
DATE :08/06/2026

N / RÉF : DRT-LETI-DOPT-SNAP-LIPS-26-05-001141 OBJET : ACHAT CRYOSTAT

1. Description générale de l'équipement

Acquisition et mise en service d'un cryostat à circuit fermé d'hélium (1K) dédié à la caractérisation de circuits photoniques intégrés

La présente consultation porte sur l'acquisition et la mise en service d'un cryostat permettant d'atteindre et de maintenir des températures de fonctionnement inférieures à 1K, en vue de conduire des expériences et mesures à très basses températures.

Cette demande s'inscrit dans le contexte du projet OQULUS (PEPR Technologies Quantiques), financé dans le cadre de la stratégie nationale quantique (France 2030), visant au développement d'ordinateurs quantiques optiques. L'objectif du CEA est de se doter d'un système cryogénique robuste et polyvalent dédié au développement de dispositifs quantiques de nouvelle génération.

L'équipement demandé sera utilisé pour la caractérisation de composants et circuits dans le domaine de la photonique intégré sur silicium. Il sera notamment destiné à la caractérisation de circuits photoniques intégrés (PICs) comportant des détecteurs de photons uniques à nanofils supraconducteurs (SNSPD). Ces détecteurs requièrent un environnement cryogénique afin d'atteindre le régime supraconducteur et d'assurer des performances optimales en termes d'efficacité de détection et de bruit de mesure, conditionnant la température d'opération du cryostat recherché (<1K).

Le cœur de l'équipement comprendra une enceinte cryogénique sous vide accueillant plusieurs étages thermiques refroidis par un réfrigérateur à tube pulsé et par un circuit de refroidissement à évaporation d'hélium. Il comportera également un système de mesure de la température aux différents étages et permettra une régulation précise de la température au niveau de l'échantillon. Chacun des 3 étages de refroidissement (que l'on identifiera par la suite comme « platine 50K », « platine 4K » et « platine 1K » ou « platine échantillon ») sera de plus isolé thermiquement par des écrans afin de limiter les échanges thermiques par rayonnement. Le cryostat sera fourni équipé du câblage électrique et des composants

électroniques (lignes DC et lignes coaxiales RF telles que spécifié dans la suite du document) permettant l'envoi et la lecture de signaux vers des puces installées sur l'étage thermique le plus froid. Un port supplémentaire permettra l'aménagement ultérieur d'accès optiques, pour l'injection et la collecte de photons via fibres optiques au travers l'enceinte sous vide. Le cryostat devra également être compatible avec l'intégration ultérieure de porte-échantillons, ainsi qu'avec l'installation ultérieure d'une station de mesure photonique cryogénique basée sur des micro-positionneurs pour la caractérisation de puces photoniques non packagées. Il disposera ainsi d'un volume expérimental aménageable suffisant pour l'intégration future de ces équipements et devra disposer de ports optiques verticaux traversant les différents écrans thermiques offrant une ligne de vue directe sur la platine échantillon.

Le cryostat sera livré avec l'ensemble des systèmes auxiliaires et de l'instrumentation nécessaires à son fonctionnement et à son pilotage, comprenant entre autres :

- Une armoire avec un système de gestion des gaz (Gas Handling System - GHS), incluant pompes, compresseurs, vannes, capteurs de pressions et de débits, etc, et assurant la circulation et la régulation des fluides cryogéniques ainsi que la mise sous vide de l'enceinte.
- Un ou plusieurs pièges froids destinés à la purification du circuit d'hélium par condensation des potentiels contaminants.
- Un panneau de contrôle local et/ou un système de commande par ordinateur via logiciel, permettant la réalisation des phases de mise à froid et de réchauffement de manière automatisée.

L'ensemble du cryo-réfrigérateur sera conçu pour permettre des campagnes de mesure prolongées de plusieurs mois en continu, en garantissant un haut niveau de fiabilité, de stabilité thermique et mécanique et de répétabilité des conditions expérimentales.

2. Implantation et architecture du cryostat

2.1. *Contraintes d'implantation et encombrement*

Le cryostat et l'ensemble des équipements auxiliaires sont destinés à être installés dans une salle disposant :

- D'une distribution électrique triphasée (3 phases + neutre + terre)
Tension phase/phase : 400 V +/- 10 %
Tension phase/neutre voltage : 230 V +/- 10 %
- D'une distribution électrique monophasée (1 phase + neutre + terre)
Tension phase/neutre : 230 V +/- 10 %
- De circuits de réfrigération à eau (température entrée : 23°C, débit maximum : 800 L/h)
- D'un circuit d'air comprimé (jusqu'à 10 bars)

Exigence 1 – Plan d'implantation : Un plan détaillé de l'agencement des composants dans la salle devra être proposé avant installation, en interaction avec le CEA, en tenant compte de la configuration des lieux et de ses accès. L'ensemble de l'équipement devra s'intégrer dans l'espace disponible en garantissant une utilisation sûre et sans encombrement, avec un espace de travail confortable autour du cryostat et du poste de contrôle, ainsi qu'un dégagement suffisant pour la maintenance des équipements.

