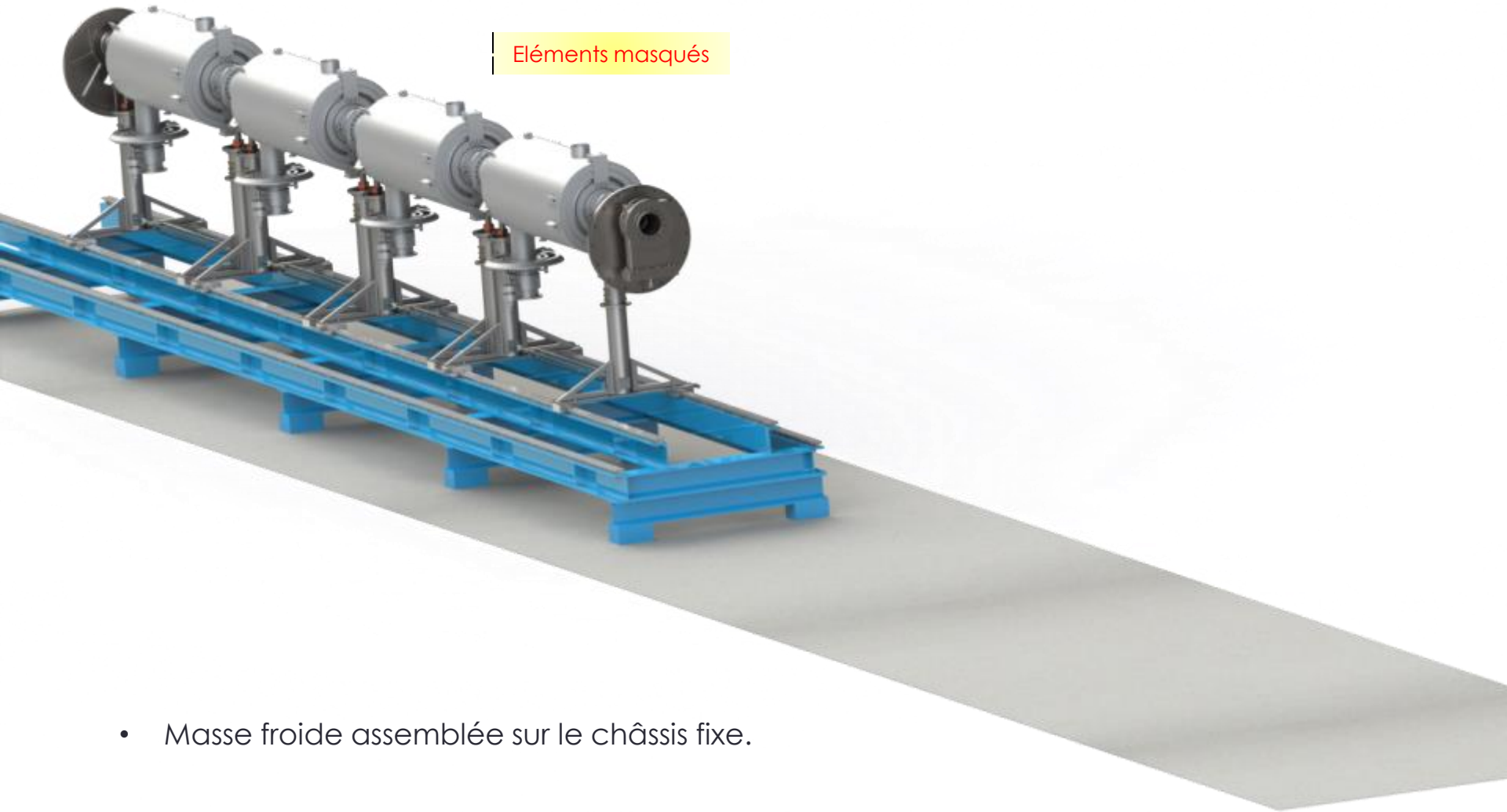


- Poste de travail fixe: assemblage de la masse froide.
 - Isolation.
 - Blindage magnétique.
 - Système d'accord à froid.
 - Assemblage des circuits cryogéniques.

