

le cnam	CCTP version française Fourniture d'un Réfrigérateur à Dilution (DR) sans liquide cryogénique	Page 1/22
---------	---	-----------

Acquisition d'un Réfrigérateur à dilution (DR) sans liquide cryogénique

CCTP – Cahier des Clauses Techniques Particulières

Procédure n°26-013

Procurement Specifications

An appendix with the technical specifications translated in English is provided at the end of this document

Table des matières

Acronymes et abréviations.....	3
Introduction / Objet du document.....	4
1. Spécifications générales.....	4
2. Exigences de performances du DR	5
3. Espace expérimental.....	7
4. Câblage du DR.....	9
5. Châssis, Cryostat et GHS	10
6. Contrôle et commande	11
7. Dimensions des éléments de connexion	11
8. Interfaces fluides et électriques.....	11
9. Documentation	12
10. Livraison.....	12
11. PSE – Prestations supplémentaires éventuelles	13
Appendix – Technical specifications in English.....	14

Acronymes et abréviations

4K-FLANGE	Bride sur le deuxième étage du PTC-RM (bride 4 K)
4K-SHIELD	Ecran sur le deuxième étage du PTC-RM (écran 4 K)
50K-FLANGE	Bride sur le premier étage du PTC-RM
300K-FLANGE	Bride supérieure du DR
ADD-PLATE	Platine additionnelle en cuivre doré en dessous de la MXC-FLANGE
CCAP	Cahier des Clauses Administratives Particulières
CCTP	Cahier des Clauses Techniques Particulières
CM	Matrice de conformité
COLD-PLATE	Platine froide au-dessus de la chambre de mélange
DR	Réfrigérateur à dilution sans liquide cryogénique (Cryogen-Free Dilution Refrigerator)
EMI	Interférences électromagnétiques
GHS	Circuit de traitement de gaz (Gas Handling System)
HTSC	Câble supraconducteur à haute température
MXC	Chambre de mélange
MXC-FLANGE	Bride de la chambre de mélange
MXC-SHIELD	Ecran sur la chambre de mélange
PTC-RM	Réfrigérateur à tube pulsé double étage, à moteur déporté

le cnam	CCTP version française Fourniture d'un Réfrigérateur à Dilution (DR) sans liquide cryogénique	Page 4/22
---------	---	-----------

Introduction / Objet du document

Le Laboratoire Commun de Métrologie LNE-Cnam du Conservatoire National des Arts et Métiers (Cnam) a obtenu un financement pour créer une nouvelle plateforme dédiée à la réalisation d'étalons de température. Cette plateforme sera installée au sein du Laboratoire Commun de Métrologie LNE-Cnam, situé au 61 rue du Landy, 93210 La Plaine Saint-Denis, France.

A cette fin, nous avons l'intention d'acheter un réfrigérateur à dilution (DR) ne consommant pas de liquide cryogénique, permettant d'atteindre une température minimale de 10 mK.

1. Spécifications générales

Le DR doit être refroidi avec un réfrigérateur à tube pulsé double étage, à moteur déporté, désigné PTC-RM. Le DR doit-être muni d'un étage de température contrôlée dans l'intervalle 10 mK – 1 K, où nous pourrions installer notre équipement sous test.

Le DR objet de cette consultation est un équipement dont un fonctionnement continu doit être possible sur des durées allant jusqu'à 26 semaines, avec des températures maintenues stablement en dessous de 1 K sur la chambre de mélange. A cet effet, compte tenu des configurations de fonctionnement possibles dans notre laboratoire, toute offre non conforme avec les deux critères suivants sera écartée :

1. Le refroidissement du DR doit être assuré par un cryoréfrigérateur (tube pulsé / pulse-tube, ou équivalent). Si, dans son mémoire technique, le candidat ne peut garantir le refroidissement continu par un cryoréfrigérateur, alors l'offre sera écartée.
2. Toutes les vannes du circuit de circulation du mélange $^3\text{He}/^4\text{He}$ doivent être installées à l'extérieur du cryostat, à température ambiante. A titre d'exemple, les vannes cryogéniques, les capteurs de pression cryogéniques, les vannes cryogéniques de régulation de débit à aiguille et/ou à pointeau ne sont pas admises. Si, dans son mémoire technique, le candidat proposera l'installation de composants du circuit de circulation fonctionnant en environnement cryogénique, alors l'offre sera écartée.

Les exigences techniques pour le DR sont répertoriées dans les prochaines sections du document. Nous demandons un système le plus standard possible, avec un coût optimisé et avec un délai de livraison court. Le système sera entièrement testé en usine pour la validation de ses spécifications contractuelles et de ses performances. L'emballage, l'expédition (incluant l'assurance) et l'installation à La Plaine Saint-Denis seront chiffrés dans l'offre commerciale.

le cnam	CCTP version française Fourniture d'un Réfrigérateur à Dilution (DR) sans liquide cryogénique	Page 5/22
---------	---	-----------

On trouvera un résumé de ces exigences sous la forme d'une matrice de conformité (CM).