Exigence 2 – Dimensions : Le fournisseur devra préciser dans l'offre technique les dimensions ainsi que le poids des sous-ensembles majeurs du système (cryostat, châssis, GHS, unité de contrôle, compresseur, etc.).

Exigence 3 – Liste des systèmes auxiliaires : Les équipements auxiliaires nécessaires au fonctionnement du système (pompes, compresseurs, etc.) devront être listés et décrits dans la proposition technique (idéalement avec leurs références produit).

Exigence 4 – Raccordement aux installations : Les exigences relatives au raccordement aux installations devront être précisées dans l'offre technique : nombre et nature des alimentations électriques (monophasées ou triphasées, type de prise, puissance requise, etc), nombre de lignes d'air comprimé et leurs caractéristiques (pression nominale, etc), nombre de circuits d'eau de refroidissement et spécifications associées (débit, température, etc), ainsi que tout autre besoin technique requis pour l'exploitation de l'équipement.

Exigence 5 – Document préalable à l'installation : Un document détaillant les exigences d'installation sur site sera transmis préalablement à la livraison du système.

Exigence 6 – Dimensions pour installation : Pour l'installation du système, le châssis et tous les sous-ensembles devront être suffisamment modulaires de sorte à pouvoir passer à travers une porte standard de 1m de largeur et 2m de hauteur, sans nécessiter de modification structurelle du bâtiment.

2.2. Architecture du cryostat

Exigence 7 – Châssis : Le cryostat sera suspendu par un châssis en aluminium à une hauteur permettant son ouverture (retrait de l'enceinte et des écrans thermiques) ainsi que sa fermeture sans recours à un dispositif de levage (treuil, palan ou monte-charge). Le châssis, stable et robuste, sera conçu pour prévenir tout risque de bascule du système lors de ces opérations. Le support sera également rigide et conçu afin de limiter les vibrations du système en accord avec l'Exigence 57.

Exigence 8 – Accessibilité aux platines : En plus de la platine échantillon, les étages supérieurs du cryostat (4K et 50K) seront accessibles et équipables afin de permettre la mise en place et la thermalisation de câbles, de fibres optiques ou de composants électroniques. Les platines devront comporter plusieurs orifices équipables de passe-parois, permettant l'installation du câblage souhaité. L'accessibilité devra être conçue de manière à permettre au client de modifier ou de mettre à niveau ultérieurement le câblage expérimental traversant ces étages. Les platines devront également comporter une matrice de trous taraudés à la norme métrique ISO permettant le montage modulable d'équipements.

Exigence 9 – Ecran de rayonnement : Chaque étage (étages 50K, 4K et 1K) devra être muni d'un écran de rayonnement thermalisé, en cuivre sans oxygène plaqué or pour l'étage échantillon.

Exigence 10 – Enceinte en deux sections : L'enceinte devra être constituée de deux sections afin de permettre un accès partiel aux étages les plus froids sans démontage complet de l'ensemble.

Exigence 11 – Joints et connexions du circuit hélium : Afin de limiter les risques de fuite, toutes les connexions de la ligne d'hélium devront être réalisées par joints métal-métal ou par soudures laser ou équivalent. L'utilisation de brasures tendres et de joints élastomères (O-rings) est proscrite.

Exigence 12 – Etanchéité des traversées étanches : Toutes les traversées étanches au niveau de l'étage 300K doivent garantir une herméticité élevée, avec un taux de fuite inférieur à 10^{-8} mbar·L/s.

2.3. Caractéristiques de l'espace expérimental

Exigence 13 – Dimension platine échantillon : Le cryostat sera équipé d'une platine « échantillon » d'un diamètre minimum de 300mm ou d'une surface plane équivalente.

Exigence 14 – Hauteur de l'espace expérimental : La hauteur expérimentale entre l'écran thermique de l'étage 1K et la platine échantillon sera d'au moins 300mm. La hauteur des écrans et de l'enceinte devra être compatible avec une mise à niveau vers une unité à dilution.

Exigence 15 – Milieu d'échange : L'espace expérimental sera destiné à être placé sous vide lors de la mise à froid (pas de milieu d'échange).

