



**PROCEDURE  
AAO.16-2025**

**OBJET  
FOURNITURE D'ENCEINTES A ULTRAVIDE POUR  
L'EXPERIENCE VIRGO DE MESURE D'ONDES  
GRAVITATIONNELLES**

## **CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES**



**CNRS – Délégation Alpes**  
25, Rue des Martyrs  
BP 166

38042 GRENOBLE cedex 9

## ARTICLE 1 . OBJET DE MARCHE

---

Le présent marché a pour objet la fourniture de 7 enceintes à ultravide pour l'expérience Virgo de mesure d'ondes gravitationnelles. Dans la suite de ce document, ces enceintes à ultravide pourront également être indifféremment appelées enceintes à vide.

### 1.1 Descriptif simplifié de l'équipement

Ces 7 enceintes à ultravide sont équipées de portes à charnières (à minima 2 portes par enceinte). Chacune est composée d'une cuve mécano-soudée, de portes, d'une virole et d'un dôme. Une attention particulière est demandée concernant la propreté des enceintes à vide qui sont destinées à héberger des miroirs de très haute qualité dont le revêtement de surface peut être endommagées par la présence d'hydrocarbures.

Les enceintes à ultra-vide doivent respecter les exigences minimales suivantes :

- Pouvoir être opérée à  **$1.10^{-8}$  mbar**.
- Avoir un taux de fuite maximal de  **$1.10^{-9}$  mbar.l/s** pour l'hélium.
- Être composées d'**acier inoxydable de type AISI 304L**.
- Être conformes aux plans fournis.
- Avoir des soudures étanches au vide et continues (sauf indications contraires spécifiées sur les plans d'exécution).
- Être conformes aux tests d'admission finaux décrit au paragraphe 3.1.
- Les brides dont le diamètre est inférieur ou égal à DN320 sont de **type CF**.
- Les brides montées sur charnières utilisées pour la maintenance et dont le diamètre est supérieur à DN320 sont à **double joint FKM (FPM)**.
- Les autres brides dont le diamètre est supérieur à DN320 sont soit à **double joint FKM (FPM)**, soit à **joint métal Helicoflex®** (fournis), soit de **type CF** (PRM2 et SRM2).

Les autres spécifications techniques définies dans le présent document s'imposent au titulaire, sans préjudices des compléments et précisions portées aux marchés subséquents.

### 1.2 Site d'installation

Parmi les 7 enceintes à vide qui font l'objet de ce marché, 5 seront installées sur l'expérience Virgo sur le site de EGO (European Gravitational Observatory) à l'adresse suivante (<https://www.ego-gw.it/visit-us/>) :

European Gravitational Observatory  
Via Edoardo Amaldi, 5

56021 Cascina (PI) – Italie

L'enceinte à ultravide nommée PRM2 sera livrée sur le site du laboratoire NIKHEF, l'enceinte nommée SRM2 sera quant à elle livrée à l'INFN de Perugia :

NIKHEF  
Science Park 105  
1098 XG Amsterdam – Pays-Bas

Laboratorio CAOS  
Via Goffredo Duranti, 93  
06123 Perugia – Italie

## ARTICLE 2 . DESCRIPTION & CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

### 2.1 Caractéristiques techniques communes

Les solutions proposées remplissent les conditions et critères suivants :

#### 2.1.1 Spécifications de matières premières

**Requis 1.1** : Les enceintes à ultravide sont en acier **AISI 304L** correspondant à la norme **NF EN 10027: X2 Cr Ni 18-09**.

**Requis 1.2** : Les vis des charnières sont selon la norme **AISI 4140** ou selon la norme **NF EN 10025 : 42 Cr Mo 4**.

**Requis 1.3** : Les vis des brides CF sont en **inox argenté**.

**Requis 1.4** : Les vis des brides FKM et des portes sont en **acier zingué**.

#### 2.1.2 Spécifications de propreté

**Requis 2.1** : Toutes les parties doivent rester propres après le processus de fabrication. Toutes les surfaces internes sont exemptes de traces d'huiles, de graisses, d'empreintes de doigts, de poussières et de marques. Le nettoyage et les opérations post-nettoyage ont lieu dans une **zone à atmosphère contrôlée**.