Spec.1.1 Le Titulaire doit remplir la matrice de conformité avec autant de détails que possible afin que le Pouvoir Adjudicateur puisse évaluer et comparer équitablement les différentes propositions techniques.

2. Exigences de performances du DR

Spec.2.1 Le réfrigérateur (PTC-RM) doit être un cryogénérateur à tube pulsé (pulse-tube) à deux étages avec moteur déporté (remote motor).

Spec.2.2 Le compresseur du cryogénérateur doit être refroidi à l'eau

Spec.2.3 La puissance nominale du PTC-RM doit être $\geq 1,5$ W à 4 K

Spec.2.4 La tête froide du PTC-RM doit être équipée d'un soufflet d'atténuation des vibrations mécaniques sur la 300K-FLANGE et doit être mécaniquement découplée de la 50K-FLANGE et de la 4K-FLANGE (lien souple, tresse en cuivre, ou équivalent).

Spec.2.5 L'ensemble des instruments nécessaires à fournir des informations sur le fonctionnement et les performances du réfrigérateur à dilution doit être fourni : pont de résistances ultra basse température conçu pour le fonctionnement d'un réfrigérateur à dilution, scanner de thermomètres, contrôleur de température de la MXC et du bouilleur, capteurs de température et résistances chauffantes, ainsi que l'ensemble de câbles permettant de relier ces instruments.

Spec.2.6 Tous les thermomètres fournis doivent être étalonnés. Pour chaque thermomètre étalonné, le fournisseur doit indiquer le modèle de capteur, les niveaux d'excitation, les données de mesures d'étalonnage, l'équation polynomiale.

Spec.2.7 Thermomètre de la chambre de mélange : le fournisseur doit indiquer si les fils de mesures sont filtrés RF, ou si le capteur de température est filtré RF, si l'étalonnage a été réalisé in situ.

Spec.2.8 Le DR doit être instrumenté avec au moins 2 jauges à vide afin de surveiller la pression de l'enceinte à vide et celle du bouilleur.

Spec.2.9 La ligne de circulation He du DR doit être instrumentée d'un débitmètre He étalonné.

Spec.2.10 Le mélange de $^3\text{He}/^4\text{He}$, optimisé pour le fonctionnement du DR, doit être fourni.

Spec.	Désignation	Valeur demandée	Commentaire
Spec.2.11	Température limite de la MXC	≤ 10 mK	En présence des câbles électriques de la Spec.4.1 et des câbles coaxiaux de la Spec.4.3, avec courant nul dans les câbles
Spec.2.12	Puissance à 20 mK	très bon ≥ 14 μ W ; bon entre 10 μ W et 14 μ W mauvais < 10 μ W	
Spec.2.13	Puissance à 100 mK	très bon : ≥ 500 μ W bon : ≥ 400 μ W et < 500 μ W	
Spec.2.14	Puissance sur la 4K-FLANGE avec MXC ≤ 100 mK	≥ 500 mW avec $T \leq 5$ K	Spécifications à respecter avec MXC en fonctionnement et courants nuls dans les câbles HTSC de la Spec.4.5
Spec.2.15	Temps de refroidissement à 10 mK	≤ 48 h	Initialement sous vide

Tableau 1 : performances cryogéniques

le cnam	CCTP version française Fourniture d'un Réfrigérateur à Dilution (DR) sans liquide cryogénique	Page 7/22
---------	---	-----------

3. Espace expérimental

Spec.3.1 MXC-SHIELD (écran thermique sur la bride de la chambre de mélange)

Le volume expérimental sous la bride de la chambre de mélange (MXC-FLANGE) doit être entouré par un écran en cuivre doré (MXC-SHIELD) non-étanche. Le MXC-SHIELD doit être montable sur la MXC-FLANGE.

Le volume à l'intérieur du MXC-SHIELD doit avoir :

- un diamètre utile $\varnothing \geq 270$ mm
- et une hauteur utile $h \geq 480$ mm

Spec.3.2 ADD-PLATE (platine additionnelle sous la MXC-FLANGE)

Une platine additionnelle en cuivre doré (ADD-PLATE) doit être installée en dessous de la MXC-FLANGE :

- la distance entre la ADD-PLATE et la MXC-FLANGE doit être $d \geq 240$ mm ;
- la distance entre la ADD-PLATE et le fond du MXC-SHIELD doit être ≥ 10 mm, pour éviter tout risque de contact direct entre la ADD-PLATE et le MXC-SHIELD
- l'épaisseur de la ADD-PLATE doit être le même que celui de la MXC-FLANGE ;
- le diamètre de la ADD-PLATE doit être $\varnothing \geq 240$ mm et inférieur au diamètre intérieur du MXC-SHIELD, pour éviter tout risque de contact direct entre la ADD-PLATE et le MXC-SHIELD ;
- la ADD-PLATE doit avoir des trous et des trous taraudés dans la même configuration de la MXC-FLANGE ;
- la ADD-PLATE doit être démontable.

Spec.3.3 Un lien thermique approprié entre la ADD-PLATE et la MXC-FLANGE doit être fourni. Ce lien thermique doit comporter, en particulier, deux barres en cuivre doré démontables (lien thermique amovible).