Exigence 16 – Espace expérimental de la platine 4K : La platine 4K présentera également un diamètre ≥ 300 mm avec une hauteur au-dessus et en-dessous de la platine 4K ≥ 200 mm.

3. Température et puissance frigorifique

Le cryostat devra satisfaire aux spécifications suivantes :

Paramètre	Spécification	Commentaire
<u>Exigence 17 – Température de base (T_{base})</u>	$\leq 1K$ (Cible : $\leq 0.9K$)	Température minimale atteignable en fonctionnement continu
<u>Exigence 18 – Plage de régulation de la température</u>	$[T_{base}, 2K]$ (Cible: $[T_{base}, 4K]$)	Plage minimale sur laquelle la température de la platine échantillon peut être régulée et stabilisée par l'utilisateur
<u>Exigence 19 – Puissance frigorifique disponible à la platine échantillon</u>	$\geq 200mW$ à 2K et $\geq 20mW$ à 1K (Cible : $\geq 200mW$ à 1,5K et $\geq 30mW$ à 1K)	
<u>Exigence 20 - Puissance frigorifique nominale du 2^{ème} étage du tube pulsé</u>	$\geq 1.5W$ à 4.2K	Spécifications propres au refroidisseur à tube pulsé (hors cryostat)
<u>Exigence 21 – Puissance frigorifique disponible à la platine 4K</u>	$\geq 0.5W$ à 4.2K	Le système doit satisfaire à ce critère conjointement avec l'Exigence 19 (Critères remplis simultanément en opération)

<u>Exigence 22 – Durée de mise à froid</u>	$\leq 12\text{h de } 300\text{K à } <1\text{K}$	
<u>Exigence 23 – Durée de retour à température ambiante</u>	$\leq 12\text{h de } <1\text{K à } 300\text{K}$	
<u>Exigence 24 – Stabilité en température</u>	$\leq \pm 5\text{mK pour } T < 2\text{K}$ (Cible : $\leq \pm 2\text{mK}$)	
<u>Exigence 25 – Opération en continue à froid</u>	$\geq 6\text{ mois sans besoin de réchauffement}$ (Cible : $\geq 1\text{ an}$)	Durée de fonctionnement continu avec température stable et $< 1\text{K}$ à la platine échantillon

Ces spécifications devront être atteintes par le cryostat dans sa configuration standard incluant l'ensemble du câblage et des composants nécessaires à son bon fonctionnement, les pièges froids, l'ensemble des écrans thermiques et capteurs de températures, mais excluant les câblages spécifiques additionnels, les porte-échantillons ou toute autre masse thermique requise pour nos besoins expérimentaux particuliers, (voir par exemple en section 5 pour le détail du câblage expérimental demandé).

Exigence 26 – Rapport de test usine et acceptation système : La conformité à ces spécifications devra être démontrée avant acceptation du système et consignée dans un rapport de test usine.

Exigence 27 – Contrôleur de température et régulation : Le système sera fourni avec un contrôleur de température multicanaux permettant la mesure de sondes de température et l'alimentation de résistances chauffantes dans le cryostat. Le système devra permettre de réguler la température de la platine échantillon. Le contrôleur présentera à minima 8 canaux de mesures et 4 canaux de sortie réglable par PID.

Exigence 28 – Mesure des températures : Le système sera à minima équipé d'une sonde de température à chaque étage (50K, 4K et platine échantillon) de type Cernox, diode au silicium ou équivalent. Un thermomètre supplémentaire, destiné à mesurer la température au niveau d'un porte-échantillon, sera intégré sous la platine 1K, monitoré par le contrôleur de température et câblé avec une longueur adaptée pour le positionner librement dans tout le volume expérimental.

Exigence 29 – Calibration des sondes de température : L'ensemble des thermomètres des étages 4K et 1K devront être calibrés, et les données de calibration correspondantes fournies avant livraison.

Exigence 30 – Chauffage à 4K : Le système devra inclure un chauffage à l'étage 4K permettant d'accélérer le temps de retour à température ambiante. Ce matériel devra être pleinement intégré au logiciel de contrôle du système, permettant la réalisation automatisées et sécurisées des séquences de réchauffement.

4. Fluide cryogène et Gaz Handling System

Exigence 31 – Cycle fermé : Le cryostat devra fonctionner en cycle fermé, sans consommation ni recharge de fluides cryogéniques (hélium ou azote).

Exigence 32 – Besoins en fluides cryogéniques : Le système devra être fourni avec la quantité nécessaire de gaz hélium. La quantité fournie devra être indiquée. Les besoins éventuels en azote liquide devront être explicités dans l'offre.