Insertion de la masse froide dans le spaceframe



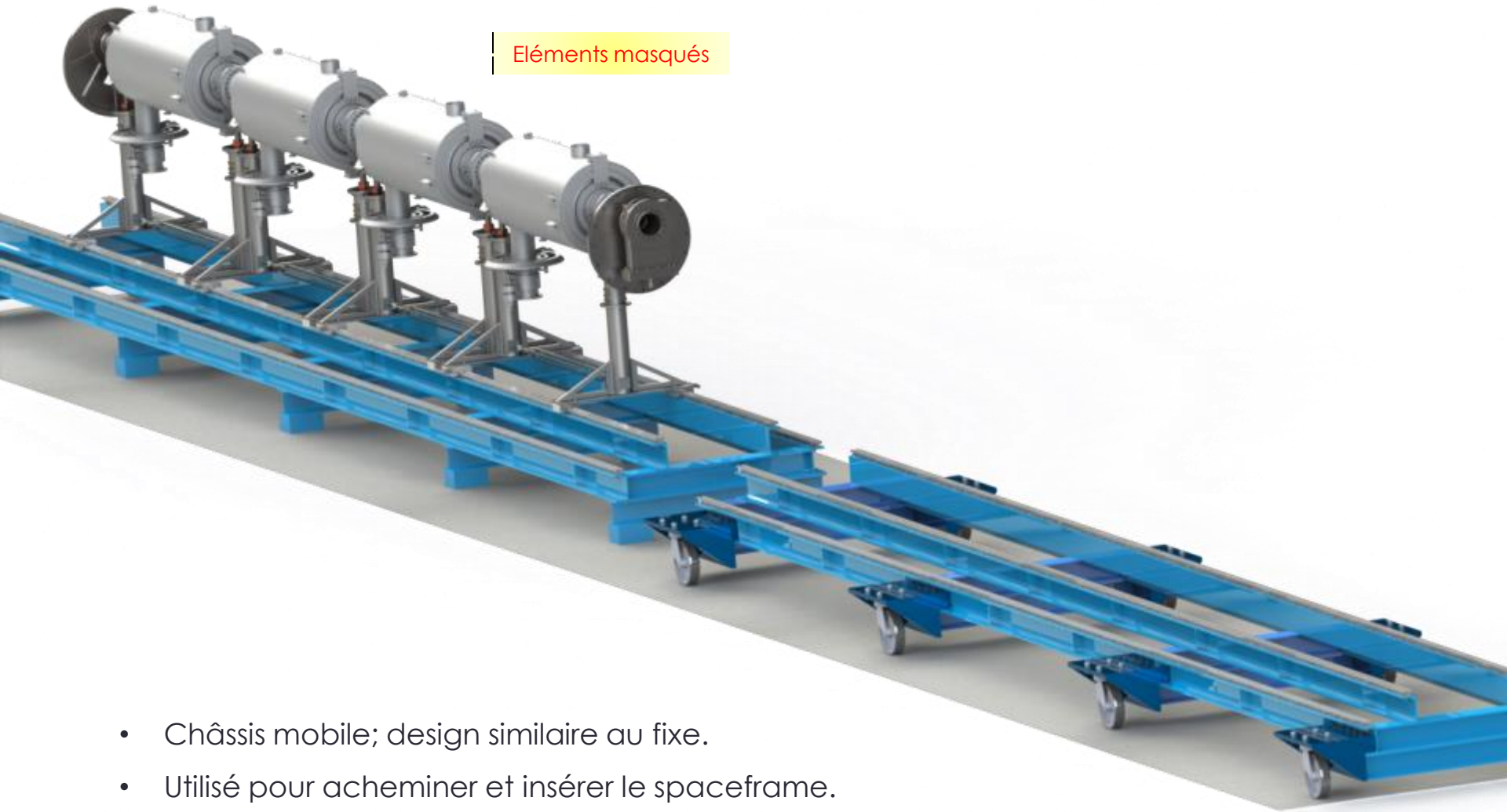
- Masse froide assemblée.
- Assembler l'écran thermique et le spaceframe.



- Masse froide assemblée sur le châssis fixe.