Spec.3.4 La ADD-PLATE doit être instrumentée avec le même type de capteur de température installé sur la MXC-FLANGE et étalonné.

Spec.3.5 Ports d'accès

La bride supérieure de l'enceinte à vide (300K-FLANGE) comprendra au minimum 7 ports d'accès selon :

- a) minimum $2 \times$ KF16 et/ou KF25,
- b) minimum $4 \times$ KF40 et/ou KF50,
- c) si possible $1 \times$ ISO-K DN63.

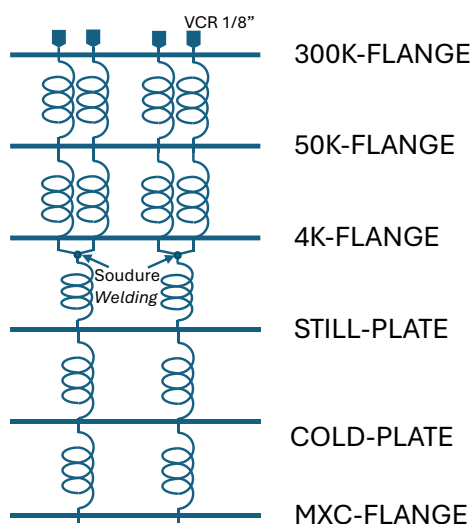
Spec.3.6 Tubes capillaires

Deux (2) lignes de tubes capillaires de diamètre 0,5 mm en CuNi ou en acier inoxydable doivent être installées dans le cryostat.

Chaque ligne doit respecter la configuration suivante :

- Entre la 300K-FLANGE et la 4K-FLANGE, la ligne est composée de deux tubes capillaires (*capillaires supérieurs*), ancrés thermiquement à tous les étages.
- Entre la 4K-FLANGE et la MXC-FLANGE, la ligne est composée d'un seul tube capillaire (*capillaire inférieur*), ancré thermiquement à tous les étages.
- Les capillaires supérieurs sont raccordés par soudure au capillaire inférieur à proximité de la 4K-FLANGE

Cette configuration est répétée deux fois, selon le schéma suivant :



Spec.3.7 Les tubes capillaires de la Spec.3.6 doivent être :

- ancrés thermiquement à tous les étages du DR
- étanches, avec un taux de fuite à l'hélium $< 10^{-8}$ mbar·l/s ;
- nettoyés avec les mêmes procédures que les tubes capillaires du réfrigérateur à dilution ;
- équipés de connecteurs Swagelok VCR® 1 / 8 " (ou équivalent) sur la 300K-FLANGE ;
- les connecteurs Swagelok VCR® 1 / 8 " (ou équivalent) doivent être accessibles à l'extérieur de la 300K-FLANGE

le cnam	CCTP version française Fourniture d'un Réfrigérateur à Dilution (DR) sans liquide cryogénique	Page 9/22
---------	---	-----------

4. Câblage du DR

Spec.4.1 Câbles électriques

Des câbles électriques destinés au raccordement des instruments du client doivent être installés :

- a) 24 paires torsadées (48 fils) à faible impédance (en NbTi en dessous de 4 K) de la 300K-FLANGE à la MXC-FLANGE, avec connecteurs aux extrémités.
- b) 24 paires torsadées (48 fils) en cuivre de la 300K-FLANGE à la 4K-FLANGE, avec connecteurs aux extrémités.
- c) 12 paires torsadées (24 fils) en bronze phosphoreux ou constantan de la 300K-FLANGE à la MXC-FLANGE, avec connecteurs aux extrémités

Spec.4.2 Les câbles électriques listés dans la Spec.4.1 doivent être ancrés thermiquement aux différents étages du cryostat et doivent avoir un blindage électromagnétique.

Spec.4.3 Câbles coaxiaux (min 20, max 24)

Entre vingt (20) et vingt-quatre (24) câbles coaxiaux 18 GHz équipés de connecteurs SMA et destinés au raccordement des instruments du client doivent être installés entre la 300K-FLANGE et la MXC-FLANGE

Spec.4.4 Les câbles coaxiaux listés dans Spec.4.3 doivent être ancrés thermiquement aux différents étages du cryostat.
L'ancrage thermique doit être réalisé avec des atténuateurs 0 dB

Spec.4.5 Câbles HTSC 100 A

Deux paires de fils (soit 4 fils) supraconducteurs haute température (HTSC ou équivalent) supportant des courants jusqu'à 100 A doivent être installées entre la 300K-FLANGE et la 4K-FLANGE.