**Note** : Un environnement de type salle blanche (ISO 8) sera récompensée dans les critères d'évaluation.

**Requis 2.2** : Les **huiles de coupe sont solubles à l'eau** et sans sulfures, sans halogènes et sans silicone. Par exemple, TRIM® C350 – Master Fluid Solutions - Premium Synthetic Metalworking Fluid, or equivalent

**Requis 2.3** : L'usage de **graisse à vide est proscrite**.

### 2.1.3 Spécifications mécaniques des états de surface

**Requis 3.1 :** Les surfaces intérieures des enceintes à ultravide ont une rugosité de surface de **Ra 1.6 µm ou meilleure selon la norme ISO 21920**. Si les soudures intérieures présentent des aspérités, celles-ci sont brossées à l'aide d'une brosse métallique inox dédiée.

**Requis 3.2 :** Les tôles d'acier d'épaisseur jusqu'à 8 mm comprises sont laminés à froid avec une finition 2B.

**Requis 3.3 :** Les tôles d'acier d'épaisseur supérieur à 8 mm sont laminés à chaud et subissent un polissage mécanique puis subissent un électro-polissage de façon à obtenir un rugosité de surface compatible avec le requis 3.1.

**Requis 3.4 :** Tous les **couteaux des brides sont intacts** (sans rayures, sans chocs).

**Requis 3.5 :** La rugosité typique des **gorges à joints FKM circulaire est de Ra 0.8 µm**.

**Requis 3.6 :** La rugosité typique des **portées de joints FKM circulaire est de Ra 0.8 µm**.

**Requis 3.7 :** La rugosité typique des **gorges à joints non-circulaire FKM réalisées** avec une fraiseuse est de **Ra 0.8 µm**, idéalement avec des rainures suivant l'axe de la gorge.

**Requis 3.8 :** La rugosité typique des **portées de joints non-circulaires FKM réalisées** à la fraiseuse est de **Ra 0.8 µm**.

**Requis 3.9 :** La rugosité typique **portées de joints helicoflex est de Ra 0.8 µm**, (machiné au tour).

**Requis 3.10 :** La rugosité typique des **gorges à joints helicoflex est de Ra 0.8 µm** sans être inférieure à 0.8 µm, cette rugosité doit être obtenue en machine tournante et ne doit pas être retouché (machiné au tour).

**Note :** Un électro-polissage de toutes les surfaces internes sera récompensé, afin d'améliorer encore les performances en matière de propreté en particulier en ce qui concerne la contamination par des particules et les résidus d'usinage. La procédure d'électro-polissage est décrite dans l'offre.

### 2.1.4 Exigences de fabrication (soudures et usinages)

**Requis 4.1 :** La production des pièces en acier inoxydable est réalisée à l'aide d'**outils et de machines exempts de résidus d'acier au carbone** dans un **atelier dédié à la chaudronnerie acier inoxydable et métaux nobles**.

**NOTE:** Dans les critères d'évaluations, la production des pièces dans un **atelier dédié à la chaudronnerie acier inoxydable et métaux nobles, physiquement isolé (atmosphère séparée) d'autres activités de chaudronnerie acier, est récompensée**. Un environnement de type salle blanche (ISO 8) sera récompensée dans les critères d'évaluation.

**Requis 4.2 :** Les tolérances de dimensions sont selon la norme **ISO 2768 mK** sauf indications contraires sur les plans d'exécution fournis.

**Requis 4.2.1 :** Le **tolérance de parallélisme** entre la surface de référence de l'anneau de support suspension (voir figure 1) et la surface de la bride de la virole supérieure est fixée à **0,2 mm/m**.

**Requis 4.2.2 :** La **tolérance de parallélisme** entre la surface de référence de l'anneau de support suspension et les surfaces des pieds ou de la base des enceintes est fixée à **0,2 mm/m**.

**Requis 4.2.3 :** La **tolérance de rectitude** en zone commune entre l'axe des deux parties des charnières est fixée à un **diamètre de 0,2 mm**.