Outillages hors salle blanche

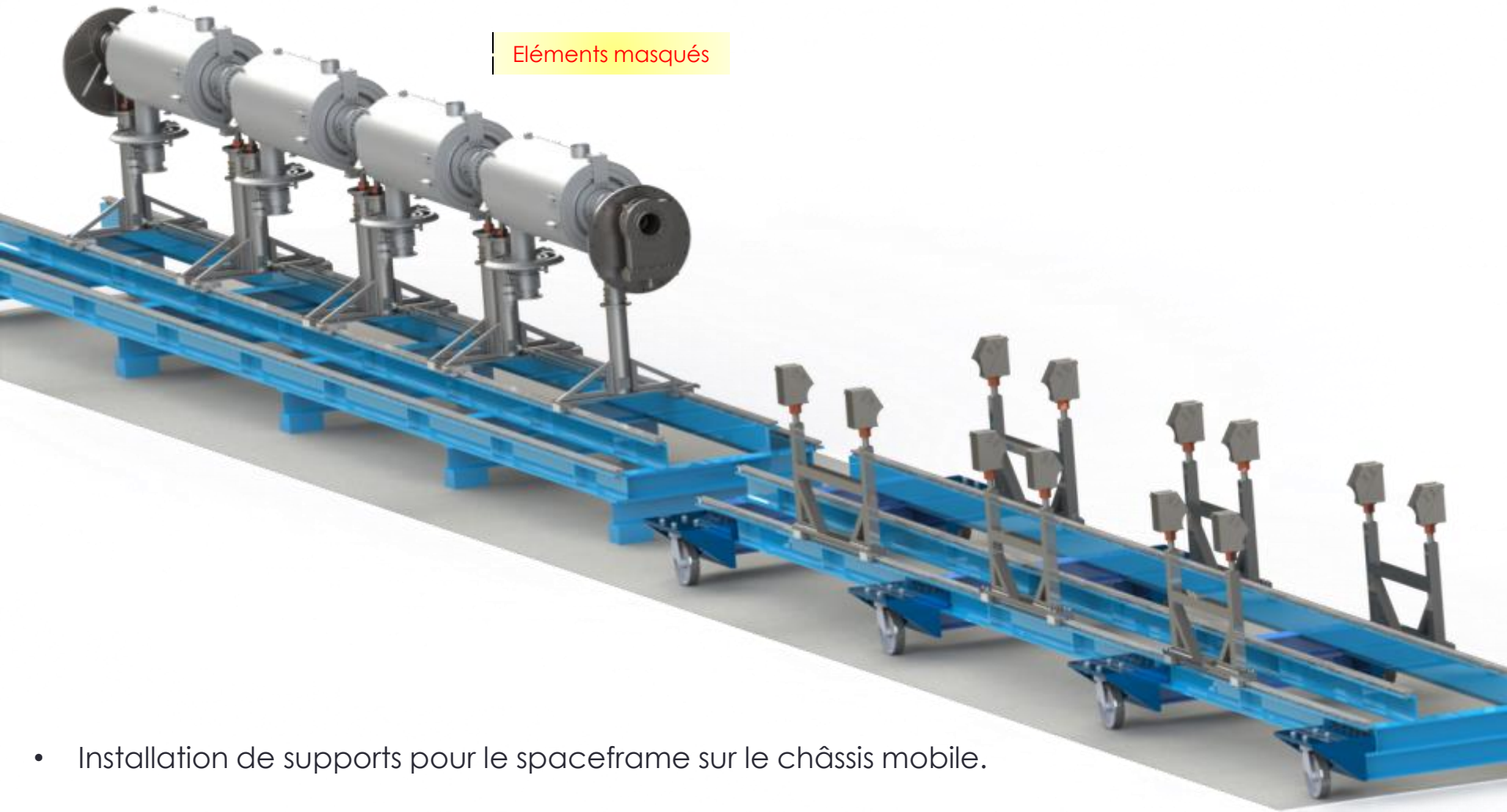
Éléments masqués



- Châssis mobile; design similaire au fixe.
- Utilisé pour acheminer et insérer le spaceframe.