Exigence 33 – Pièges froids : Les pièges de purification de gaz devront également fonctionner sans recharge en cryogène par l'utilisateur, par exemple en configuration boucle fermée afin d'éviter la consommation d'azote liquide pour un piège externe ou en ayant recourt à des pièges internes aux cryostats uniquement. Les pièges froids devront être dimensionnés de sorte à satisfaire à l'Exigence 25.

Exigence 34 – Fourniture complète et autosuffisante : La proposition doit inclure toutes les pompes et compresseurs nécessaires au fonctionnement du système (circulation de l'hélium, compresseur du pulse tube, pompes pour la mise sous vide de l'enceinte, etc.).

Exigence 35 – GHS sans huile : Les composants du GHS devront fonctionner sans huile pour prévenir toute contamination de l'Hélium ou de l'espace expérimental.

Exigence 36 – Compresseur : Le compresseur du circuit hélium ne devra pas être de type « à membranes flexibles », en raison de leur risque de rupture susceptible d'entraîner une perte ou une contamination de l'hélium.

Exigence 37 – Fixation du GHS : Le GHS devra pouvoir être solidement fixée au sol.

Exigence 38 – Position de la pompe turbo-moléculaire : Afin de limiter les vibrations mécaniques, la pompe turbo-moléculaire utilisée pour la circulation de l'hélium devra être intégrée dans l'armoire du GHS plutôt que montée directement sur le cryostat.

Exigence 39 – Système de pompage séparé : Le système de pompage (pompes primaires et secondaires) destiné à l'évacuation et à la mise sous vide du cryostat doit être distinct de celui utilisé pour la circulation de l'hélium.

5. Câblage expérimental

Le cryostat devra présenter suffisamment d'espace et de ports pour accueillir le câblage expérimental souhaité.

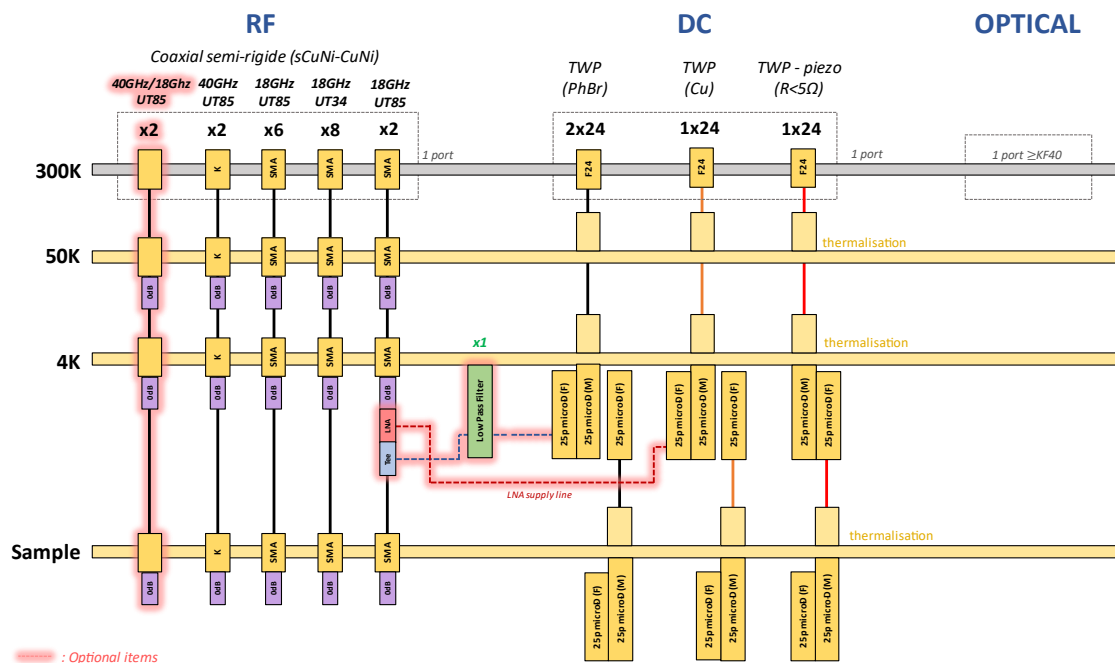


Figure 1 - Résumé du câblage expérimental souhaité

Le câblage expérimental devra inclure les éléments suivants (voir Figure 1 pour un résumé) :

5.1. Câblage électrique

5.1.1. Lignes coaxiales radiofréquences

Exigence 40 – Lignes RF semi-rigides 18GHz UT34 : 8 lignes coaxiales en sCuNi-CuNi (conducteur central plaqué argent) de diamètre 0,86mm (UT34) avec impédance caractéristique de 50Ω seront installées. Les lignes seront acheminées depuis l'enceinte à température ambiante via une traversée étanche équipée de connecteurs SMA (bande passante jusqu'à 18GHz), jusqu'à la platine échantillon, avec ancrage thermique via des connecteurs SMA (bande passante jusqu'à 18GHz) et atténuateurs 0dB compacts à chaque étage (50K, 4K et 1K).