**Requis 4.2.4 :** L'axe théorique formé par cette zone commune des charnières doit respecter une **tolérance de parallélisme** par rapport à la surface de la bride de porte correspondante fixée à un **diamètre de 0,3 mm**.

**Requis 4.2.5 :** L'axe théorique formé par cette zone commune des charnières doit respecter une **tolérance de perpendicularité** par rapport à la surface de référence de l'anneau de support suspension fixée à un **diamètre de 0,3 mm**.

**Requis 4.2.6 :** La **tolérance de planéité** pour les flanges hélicoflex et FKM est inférieure à **0.4 mm** et la **tolérance de parallélisme** est inférieure à **0.2 %**

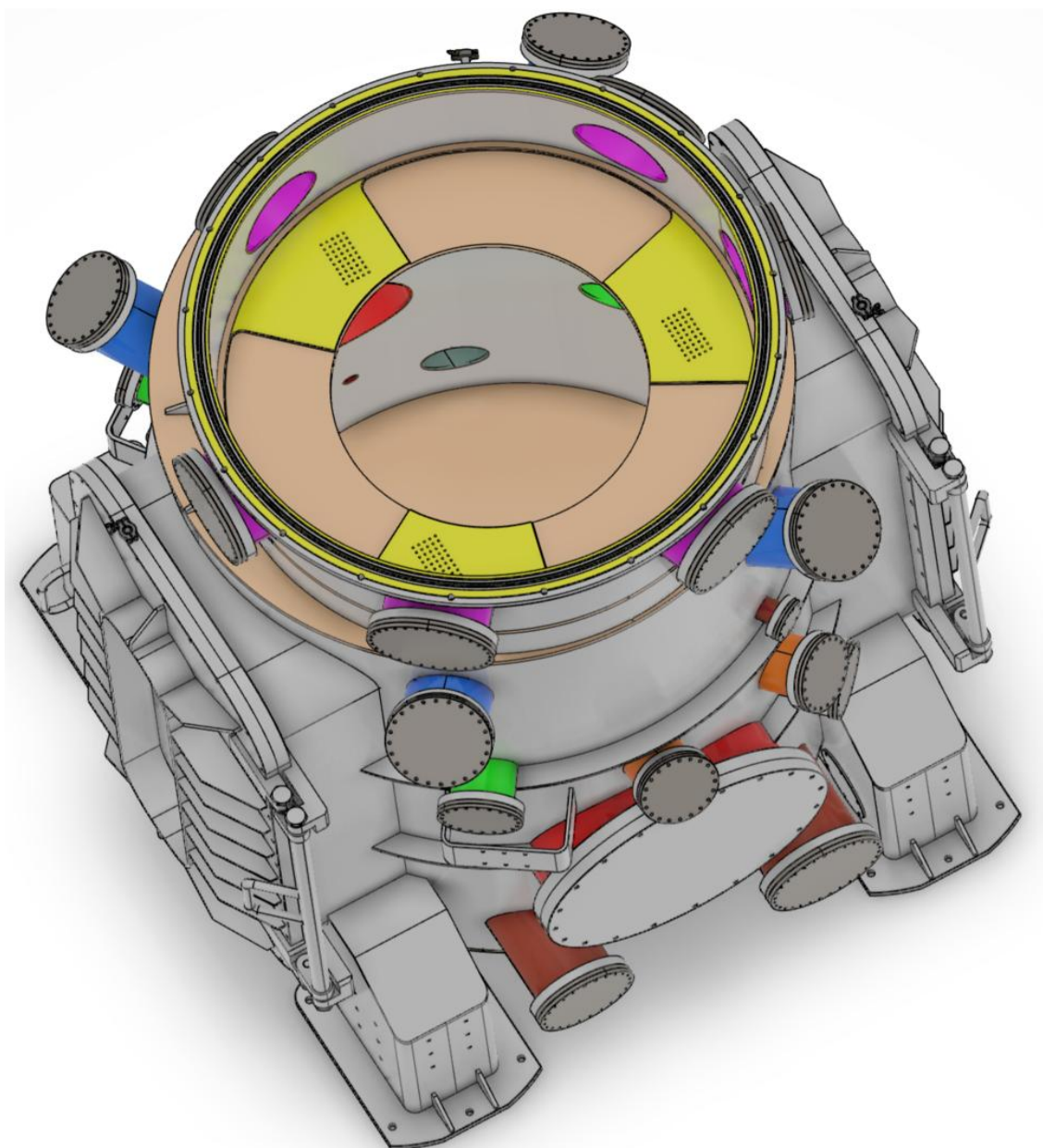


Figure 1. Exemple de surface de référence de l'anneau de support suspension coloré en jaune à l'intérieur de la cuve et surface de la bride de la virole supérieure coloré en jaune.

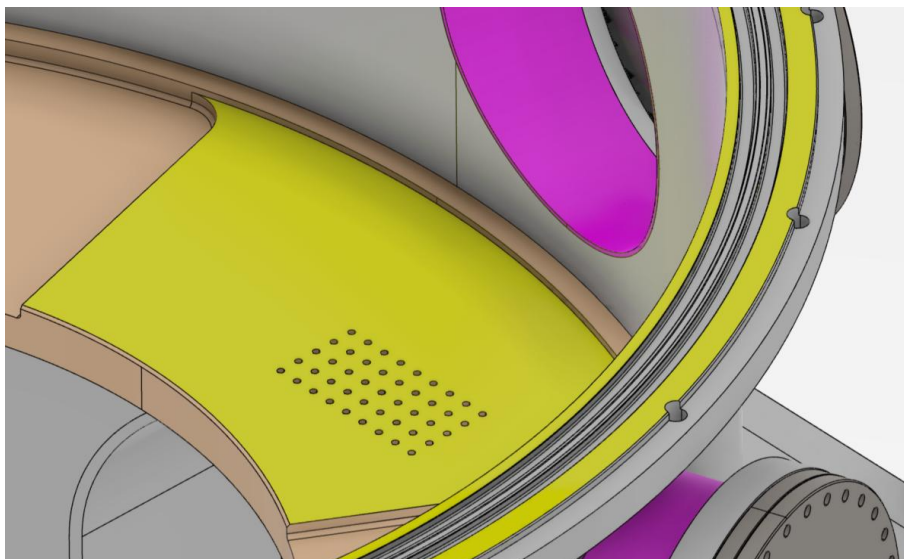


Figure 2. Zoom sur la surface de référence de l'anneau de support suspension et sur la surface de la bride de la virole supérieure coloré en jaune.

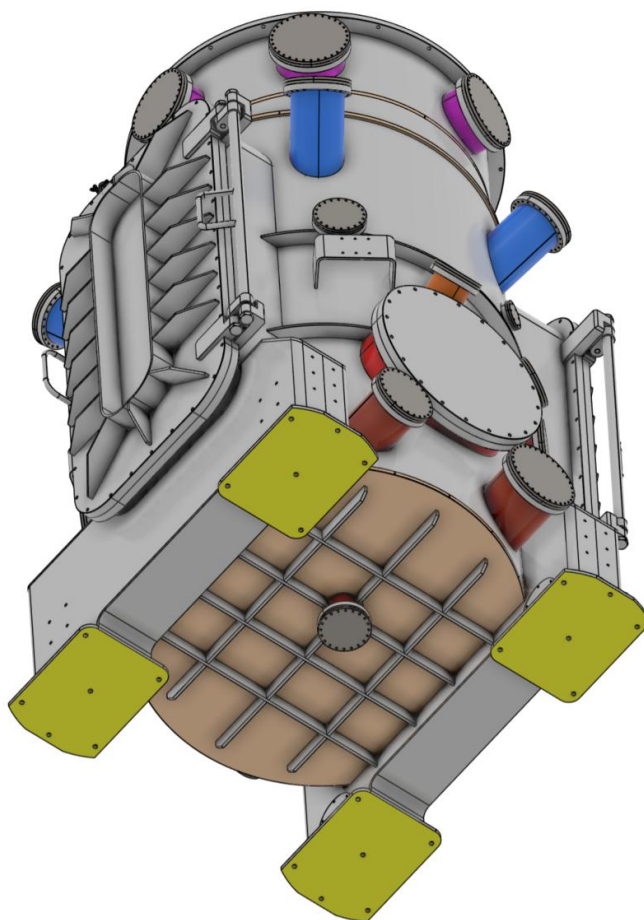


Figure 3. Exemple de surfaces des pieds d'une enceinte à vide colorés en jaune.