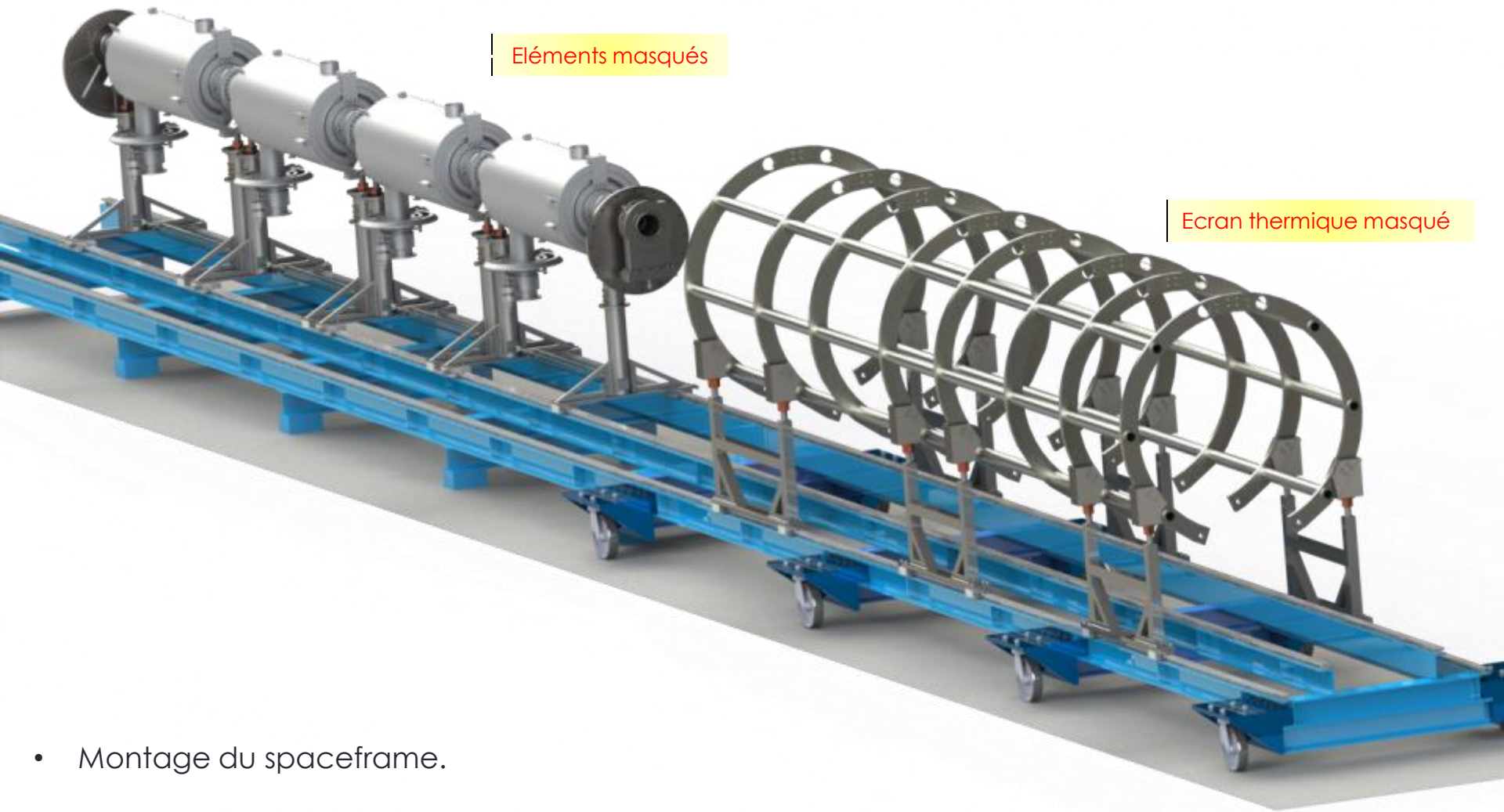
Outillages hors salle blanche

Éléments masqués



- Installation de supports pour le spaceframe sur le châssis mobile.