Spec.4.6 Le Titulaire devra détailler les raccords installés sur les câbles HTSC (Spec.4.5) au niveau de la 4K-FLANGE

le cnam	CCTP version française Fourniture d'un Réfrigérateur à Dilution (DR) sans liquide cryogénique	Page 10/22
---------	---	------------

5. Châssis, Cryostat et GHS

- Spec.5.1** Un cadre de support pour le cryostat, reposant sur le sol, doit être fourni.
- Spec.5.2** Le cadre de support doit atténuer les vibrations mécaniques du cryostat.
Il doit être équipé d'un système actif d'atténuation des vibrations mécaniques.
- Spec.5.3** La baie du GHS, la baie de l'unité de contrôle et commande, le compresseur du PTC-RM doivent être mobiles, avec roulettes à freins.
- Spec.5.4** Les pompes et compresseurs He du GHS doivent assurer l'absence de contamination de l'hélium par de l'huile ou de la poussière. Le Titulaire doit détailler les types et caractéristiques des pompes et compresseurs He utilisés.
- Spec.5.5** Tous les équipements He du GHS tels que pompes et compresseurs, vannes, canalisations, capteurs de pression/vide, débitmètre gaz, filtres à gaz, réservoir de stockage de gaz, raccords vide, pièces soudées seront étanches avec un taux de fuite à l'hélium $< 10^{-8}$ mbar·l/s, si possible $< 10^{-10}$ mbar·l/s
- Spec.5.6** Les moyens utilisés afin de protéger l'impédance principale de condensation He du DR contre le colmatage par des impuretés particulaires ou des condensats doivent être détaillées : type de filtre, localisation, maintenance.
- Spec.5.7** Récupération d'urgence du gaz : une description des problèmes potentiels (tels que coupure électrique, bouchage de la ligne de condensation, rupture du vide, etc.) pouvant intervenir pendant le fonctionnement doit être donnée. Les solutions mises en place pour éviter la perte du mélange $^3\text{He}/^4\text{He}$ doivent être décrites.
- Spec.5.8** Le cryostat doit être isolé électriquement de son châssis, du GHS, des pompes et compresseurs He.
- Spec.5.9** L'entrée de la réserve (dump) de mélange $^3\text{He}/^4\text{He}$ doit être équipée d'un manomètre mécanique.
- Spec.5.10** Un piège à azote liquide permettant une autonomie ≥ 60 h doit être installé sur le GHS.

le cnam	CCTP version française Fourniture d'un Réfrigérateur à Dilution (DR) sans liquide cryogénique	Page 11/22
---------	---	------------

6. Contrôle et commande

- Spec.6.1** Le logiciel de contrôle à distance du système et son interface de commande doivent autoriser :
- une télécommande complète de toutes les pompes, vannes et électronique intégrée,
 - la surveillance à distance de tous les paramètres du système, les capteurs de pression, les thermomètres et les résistances chauffantes.
- Spec.6.2** Le logiciel de contrôle-commande doit être fourni avec une procédure automatique de refroidissement, de la température ambiante à la température minimale.
- Spec.6.3** Les variables du logiciel de contrôle-commande permettant de piloter le système et de lire les mesures des capteurs doivent être accessibles en lecture/écriture par d'autres logiciels (par exemple : LabVIEW™ ou Python).

7. Dimensions des éléments de connexion

- Spec.7.1** La hauteur hors tout de chaque équipement ne doit pas dépasser 3,00 m
- Spec.7.2** Toutes les lignes de tuyauterie reliant le GHS au cryostat doivent avoir une longueur ≥ 2 m.
- Spec.7.3** Les lignes flexibles He du PTC-RM entre le compresseur et le moteur doivent avoir une longueur ≥ 20 m.
- Spec.7.4** Tous les câbles électriques entre le GHS / Unité de contrôle et le cryostat doivent avoir une longueur ≥ 5 m.
- Spec.7.5** Le Titulaire doit donner le poids des équipements principaux.

8. Interfaces fluides et électriques

- Spec.8.1** Le Titulaire doit fournir un schéma montrant toutes les canalisations de fluide entre les différents sous-systèmes.
- Spec.8.2** Toutes les interfaces fluides doivent être explicitement étiquetés conformément à la documentation et aux plans.
- Spec.8.3** Le Titulaire doit indiquer le schéma de câblage électrique entre les différents sous-systèmes.
- Spec.8.4** Tout le câblage électrique doit être étiqueté conformément à sa documentation et aux plans.
- Spec.8.5** Les équipements électriques doivent être adaptés au courant électrique distribué en France, soit 230 V / 50 Hz / 1 ph ou 400 V / 50 Hz / 3 ph (+neutre)

9. Documentation

Le Titulaire doit fournir, dans le cadre du projet, toute la documentation nécessaire, y compris les plans, permettant de : tester complètement le système en usine afin de vérifier ses spécifications contractuelles et ses performances, faire fonctionner le système et assurer son entretien.

- Spec.9.1** Le protocole des tests de performances en usine doit être défini par le Titulaire, puis soumis au LNE-Cnam et approuvé par le LNE-Cnam avant d'effectuer des essais de réception à l'usine
- Spec.9.2** Le rapport des tests de performances en usine doit être approuvé et signé par le LNE-Cnam, avant l'expédition du système au LNE-Cnam.
- Spec.9.3** Les certificats d'étalonnage et de conformité CE doivent être fournis lors de la livraison du système au LNE-Cnam.
- Spec.9.4** Un plan de maintenance des équipements doit être fourni lors de la livraison du système au LNE-Cnam.
- Spec.9.5** Le manuel de l'utilisateur avec les instructions d'utilisation et dépannage et avec la description des logiciels de commande doit être fourni lors de l'installation du système au LNE-Cnam.
- Spec.9.6** Le Titulaire devra fournir un ensemble complet de plans détaillés du cryostat décrivant : la platine supportant le cryostat, toutes les interfaces système incluant la tête froide du PTC-RM, la 300K-FLANGE, les ports d'accès, des vues en coupe du cryostat montrant tous les écrans et toutes les platines expérimentales.
- Spec.9.7** Le Titulaire doit être en mesure de fournir, au moment de la livraison finale, le fichier STEP 3D de l'ensemble du DR livré.