**Requis 4.3 :** Toutes les pièces sont fabriquées à l'aide de techniques de vide **UHV (ultra-high vacuum)**, en accord avec les pratiques de fabrication UHV. La norme **ISO 3834 niveau 2** s'applique pour les soudures,

la soudure TIG est le choix préférentiel ; toutes autres techniques alternatives sont soumises à l'acheteur et approuvées par celui-ci.

**Requis 4.4 :** Le niveau d'acceptation pour des imperfections de soudure est de **classe C** (niveau standard) selon la norme **NF EN ISO 5817**.

**Requis 4.5 : Typologie des soudures :**

**Requis 4.5.1 : Soudures d'étanchéité au vide :** Les soudures sont pénétrantes et continues.

**Requis 4.5.2 : Soudures de raccordement des viroles sur la cuve à vide :** Les soudures sont continues et profondes côté vide. Les soudures côté pression atmosphérique sont discontinues ; 2 discontinuités de 50 mm de long pour les viroles de diamètre supérieur à 320 mm, 4 discontinuités de 20 mm de long pour les viroles de diamètre inférieur à 320 mm).

**Requis 4.5.3 : Soudures de raccordement d'une bride sur un piquage :** Les soudures sont continues et profondes côté vide. Les soudures côté pression atmosphérique ont une discontinuité pour les brides de diamètre supérieur à 320 mm et sans soudures côté pression atmosphérique pour les brides de diamètre inférieur à 320 mm.

**Requis 4.5.4 : Soudures accessoires (non-contingentes au vide) sur la paroi extérieure de la cuve :** Les soudures sont continues des deux côtés, endroit et envers, si les deux côtés sont accessibles.

**Requis 4.5.5 : Soudures plaque sur plaque :** Les soudures sont continues des deux côtés, endroit et envers.

**Requis 4.5.6 : Soudure de l'anneau de support suspension :** La soudure du dessus est continue. La soudure du dessous est discontinues (100 mm tout les 150 mm).

**Requis 4.6 :** Tous les cordons de soudure subissent une inspection visuelle selon les normes ISO 6520, ISO 5817, ISO 17637. Le contrôle individuel d'étanchéité des soudures peut être effectué par un test à l'hélium, magnetoscopie, test ultrasonique ou radiographique à l'appréciation du titulaire. Les liquides de pénétration ne sont pas autorisés sur les surfaces du côté du vide, sauf si un procédé de nettoyage est disponible et validé par le CNRS.

**Requis 4.7 :** Là où les soudures longitudinales de rabouillage, les soudures circonférentielles des piquages et des brides sont faites suivant le procédé TIG, le gaz d'inertage endroit et envers est de l'argon 100%.

**Requis 4.8 :** Les gorges à joint torique vertical sont trapézoïdales et les gorges à joint torique horizontal sont droites. La géométrie (diamètre, profondeur, arrondi, etc...) des gorges à joint accueillant des joints FKM (FPM) peut être modifié par le titulaire en accord avec le CNRS.

**Requis 4.9 :** Un traitement de décapage et de passivation après les opérations de soudage et d'usinage est possible en accord avec le CNRS; il doit être limité aux zones soudées et réduit au strict minimum. Toutefois, si ce traitement est effectué sur les pièces finies, un rinçage des pièces est réalisé suivant la procédure de nettoyage définie dans l'offre du titulaire ou celle décrite au paragraphe 2.4.