Outillages hors salle blanche



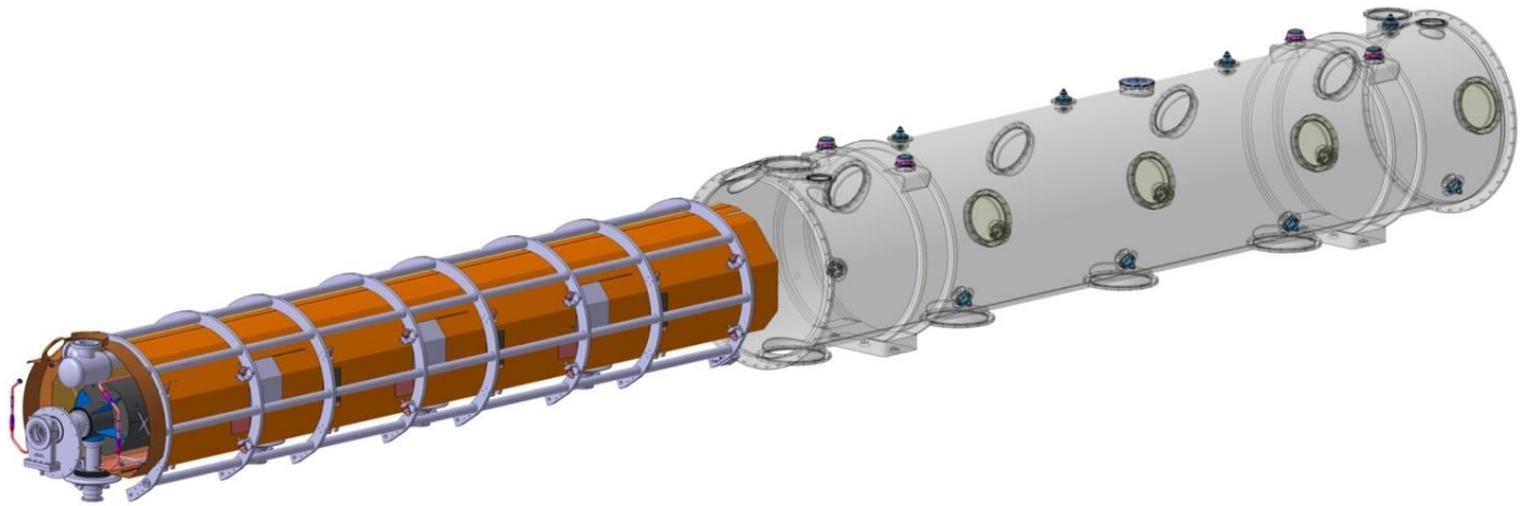
- Montage du spaceframe.

Outillages hors salle blanche



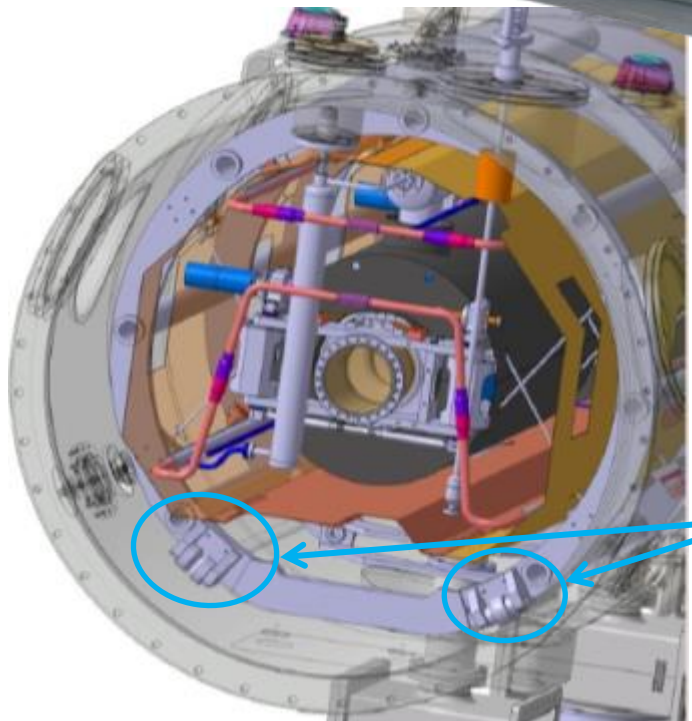
- Translation du spaceframe.
- Montage des tirants, report de la masse.
- Retrait des poteaux de support des brides des cavités puis alignement.