10. Livraison

- Spec.10.1** L'offre commerciale doit inclure les coûts d'emballage et d'expédition (incluant l'assurance) à l'adresse suivante :

Laboratoire Commun de Métrologie LNE-Cnam
Case 2LAB10
61 rue du Landy
93210 La Plaine Saint-Denis France

La hauteur des emballages doit être $\leq 2,00$ m et la largeur $\leq 1,30$ m.

- Spec.10.2** L'offre commerciale doit inclure les coûts d'installation de l'équipement à La Plaine Saint-Denis par du personnel qualifié du Titulaire, ainsi que la formation de base du personnel du laboratoire à l'utilisation du DR.

le cnam	CCTP version française Fourniture d'un Réfrigérateur à Dilution (DR) sans liquide cryogénique	Page 13/22
---------	---	------------

11. PSE – Prestations supplémentaires éventuelles

- PSE 1.** Un réservoir d'hélium liquide (batterie d'hélium) d'environ 1 litre doit être installé sur la 4K-FLANGE, pour permettre un fonctionnement temporaire avec le PTC-RM éteint
- PSE 2.** L'offre commerciale doit inclure une maintenance des équipements principaux après les 2 premières années de service.
- PSE 3.** Une deuxième réserve (dump) pour le mélange $^3\text{He}/^4\text{He}$ doit être fournie avec les mêmes caractéristiques de la réserve principale.
- PSE 4.** Une alimentation 4 quadrants adaptée à un aimant supraconducteur 9 T doit être fournie.
- PSE 5.** Un variateur de la fréquence de fonctionnement du compresseur du PTC-RM (linear drive ou équivalent) doit être fourni.
- PSE 6.** Câbles HTSC 5 A
Quatre paires de fils (8 fils) supraconducteurs haute température supportant des courants jusqu'à 5 A doivent être installés entre la 300K-FLANGE et la 4K-FLANGE

Appendix – Technical specifications in English

It should be noted that the official version of the specifications is the French one. The English version is published here for convenience.

Acronyms

4K-FLANGE	Flange on the second stage of the PTC-RM
4K-SHIELD	Shield on the second stage of the PTC-RM
50K-FLANGE	Flange on the first stage of the PTC-RM
300K-FLANGE	Flange on the top of the CF-DR
ADD-PLATE	Additional plate in gold-plated copper, below the MXC-FLANGE
CCAP	Special Administrative Clauses Specifications
CCTP	Special Technical Clauses Specifications
CM	Compliance Matrix
COLD-PLATE	Cold plate of the dilution refrigerator (above the mixing chamber)
DR	Cryogen-Free Dilution Refrigerator
EMI	Electromagnetic Interference
GHS	Gas Handling System
HTSC	High-Temperature Superconductor Cable
MXC	Mixing Chamber
MXC-FLANGE	Flange on the mixing chamber
MXC-SHIELD	Shield on the mixing chamber
PTC-RM	Double-stage Pulse-tube refrigerator, with remote motor

Introduction

The Joint Metrology Laboratory LNE-Cnam at the Conservatoire National des Arts et Métiers (Cnam) has secured funding to create a new platform dedicated to the development of temperature standards. This platform will be installed at the Joint Metrology Laboratory LNE-Cnam, located at 61 rue du Landy, 93210 La Plaine Saint-Denis, France.

To this end, we intend to purchase a cryogen-free dilution refrigerator (DR) reaching a minimum temperature of 10 mK.

General specifications

The DR shall be cooled with a two-stage pulse-tube refrigerator, hereafter referred to as PTC-RM. The DR must be equipped with a temperature-controlled stage in the range of 10 mK – 1 K, where our equipment under test will be installed.

The DR shall be capable of continuous operation for periods of up to 26 weeks, with temperatures maintained stably below 1 K in the mixing chamber. Therefore, considering the expected operating configurations in our laboratory, any offer not meeting the following two criteria will be rejected:

le cnam	CCTP version française Fourniture d'un Réfrigérateur à Dilution (DR) sans liquide cryogénique	Page 15/22
---------	---	------------

1. Cooling shall be ensured by a cryocooler (pulse-tube or equivalent). If the bidder cannot guarantee continuous cooling in its technical proposal, the bid will be rejected.
2. All valves in the $^3\text{He}/^4\text{He}$ loop must be installed outside the cryostat, at ambient temperature. For example, cryogenic valves, cryogenic pressure sensors, and cryogenic needle valves are not allowed. Any non-compliant technical proposal will be rejected.