Exigence 41 – Lignes RF semi-rigides 18GHz UT85 : 6 lignes coaxiales en sCuNi-CuNi (conducteur central plaqué argent) de diamètre 2.19mm (UT85) avec impédance caractéristique de 50Ω seront installées. Les lignes seront acheminées depuis l'enceinte à température ambiante via une traversée étanche équipée de connecteurs SMA (bande passante jusqu'à 18GHz), jusqu'à la platine échantillon, avec ancrage thermique via des connecteurs SMA (bande passante jusqu'à 18GHz) et atténuateurs 0dB compacts à chaque étage (50K, 4K et 1K). Deux lignes additionnelles du même type seront également chiffrées en option (voir Option 7).

Exigence 42 – Lignes RF semi-rigides 40GHz UT85 : 2 lignes coaxiales en sCuNi-CuNi (conducteur central plaqué argent) de diamètre 2.19mm (UT85) avec impédance caractéristique de 50Ω seront installées. Les lignes seront acheminées depuis l'enceinte à température ambiante via une traversée étanche équipée de connecteurs K/2.92mm (bande passante jusqu'à 40GHz), jusqu'à la platine échantillon, avec ancrage thermique via des

connecteurs K/2.92mm (bande passante jusqu'à 40GHz) et atténuateurs 0dB (compatibles pour utilisation jusqu'à 40GHz) compacts à chaque étage (50K, 4K et 1K). Deux lignes additionnelles du même type seront également chiffrées en option (voir Option 8).

Exigence 43 – Compacité du câblage RF : Afin d'optimiser l'encombrement spatial, le câblage RF devra être regroupé de manière à minimiser le nombre de ports et de traversées utilisées. Il est attendu que l'ensemble du câblage RF puisse être intégré dans un port KF63.

5.1.2. Amplificateur à faible bruit (LNA) et bias tee

Exigence 44 – Intégration de LNA et de bias-tee : En plus des 16 lignes RF, 2 lignes supplémentaires seront installées pour permettre l'intégration d'amplificateurs à faible bruit et d'un bias-tee (si non intégré au LNA) entre la platine échantillon et la platine 4K. Les lignes seront constituées de câbles coaxiaux semi-rigides en sCuNi-CuNi (conducteur central plaqué argent) de diamètre 2,19mm (UT85), présentant une impédance caractéristique de 50Ω. Afin de garantir une bonne thermalisation des composants, les liaisons RF entre ces derniers et la platine 4K seront réalisées à l'aide de câbles coaxiaux semi-rigides en cuivre de diamètre 2,19 mm (ou équivalent) et d'impédance caractéristique 50 Ω. Les lignes seront acheminées depuis l'enceinte à température ambiante via une traversée étanche équipée de connecteurs SMA, pour une utilisation jusqu'à 18Ghz de bande passante, jusqu'à la platine échantillon, avec ancrage thermique via des connecteurs SMA et atténuateurs 0dB compacts à chaque étage (50K, 4K et 1K). Ces composants (LNAs et bias tee) pourront être proposés en option dans le cadre de l'offre technique (voir Option 9 et Option 10) et installés par le fournisseur. À défaut, leurs dimensions, plans et spécifications seront fournis par le CEA en début de projet, et le cryostat devra être rendu compatible avec leur intégration future. Des éléments mécaniques plaqués or permettant la fixation et le bon ancrage thermique de ces éléments seront prévus et dimensionnés pour l'installation conjointe de jusqu'à 4 ensembles de LNA+bias-tee. Le modèle 3D au format STEP de ces pièces sera également fourni au CEA. Les longueurs des câbles coaxiaux devront également être adaptées pour permettre l'insertion ultérieure des composant électroniques.

5.1.3. Lignes pour courant continu

Exigence 45 – Câblage DC de faible conductivité thermique : 2x24 lignes en PhBr blindées électromagnétiquement seront acheminées depuis l'extérieur de l'enceinte via un passe-paroi étanche à connecteur Fischer 24 broches, jusqu'à la platine échantillon, avec ancrage thermique à chaque étage cryogénique. Les câbles de type paires torsadées, se termineront par un connecteur Micro-D 25 broches mâle à l'étage 1K et présenteront une terminaison intermédiaire supplémentaire avec connecteur Micro-D 25 broches mâle/femelle à l'étage 4K.