Insertion du spaceframe avec la masse froide dans l'enceinte à vide



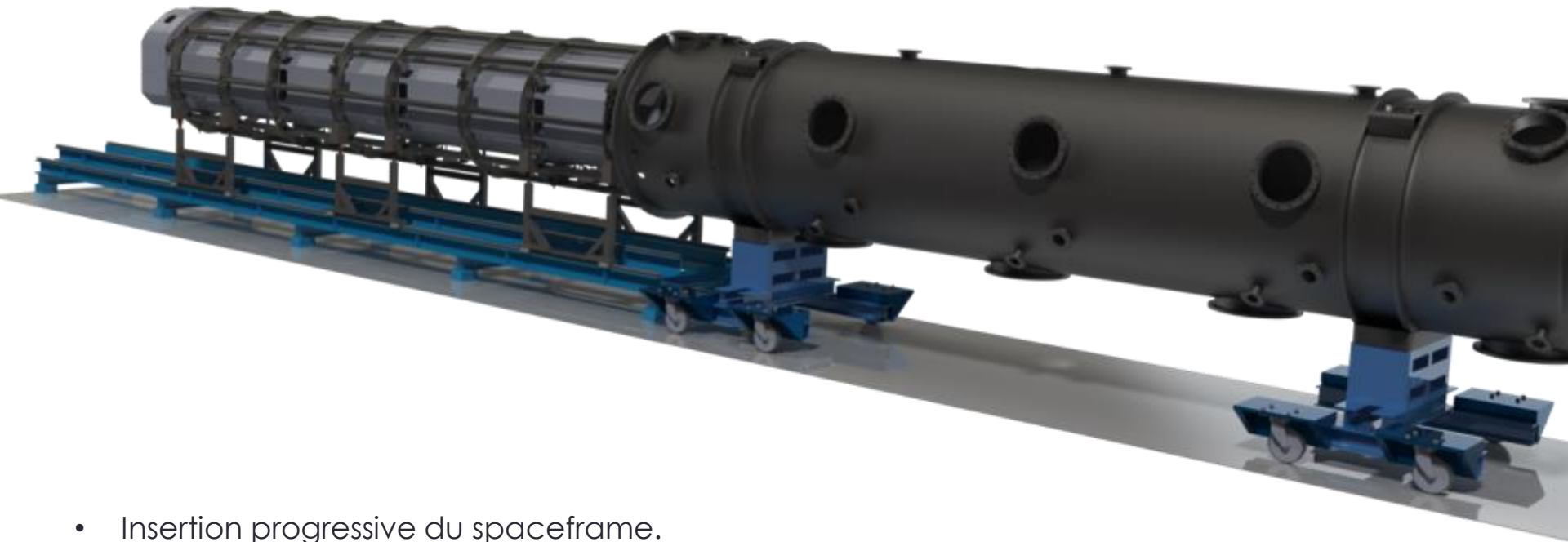
- Masse froide suspendue dans le spaceframe.
- Enceinte à vide.