The technical requirements for the DR are listed in the following sections of the document. We request a system that is as standard as possible, with optimized cost and short delivery lead time. The system will be fully factory-tested to validate its contractual specifications and performance. Packaging, shipping (including insurance), and installation in La Plaine Saint-Denis shall be included in the quotation. A summary of these requirements will be found in the form of a compliance matrix (CM).

Spec.1.1 The Contractor shall fill in the compliance matrix with as much detail as possible so that the Contracting Authority can fairly evaluate and compare the various technical proposals.

Performance requirements for the DR

Spec.2.1 The refrigerator (PTC-RM) shall be a two-stage pulse-tube cryocooler with a remote motor.

Spec.2.2 The cryocooler compressor shall be water-cooled.

Spec.2.3 The nominal cooling power of the PTC-RM shall be ≥ 1.5 W at 4 K.

Spec.2.4 The cold head of the PTC-RM shall be fitted with a mechanical vibration damping bellows on the 300K-FLANGE and shall be mechanically decoupled from the 50K-FLANGE and the 4K-FLANGE (flexible link, copper braid, or equivalent).

Spec.2.5 All instruments required to provide information on the operation and performance of the dilution refrigerator shall be supplied: an ultra-low temperature resistance bridge designed for dilution refrigerator operation, a thermometer scanner, a temperature controller for the MXC and the still, temperature sensors and heater resistors, as well as all cables required to connect these instruments.

Spec.2.6 All supplied thermometers shall be calibrated. For each calibrated thermometer, the supplier shall specify the sensor model, excitation levels, calibration measurement data, and the polynomial equation.

Spec.2.7 Mixing chamber thermometer: the supplier shall indicate whether the measurement leads are RF-filtered, or whether the temperature sensor is RF-filtered, and whether the calibration was performed in situ.

Spec.2.8 The DR shall be instrumented with at least 2 vacuum gauges in order to monitor the pressure of the vacuum enclosure and that of the still.

Spec.2.9 The He circulation line of the DR shall be instrumented with a calibrated He flow meter.

Spec.2.10 The $^3\text{He}/^4\text{He}$ mixture, optimized for DR operation, shall be supplied.

Spec.	Designation	Required Value	Comment
Spec.2.11	MXC base temperature	$\leq 10 \text{ mK}$	In the presence of the electrical cables of Spec.4.1 and the coaxial cables of Spec.4.3, with zero current in the cables
Spec.2.12	Cooling power at 20 mK	very good $\geq 14 \mu\text{W}$; good between $10 \mu\text{W}$ and $14 \mu\text{W}$; poor $< 10 \mu\text{W}$	
Spec.2.13	Cooling power at 100 mK	very good: $\geq 500 \mu\text{W}$; good: $\geq 400 \mu\text{W}$ and $< 500 \mu\text{W}$	
Spec.2.14	Cooling power on the 4K-FLANGE with MXC $\leq 100 \text{ mK}$	$\geq 500 \text{ mW}$ with $T \leq 5 \text{ K}$	Specifications to be met with MXC in operation and zero currents in the HTSC cables of Spec.4.5
Spec.2.15	Cooldown time to 10 mK	$\leq 48 \text{ h}$	Initially under vacuum

Table 1: cryogenic performances

le cnam	CCTP version française Fourniture d'un Réfrigérateur à Dilution (DR) sans liquide cryogénique	Page 17/22
---------	---	------------

Sample space

- Spec.3.1** MXC-SHIELD (thermal shield on the mixing chamber flange)
The experimental volume below the mixing chamber flange (MXC-FLANGE) must be surrounded by a non-airtight gold-plated copper shield (MXC-SHIELD). The MXC-SHIELD must be mountable on the MXC-FLANGE.
The volume inside the MXC-SHIELD must have:
- a useful diameter $\varnothing \geq 270$ mm
 - and a useful height $h \geq 480$ mm
- Spec.3.2** ADD-PLATE (additional plate below the MXC-FLANGE)
A gold-plated copper additional plate (ADD-PLATE) must be installed below the MXC-FLANGE:
- the distance between the ADD-PLATE and the MXC-FLANGE must be $d \geq 240$ mm;
 - the distance between the ADD-PLATE and the bottom of the MXC-SHIELD must be ≥ 10 mm, to avoid any risk of direct contact between the ADD-PLATE and the MXC-SHIELD;
 - the thickness of the ADD-PLATE must be the same as that of the MXC-FLANGE;
 - the diameter of the ADD-PLATE must be $\varnothing \geq 240$ mm and less than the inner diameter of the MXC-SHIELD, to avoid any risk of direct contact between the ADD-PLATE and the MXC-SHIELD;
 - the ADD-PLATE must have holes and tapped holes in the same configuration as the MXC-FLANGE;
 - the ADD-PLATE must be removable.
- Spec.3.3** An appropriate thermal link between the ADD-PLATE and the MXC-FLANGE must be provided. This thermal link must include, in particular, two removable gold-plated copper bars (removable thermal link).
- Spec.3.4** The ADD-PLATE must be instrumented with the same type of temperature sensor as installed on the MXC-FLANGE, and calibrated.
- Spec.3.5** Access ports
The upper flange of the vacuum enclosure (300K-FLANGE) shall include a minimum of 7 access ports as follows:
- a) minimum $2 \times$ KF16 and/or KF25,
 - b) minimum $4 \times$ KF40 and/or KF50,
 - c) if possible $1 \times$ ISO-K DN63.