#### **2.1.5 Finitions**

**Requis 5.1 :** Les surfaces extérieures présentent un aspect lisse afin de faciliter le nettoyage. Lors de celui-ci, un chiffon papier imbibé d'alcool ne doit pas laisser de « peluche » sur les surfaces. Si nécessaire,

le traitement mécanique n'est autorisé qu'à l'aide d'une **brosse en acier inoxydable propre**. L'**utilisation de pâtes à polir est strictement interdite**. L'utilisation d'abrasifs doit être réduite au strict minimum, en accord avec les meilleurs pratiques de l'ultra-vide.

**Requis 5.2** : Tous les angles vifs sont **chanfreinés** et ne présentent pas d'irrégularités. Ces chanfreins présentent un **aspect lisse** en passant la main dessus. Ces chanfreins sont à réaliser même s'ils ne sont pas représentés sur les plans.

**Requis 5.3** : Des surfaces lisses sont obtenues après toutes opérations d'usinage ou de soudage.

**Requis 5.4** : Une attention particulière est observée sur les éléments constitutifs du socle et des pieds. Les découpes des pièces ne sont pas laissées brutes, **les coupes sont propres, nettes et exemptes de bavures**.

**Requis 5.5** : Une plaquette du fabricant est fixée au droit d'un pied de l'enceinte. Elle indique :

- La référence du dossier de plans.
- Le nom du client.
- La date de réalisation.
- Le nom du titulaire.
- La masse des éléments.

### 2.1.6 Traitement Thermique (optionnel)

**Option 6.1** : Un traitement thermique visant à dégazer l'hydrogène de surface (provenant par exemple du décapage) et les contaminants sera récompensé. Le système est traité pour au moins 48 heures idéalement à 400°C. Le traitement thermique n'endommage pas les gorges à joints prévues pour les joints toriques FKM (FPM). Le traitement thermique est effectué sous atmosphère contrôlée de façon à ne pas polluer l'enceinte à vide.

## 2.2 Spécifications géométriques individuelles des enceintes

### 2.2.1 Spécifications géométrique

Les enceintes à ultravide respectent les spécifications géométriques suivantes :

Pour chacune des enceintes se référer aux fichiers de CAO au format step listés ci-dessous.

➤ **Enceinte à ultravide n°1 – PRM2**

- se référer au fichier step figurant en annexe :

➤ **Enceinte à ultravide n°2 – SRM2**

- se référer au fichier step figurant en annexe :

➤ **Enceinte à ultravide n°3 – SIB1**

- se référer au fichier step figurant en annexe :
- **Enceinte à ultravide n° 4 – PRM13**
  - se référer au fichier step figurant en annexe :
- **Enceinte à ultravide n°5 – SRM3**
  - se référer au fichier step figurant en annexe :
- **Enceinte à ultravide n°6 – SRM1**
  - se référer au fichier step figurant en annexe :
- **Enceinte à ultravide n°7 – SDB1**
  - se référer au fichier step figurant en annexe :

### **2.2.2 Champs d'applications**

Le titulaire du marché fournit l'ensemble de la visserie, des charnières, des brides et des joints à l'exception des joints hélicoflex® qui sont fournis par le CNRS.

## **2.3 Logique de production et suivi des opérations**

### **2.3.1 Logique de production**

Avant de commencer toute réalisation, le titulaire doit présenter au CNRS pour approbation un dossier méthodologique de fabrication liant entre eux :

- Les gammes d'usinage.
- Les procédures de soudage.
- Les procédures de nettoyage.
- Les gammes d'assemblage des enceintes à ultravide, des socles associés, des nervures, des plateaux et des piquages.
- Les procédures de test à l'hélium.

### **2.3.2 Suivi des opérations**

Le titulaire assure le suivi convenable des réalisations en établissant pour chaque enceinte à ultravide un rapport de validation daté qui comportera :

- Les certificats de matière.
- Les contrôles de matière le cas échéant.
- Les certificats des huiles de coupe.
- Les fiches de traitement thermique le cas échéant.
- Les fiches de suivi des opérations.
- Les fiches de tests sous vide définis à l'article 3.1 du CCTP.
- Les fiches de contrôles géométriques.