Exigence 46 – Intégration d'un filtre passe bas cryogénique : Un filtre passe-bas cryogénique 24 voies devra pouvoir s'intégrer au niveau de l'étage 4K. Ce filtre pourra être proposés en option dans le cadre de l'offre technique (voir Option 11) et installés par le fournisseur. À défaut, ses dimensions, plans et spécifications seront fournis par le CEA en début de projet, et le cryostat devra être rendu compatible avec son intégration future. À ce titre, des éléments mécaniques permettant sa fixation et assurant un ancrage thermique efficace seront prévus et montés dans le cryostat. À défaut, les modèles 3D de telles pièces seront fournis au format STEP.

Exigence 47 – Câblage DC pour l'alimentation de LNAs : 1x24 lignes en Cu blindées électromagnétiquement seront acheminées depuis l'extérieur de l'enceinte via un passe-paroi

étanche à connecteur Fischer 24 broches, jusqu'à la platine échantillon, avec ancrage thermique à chaque étage cryogénique. Les câbles de type paires torsadées, se termineront par un connecteur Micro-D 25 broches mâle à l'étage 1K et présenteront une terminaison intermédiaire supplémentaire avec connecteur Micro-D 25 broches mâle/femelle à l'étage 4K. Le câblage devra idéalement être prolongé depuis cette terminaison intermédiaire de la plateforme 4K jusqu'aux deux LNAs à l'aide d'un connecteur Micro-D supplémentaire. Cette configuration permettra, selon le raccordement choisi, soit l'alimentation des LNAs, soit la connexion à la platine 1K.

Exigence 48 – Câblage DC de faible résistivité électrique : 1x24 lignes en paire torsadées à faible résistivité à 4K et à température ambiante ($R_{total} < 5\Omega$, $< 2\Omega$ si possible) destinées au pilotage de micro-positionneurs piézo-électriques, seront acheminées depuis l'enceinte jusqu'à la platine échantillon via un passe-paroi à connecteur Fischer 24 broches, avec un ancrage thermique efficace à chaque étage cryogénique. Cette ligne se terminera par un connecteur Micro-D 25 broches mâle à l'étage 1K et comportera une terminaison intermédiaire avec connecteur Micro-D 25 broches mâle/femelle à l'étage 4K.

Exigence 49 – Passe paroi et connecteur Fischer : Le passage de l'ensemble des câbles DC depuis l'extérieur du cryostat s'effectuera via un unique port équipé d'un passe-paroi étanche accueillant quatre ensembles de connecteurs Fischer 24 broches.

Exigence 50 – Connecteurs Micro-D 25 broches : Un ensemble de 8 connecteurs Micro-D 25 broches femelles, compatibles avec les terminaisons Micro-D mâles des lignes DC aux étages 1K et 4K, seront fournis pour permettre la poursuite du câblage utilisateur à ces étages. Ces connecteurs nus seront équipés de contacts à souder (type solder cups) en face arrière.

5.2. Compatibilité avec l'installation de fibres optiques

Exigence 51 – Port disponible pour câblage optique : Le cryostat devra être équipé d'un port accessible de diamètre minimal KF40, en ligne de vue directe ou non, qui sera réservé à l'intégration de fibres optiques ou de ruban de fibres via un passe-paroi étanche installé ultérieurement par le CEA.

Exigence 52 – Thermalisation de fibres optiques : Les modèles 3D de pièces mécaniques permettant la thermalisation de fibres optiques aux différents étages du cryostat (platine 50K, platine 4K et étage échantillon) devront être fournis au format STEP en vue de leur adaptation par le CEA pour la thermalisation de fibres et rubans de fibres optiques installées ultérieurement.

6. Évolutivité et intégration de futurs équipements

6.1. Evolution et modularité du câblage

Exigence 53 – Disponibilité de ports supplémentaires : Le cryostat devra présenter des ports libres supplémentaires au niveau de l'enceinte et des différentes platines afin de permettre de futures extensions du câblage. Le fournisseur présentera ainsi dans l'offre technique la liste des ports disponibles depuis l'extérieur du cryostat en indiquant pour chacun : leur taille, le type de bride (ISO KF, CF, etc.), le type de port (en ligne directe « line of sight » ou non) et son usage prévu (fonctionnement du cryostat, câblage client avec précision de l'usage, ou port libre). Il indiquera la manière dont chaque port se poursuit aux étages 50K, 4K et 1K (ligne de vue directe, changement de diamètre, etc...)