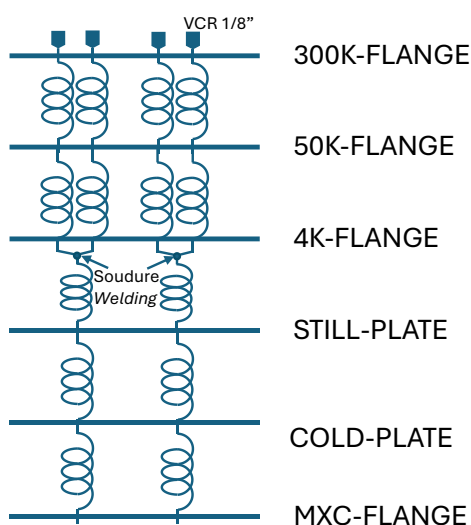
Spec.3.6 Capillary tubes

Two (2) capillary tube lines with a diameter of 0.5 mm in CuNi or stainless steel must be installed in the cryostat.

Each line must follow the configuration below:

- Between the 300K-FLANGE and the 4K-FLANGE, the line consists of two capillary tubes (upper capillaries), thermally anchored at every stage.
- Between the 4K-FLANGE and the MXC-FLANGE, the line consists of a single capillary tube (lower capillary), thermally anchored at every stage.
- The upper capillaries are soldered to the lower capillary in the vicinity of the 4K-FLANGE.

This configuration is repeated twice, according to the following diagram:



Spec.3.7 The capillary tubes from Spec.3.6 must be:

- thermally anchored at every stage of the DR;
- leak-tight, with a helium leak rate $< 10^{-8}$ mbar·l/s;
- cleaned using the same procedures as the dilution refrigerator capillary tubes;
- fitted with Swagelok VCR® 1/8" connectors (or equivalent) on the 300K-FLANGE;
- the Swagelok VCR® 1/8" connectors (or equivalent) must be accessible from outside the 300K-FLANGE.

le cnam	CCTP version française Fourniture d'un Réfrigérateur à Dilution (DR) sans liquide cryogénique	Page 19/22
---------	---	------------

Wiring and cabling

Spec.4.1 Electrical cables

Electrical cables for connecting customer instruments must be installed:

- a) 24 twisted pairs (48 wires), low-impedance (NbTi below 4 K), from the 300K-FLANGE to the MXC-FLANGE, with connectors at both ends.
- b) 24 twisted pairs (48 wires) in copper, from the 300K-FLANGE to the 4K-FLANGE, with connectors at both ends.

12 twisted pairs (24 wires) in phosphor bronze or constantan, from the 300K-FLANGE to the MXC-FLANGE, with connectors at both ends.

Spec.4.2 The electrical cables listed in Spec.4.1 must be thermally anchored at the various stages of the cryostat and must have electromagnetic shielding.

Spec.4.3 Coaxial cables (min 20, max 24)

Between twenty (20) and twenty-four (24) 18 GHz coaxial cables fitted with SMA connectors, intended for connecting customer instruments, must be installed between the 300K-FLANGE and the MXC-FLANGE.

Spec.4.4 The coaxial cables listed in Spec.4.3 must be thermally anchored at the various stages of the cryostat.

Thermal anchoring must be achieved using 0 dB attenuators.

Spec.4.5 HTSC 100 A cables

Two pairs of wires (i.e. 4 wires) of high-temperature superconducting (HTSC or equivalent) capable of carrying currents up to 100 A must be installed between the 300K-FLANGE and the 4K-FLANGE.

Spec.4.6 The Contractor must detail the connectors installed on the HTSC cables (Spec.4.5) at the 4K-FLANGE level.

Mounting frame, Cryostat and GHS

Spec.5.1 A floor-standing support frame for the cryostat must be supplied.

Spec.5.2 The support frame must attenuate mechanical vibrations of the cryostat. It must be equipped with an active mechanical vibration damping system.

Spec.5.3 The GHS rack, the control and command unit rack, and the PTC-RM compressor must be mobile, fitted with locking castors.

Spec.5.4 The GHS He pumps and compressors must ensure that helium is free from contamination by oil or dust. The Contractor must detail the types and characteristics of the He pumps and compressors used.

Spec.5.5 All GHS He equipment such as pumps and compressors, valves, pipework, pressure/vacuum sensors, gas flow meters, gas filters, gas storage tanks, vacuum fittings, and welded parts must be leak-tight with a helium leak rate $< 10^{-8}$ mbar·l/s, and if possible $< 10^{-10}$ mbar·l/s.