## 2.4 Procédure de nettoyage de l'intérieur de la chambre à ultravide

Le titulaire assure le nettoyage des enceintes à vide selon une procédure compatible avec le niveau d'ultravide requis, selon la procédure de nettoyage décrite ci-dessous ou à défaut d'une procédure présentant d'avantage de garantie et décrite dans son offre.

1. **Lavage sous pression** avec une lessive alcaline portée à 60°C dans une pièce ayant une température supérieure à 20°C. Concentration 2 %. La lessive est du type ALMECO 18 - Réf. P3 VR 580 17 ou équivalente.
2. **Rinçage par un jet haute pression** avec de l'eau déminéralisée portée à la température de 20°C. Temps ~20'. Conductivité de l'eau  $\leq 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ . Pour cette opération, les premiers cycles de rinçage peuvent être faits avec de l'eau courante. Utiliser l'eau déminéralisée en dernière étape avant que les pièces ne sèchent.
3. **Séchage** dans un volume sous atmosphère contrôlée et s'il est actif, il devra l'être par panneaux radiants. La cuve est obturée sur le poste de travail, dès la fin du séchage.

Les opérations de nettoyage sont réalisés dans une zone où la contamination par la poussière est contrôlée, sans qu'il soit nécessaire qu'elles soient classées comme salles blanches.

## ARTICLE 3 . PROTOCOLE D'ADMISSION EN USINE

### 3.1 Exigences de qualification - Tests sous vide

Préalablement à ces tests d'admission en usine, le titulaire doit avoir effectué toutes les étapes de contrôle qualité relatives aux matières premières, au soudage, à la finition de surface, au nettoyage, à l'inspection visuelle et à la conformité dimensionnelle.

**Requis 7.1 :** Les tests sous vide sont réalisés sur le site du titulaire et font l'objet d'un rapport. Les représentants du CNRS et de l'expérience VIRGO (membres du LAPP, du LPC Caen et contact figurant à l'article 1.2) sont invités à assister aux tests sous vide dans les conditions de l'article 3.2.8 du CCAP.

**Requis 7.2 :** Les tests d'admission en usine décrits ci-dessous couvrent les essais de réception sous vide et doivent être effectués sur l'ensemble fini de la chambre à ultravide. Cependant :

- Les petits éléments peuvent être exclus du recuit, après accord avec le CNRS.
- Les pompes sèches et tous les équipements à vide nécessaires à ces tests sont fournis par le CNRS au besoin si le titulaire en fait la demande.
  - Si les équipements de test sont fournis par le titulaire ; il présente au CNRS des **certificats d'étalonnage de moins d'un an pour le détecteur de fuite d'hélium et l'analyseur de gaz résiduels (RGA)**.
- Les représentants du CNRS et de l'expérience Virgo sont invités à assister aux essais de réception. Ils participent physiquement sur place aux essais du premier ensemble de chambre avec l'équipe de l'usine.

Le test comprend les quatre éléments suivants :

#### **i) Étanchéité**

Le taux de fuite d'hélium total ne doit pas dépasser  $1 \times 10^{-9}$  mbar·l/s pour toutes les pièces. Un détecteur de fuite d'hélium intégré au système de pompage à sec est nécessaire. Le test est fait selon la norme ISO 20485,

#### **ii) Étuvage**

Le système doit être chauffé à 120°C pendant 48 heures avec joints toriques conditionnés (O-ring) FKM (FPM), pour obtenir un cycle thermique :

4 jours + 1 jour de mesure (1 semaine par assemblage de chambre). Un temps de cuisson plus longs sera récompensé.

L'étuvage est destiné à réduire la quantité d'eau absorbée sur les surfaces, de sorte que la pression finale puisse être atteinte.

#### **iii) Tests sous vide**

- **Analyse des gaz résiduels :**

La présence d'hydrocarbures doit être limitée en raison de leur effet destructeur sur les revêtements des miroirs. Les procédures de manutention et de nettoyage doivent prendre en compte cette contrainte et éviter les résidus d'hydrocarbures sur les surfaces des enceintes à vide. Les pompes doivent également être sèches et sans poussière.