Insertion dans l'enceinte à vide



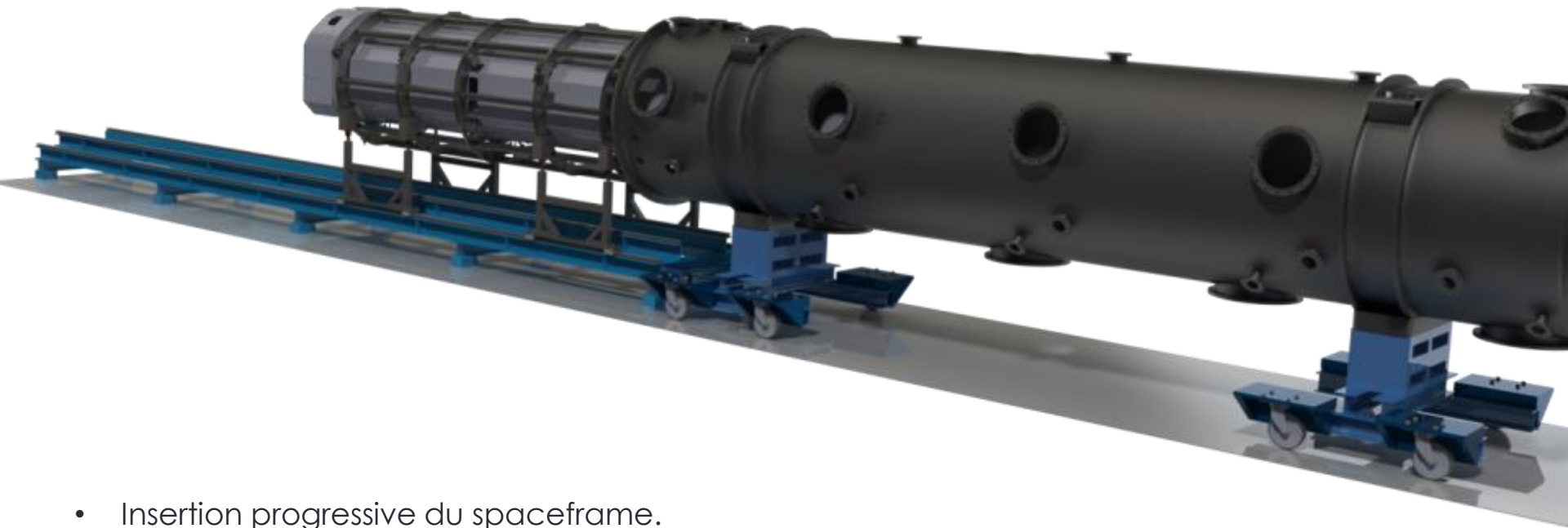
- Outillage de support de l'enceinte: accès aux trappes.
- Insertion progressive du spaceframe.
- Spaceframe muni de roues sur chaque anneau.
- Enceinte à vide munie d'un rail de guidage

Insertion dans l'enceinte à vide



- Insertion progressive du spaceframe.

Insertion dans l'enceinte à vide



- Insertion progressive du spaceframe.

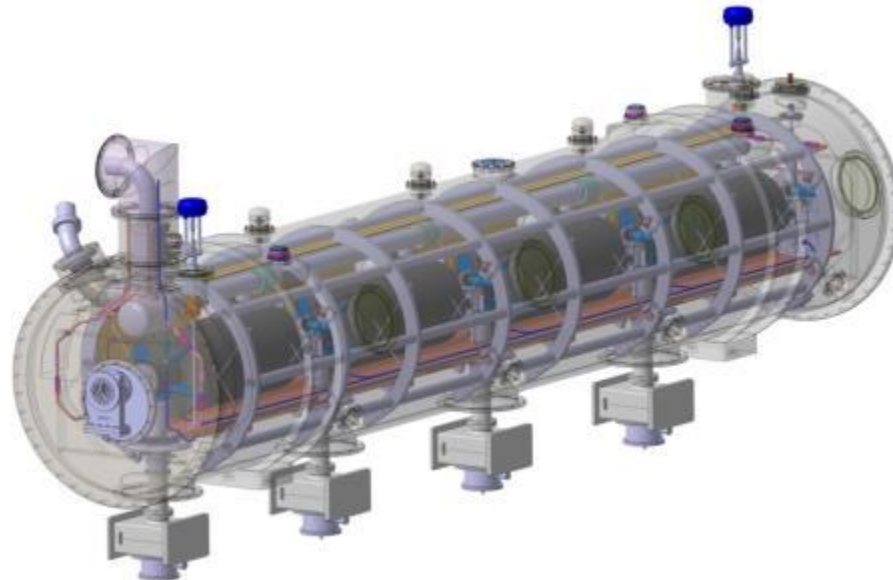
Insertion dans l'enceinte à vide



- Insertion progressive du spaceframe.

Conclusion

- Système mécanique complexe, intervention dans plusieurs domaines de compétence:
 - Mécanique, thermique, radio fréquence, vide, cryogénie.
- Découverte des contraintes très spécifiques d'assemblage de cavités supraconductrices en salle blanche.
- Conception d'outillages.
- Implication dans un projet de R&D dans un contexte international.
 - Collaboration de projet,
 - Réunions mensuelles entre l'IPN d'Orsay et le CEA Saclay.
 - Audit ESS.



Cryomodule à cavité elliptiques ESS