Spec.5.6 The means used to protect the main DR He condensation impedance against clogging by particulate impurities or condensates must be detailed: filter type, location, and maintenance.

le cnam	CCTP version française Fourniture d'un Réfrigérateur à Dilution (DR) sans liquide cryogénique	Page 20/22
---------	---	------------

- Spec.5.7** A description of potential issues (such as power failure, condensation line blockage, vacuum failure, etc.) that may occur during operation must be provided. The solutions implemented to prevent loss of the $^3\text{He}/^4\text{He}$ mixture must be described.
- Spec.5.8** The cryostat must be electrically isolated from its frame, the GHS, and the He pumps and compressors.
- Spec.5.9** The inlet of the $^3\text{He}/^4\text{He}$ mixture dump must be fitted with a mechanical pressure gauge.
- Spec.5.10** A liquid nitrogen trap providing an autonomy of ≥ 60 h must be installed on the GHS.

Control system

- Spec.6.1** The system remote control software and its command interface must allow:
- complete remote control of all pumps, valves, and integrated electronics;
 - remote monitoring of all system parameters, pressure sensors, thermometers, and heater resistors.
- Spec.6.2** The control and command software must be supplied with an automated cooling-down procedure, from ambient temperature to minimum temperature.
- Spec.6.3** The control and command software variables used to operate the system and to read sensor measurements must be accessible in read/write mode by other software applications (e.g. LabVIEW™ or Python).

Dimensions of connecting parts

- Spec.7.1** The overall height of each piece of equipment must not exceed 3.00 m.
- Spec.7.2** All pipework lines connecting the GHS to the cryostat must have a length ≥ 2 m.
- Spec.7.3** The PTC-RM flexible He lines between the compressor and the motor must have a length ≥ 20 m.
- Spec.7.4** All electrical cables between the GHS / control unit and the cryostat must have a length ≥ 5 m.
- Spec.7.5** The Contractor must provide the weight of the main equipment items.

Fluid and electrical interfaces

- Spec.8.1** The Contractor must provide a diagram showing all fluid lines between the various sub-systems.
- Spec.8.2** All fluid interfaces must be explicitly labelled in accordance with the documentation and drawings.
- Spec.8.3** The Contractor must provide the electrical wiring diagram between the various sub-systems.
- Spec.8.4** All electrical wiring must be labelled in accordance with its documentation and drawings.
- Spec.8.5** Electrical equipment must be compatible with the electrical supply distributed in France, i.e. 230 V / 50 Hz / 1-phase or 400 V / 50 Hz / 3-phase (+ neutral).

le cnam	CCTP version française Fourniture d'un Réfrigérateur à Dilution (DR) sans liquide cryogénique	Page 21/22
---------	---	------------

Documentation

The Contractor must provide, as part of the project, all necessary documentation, including drawings, to fully test the system at the factory in order to verify its contractual specifications and performance, and to operate the system and ensure its maintenance.

- Spec.9.1** The factory performance test protocol shall be defined by the Contractor, then submitted to LNE-Cnam and approved by LNE-Cnam prior to conducting factory acceptance tests.
- Spec.9.2** The factory performance test report shall be approved and signed by LNE-Cnam before the system is shipped to LNE-Cnam.
- Spec.9.3** Calibration certificates and CE conformity certificates shall be provided upon delivery of the system to LNE-Cnam.
- Spec.9.4** An equipment maintenance plan shall be provided upon delivery of the system to LNE-Cnam.
- Spec.9.5** The user manual, including operating and troubleshooting instructions and a description of the control software, shall be provided upon installation of the system at LNE-Cnam.
- Spec.9.6** The Contractor shall provide a complete set of detailed drawings of the cryostat describing: the plate supporting the cryostat, all system interfaces including the PTC RM cold head, the 300K-FLANGE, the access ports, and cross-sectional views of the cryostat showing all shields and all experimental plates.
- Spec.9.7** The Contractor shall be able to provide, at the time of final delivery, the 3D STEP file of the complete delivered DR assembly.

Delivery

- Spec.10.1** The commercial offer shall include packaging and shipping costs (including insurance) to the following address:

Laboratoire Commun de Métrologie LNE-Cnam
Case 2LAB10
61 rue du Landy
93210 La Plaine Saint-Denis, France.

The height of the packaging shall be ≤ 2.00 m and the width ≤ 1.30 m.

- Spec.10.2** The commercial offer shall include the costs of installing the equipment at La Plaine Saint-Denis by qualified personnel of the Contractor, as well as basic training of laboratory staff in the use of the DR.

PSE - Options

- PSE 1** A liquid helium reservoir (helium battery) of approximately 1 litre shall be installed on the 4K-FLANGE, to allow temporary operation with the PTC-RM switched off.
- PSE 2** The commercial offer shall include maintenance of the main equipment after the first 2 years of service.
- PSE 3** A second dump for the $^3\text{He}/^4\text{He}$ mixture shall be provided with the same specifications as the main dump.
- PSE 4** A 4-quadrant power supply suitable for a 9 T superconducting magnet shall be provided.
- PSE 5** A frequency drive for the operating frequency of the PTC-RM compressor (linear drive or equivalent) shall be provided.
- PSE 6** **HTSC Cables 5 A**
Four pairs of wires (8 wires) of high-temperature superconducting material capable of carrying currents up to 5 A shall be installed between the 300K-FLANGE and the 4K-FLANGE.