Au cours des tests les spectres doivent être enregistrés après le traitement thermique à température ambiante. La pression partielle des gaz de masses comprises entre 50 et 200 amu doit être consistante avec le bruit de fond, c'est-à-dire  $\leq 0,1$  % de la masse la plus élevée ou  $\leq 1 \times 10^{-11}$  mbar équivalent  $N_2$ . Ce test est réalisé à une pression inférieure à  $1 \times 10^{-7}$  mbar.

- **Pression résiduelle finale :**

La pression résiduelle finale mesurée doit être inférieure à  $1 \times 10^{-7}$  mbar sur une enceinte à ultravide complète avec une vitesse de pompage maximale de 1000 l/s effective. La jauge de pression doit être placée sur une bride différente de la bride utilisée pour le pompage. Le rapport inclura un graphique montrant l'évolution de la pression en fonction du temps depuis la pression ambiante jusqu'à  $1 \times 10^{-7}$  mbar (ou meilleure).

Le non-respect de ces critères nécessite un processus de cuisson plus long ou des opérations de nettoyage supplémentaires et la répétition du test jusqu'à ce que la conformité soit atteinte.

Un test des joints métalliques sera inclus pour un grand raccord à bride, les joints (Helicoflex®) sont fournis par le CNRS.

## **ARTICLE 4 . Emballage et Transport - Livraison**

---

### **4.1 Emballage et manutention**

**Requis 8.1 :** Tous les éléments et sous-ensembles à expédier sont emballés séparément dans une feuille de protection double étanche sous azote.

**Requis 8.2 :** Toutes les piquages sont transportés fermés soit par des brides pleines (diamètre inférieur à 400 mm) soit par des plaques métallique en aluminium de façon à éviter la contamination pour la poussière lors du transport.

**Requis 8.3 :** L'emballage est conçu de telle sorte que le maniement et le transport ne dégradent ni les éléments, ni leur propreté. L'enceinte à vide est déchargé du camion emballée.

**Requis 8.4 :** Les opérations de manutention et d'emballage sont effectués en portant des gants de protection latex ou vnyle.

**Requis 8.5 :** Les enceintes à ultravide (ou leurs sous-éléments) doivent, par leur volume et leur poids, pouvoir être soulevées par un palan ou un pont roulant ayant une charge maximale de **8 tonnes pour les livraisons à EGO et à NIKHEF et de 5 tonnes pour la livraison à l'INFN Perugia**. Ces enceintes doivent pouvoir être livrées (sans leurs viroles et dômes) dans un local ayant une porte aux dimensions suivantes : **4.2 m x 4.3 m y compris la poutre de levage si nécessaire (largeur x hauteur)**. Le camion de livraison doit pouvoir pénétrer avec sa charge dans le local.

## 4.2 Transport – Livraison

**Requis 9.1 :** Tous les éléments des enceintes à ultra-vide sont livrés à :

European Gravitational Observatory  
Via Edoardo Amaldi,5  
56021 Cascina (PI) – Italy

A l'exception des enceintes à ultravide PRM2 et SRM2 qui seront livrées à :

NIKHEF  
Science Park 105  
1098 XG Amsterdam, Pays-Bas

et  
Laboratorio CAOS  
Via Goffredo Duranti, 93  
06123 Perugia - Italie

**Requis 9.2 :** L'expéditeur annonce la date de transport et de livraison au moins **15 jours calendaires** à l'avance.

**Requis 9.3 :** Le transport est effectué avec un **camion à suspension pneumatique**.

**Requis 9.4 :** Lorsque le véhicule pénètre dans un hall d'essais, le camion ou le chariot élévateur doit être électrique ou équipé d'un tuyau d'évacuation des gaz d'échappement suffisamment long pour **évacuer les gaz d'échappement du moteur à l'extérieur du hall**.

**Requis 9.5 :** Pendant le transport, un **logiciel de suivi de données** est utilisé pour surveiller et enregistrer la température, l'humidité, les chocs et les vibrations. Les données sont transmises au CNRS à la livraison.