6.2. *Compatibilité avec l'installation d'une station de mesure optique cryogénique*

Le cryostat devra être compatible avec l'installation ultérieure d'une station de mesure optique et électrique compacte, reposant sur des micro-positionneurs cryogéniques destinée à la caractérisation de circuits photoniques intégrés de taille centimétrique. Les points suivant devront pour cela être considéré :

6.2.1. *Port optique avec ligne de vue directe sur l'espace expérimental*

Exigence 54 – Ports optiques : Des accès optiques seront prévus sur la surface inférieure de l'enceinte externe sous vide, ainsi que sur l'ensemble des écrans thermiques, pour permettre une vue directe non obstruée d'un diamètre minimum de 12 mm à l'espace expérimental et à la platine 1K pour l'imagerie d'un échantillon. Les ports devront permettre l'installation ultérieure de fenêtres filtrantes par le client. Leurs positions exactes seront définies ultérieurement avec le CEA.

Exigence 55 – Disques obturateurs : Ces accès optiques seront livrés équipés de disques obturateurs assurant l'herméticité du système.

Exigence 56 – Intégration d'un système d'imagerie : Un système d'imagerie, comprenant une caméra, devra pouvoir être monté sur l'enceinte externe, coaxialement aux fenêtres. La surface externe de l'enceinte devra permettre l'installation de ce type d'équipement par la présence de trous taraudés et devra pouvoir soulever une masse d'au moins 2 kg.

6.2.2. *Vibrations au niveau de la platine échantillon*

L'amplitude des vibrations au niveau de la platine échantillon sera également un critère critique dans l'optique de garantir la robustesse dans le temps des couplages optiques aux puces.

Exigence 57 – Amplitudes des vibrations : Le bruit de déplacement RMS au niveau de la platine échantillon sera $< 2\mu\text{m}$ sur la bande de fréquence [1Hz , 10kHz], pour les composantes de déplacement dans le plan (x-y) de la platine ainsi que hors plan (z), et sera $< 50\text{nm}$ sur la bande de fréquence [20Hz , 10kHz]. L'offre technique devra fournir des informations détaillées sur les vibrations typiques attendues au niveau de la platine échantillon, telle que leur valeur RMS, crête à crête ou leur densité spectrale de puissance. À défaut d'informations quantitatives, des garanties devront être apportées quant à la compatibilité du cryostat proposé avec l'utilisation de ce type de station de mesure, en particulier pour le maintien de couplages optiques fibre-puce efficace. Ces garanties pourront prendre la forme de références clients utilisant un système équivalent ou de publications démontrant l'intégration d'une telle station dans le cryostat proposé pour des mesures optiques, AFM ou toute autre technique nécessitant un très faible niveau de vibrations.

6.3. Évolution vers cryostat à dilution

Exigence 58 – Mise à niveau unité de dilution : Le cryostat devra être conçu de manière à permettre une mise à niveau vers une configuration à dilution apte à atteindre le régime du milli-Kelvin. Le fournisseur présentera une estimation du coût de cette mise à niveau ainsi que les détails de la procédure (durée, éléments installés, modalités d'installation sur site, etc.) et précisera les performances qui seront attendue pour le système milli-K (température de base, puissance frigorifique, etc...).

7. Opérabilité et exploitation du cryostat

7.1. Exploitation par un opérateur

Exigence 59 – Manipulation individuelle et charges : L'ouverture (et fermeture) du système devra pouvoir être réalisée par une seule personne, sans manipulation de charges excédant 25 kg. Si nécessaire, les équipements requis pour le retrait ou la mise en place des écrans de rayonnement ou de l'enceinte sous vide devront être fournis.

Exigence 60 – Niveau de bruit sonore : Des informations sur le niveau de bruit sonore de l'équipement en fonctionnement nominal devront être fournies.

7.2. Logiciel et système de contrôle

Exigence 61 – Automatisation des séquences : Les séquences de mise en froid et de réchauffement du système devront être entièrement automatisées et réalisables via un panneau de contrôle local et/ou via un système de commande à distance par logiciel, selon un mode de fonctionnement simple de type « presse-bouton ».

Exigence 62 – Contrôle et supervision à distance : Le système de contrôle du réfrigérateur devra au minimum permettre la supervision à distance de son fonctionnement.

Exigence 63 – Télémétrie : Un système de télémétrie devra permettre l'enregistrement pour un accès ultérieur ainsi que la visualisation en temps réel des données clés du système, telles que les températures, pressions, les états et datas des différents instruments et sondes, le temps de fonctionnement, etc.

Exigence 64 – PC de contrôle : Dans le cadre d'un pilotage par ordinateur, le poste de contrôle sera idéalement un ordinateur fourni par le CEA et conservé sur le site client. Les pilotes et logiciels strictement nécessaires au contrôle du système seront fournis en amont, afin de permettre leur installation sur le poste avant la mise en service. Le fournisseur précisera avant livraison les spécifications requises du système (système d'exploitation compatible, Windows, Unix, etc ; architecture 32 ou 64 bits, mémoire RAM minimale, espace disque, et autre prérequis).

Si cette approche ne peut être retenue, le fournisseur en précisera les raisons dans son offre technique. Dans ce cas, le système sera directement livré avec un ordinateur intégrant l'ensemble des pilotes et logiciels nécessaires à son fonctionnement. Le PC de contrôle devra être fourni avec un système d'exploitation à jour, exempt de tout logiciel tiers non indispensable, et conforme aux exigences de sécurité informatique du CEA. Il devra permettre, a minima, l'installation d'une solution antivirus et le raccordement à un réseau local, sans nécessiter de connexion internet permanente.

Exigence 65 – Documentation logicielle : La documentation logicielle nécessaire à l'exploitation du système devra être fournie.

Exigence 66 – Licence : Dans le cas où une licence propriétaire serait requise, celle-ci sera fournie à vie.

8. Fiabilité, sécurité et conformité

Exigence 67 – Fiabilité et maintenance : Le fournisseur détaillera dans son offre technique la liste exhaustive des éléments nécessitant une maintenance (refroidisseur à tube pulsé, pompes, pièges à froid, etc.).

Pour chacun de ces éléments, il sera précisé :

- La nature des opérations de maintenance à effectuer
- La périodicité ou l'échéance de ces opérations
- Les compétences requises pour leur réalisation (si tâches au soin de l'opérateur)
- La durée estimée des interventions
- Les conditions d'exécution (intervention sur site ou retour en atelier nécessaire)
- Les coûts approximatifs associés (pièces, main-d'œuvre, etc...).

Exigence 68 – Durée en fonctionnement : Le temps de fonctionnement de chacun des composants nécessitant une maintenance devra être enregistré et facilement accessible à l'utilisateur.

Exigence 69 – Certifications et normes européennes : L'ensemble des équipements fournis devra respecter la réglementation en vigueur en France incluant les directives européennes transposées en droit français, en particulier (si applicable) :

- Directive « machine » 2006/42/CE
- Directive « compatibilité électromagnétique CEM » 2014/30/UE
- Directive « Basse Tension » 2014/35/UE
- Directive « ATEX » 94/9/CE 2014/34/UE
- Directive « Pression » 97/23/CE 2014/68/UE

De plus, les fonctions de sécurité seront conçues suivant la norme NF EN ISO 13849-1 « Sécurité des machines - Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité - Partie 1 : principes généraux de conception » et ceci pour chaque type de risque (mécanique /gaz /thermique...). Si la machine est équipée d'un mode « maintenance » ou « service » dans lequel les sécurités sont neutralisées, ces modes seront strictement conçus en application de la directive machine 2006/42/CE « Sélection des modes de commande ou de fonctionnement ».

L'équipement électrique des machines sera conçu suivant la norme NF EN 60204

L'équipement sera certifié CE, fera l'objet d'un « marquage CE » et sera accompagné d'une déclaration CE/UE de conformité.

Exigence 70 – Couleur des conducteurs : A l'intérieur de l'équipement, le conducteur de neutre sera de couleur bleu clair (norme EN 60204) ou identifié clairement si ce n'est pas le cas (bague de couleur, repère). Le conducteur de protection sera de couleur vert et jaune.

Exigence 71 – Sécurité en cas de défaillance : Le système devra être conçu de manière à assurer une mise en sécurité automatique en cas d'anomalie de fonctionnement ou de coupure d'alimentation électrique, du circuit d'eau ou du circuit d'air. Il devra être équipé d'un réservoir

de stockage permettant la récupération complète de l'hélium de manière passive, en cas de réchauffement accidentel ou de coupure d'alimentation prolongée.

Exigence 72 – Protection des équipements : Le fournisseur devra préciser les dispositifs de protection requis pour les équipements fournis (protections électriques, dispositifs de sécurité, exigences en matière de sécurité, etc.).

9. Livraison, réception et support

Exigence 73 – Délai de livraison : Le délai de livraison idéalement souhaité est de 6 mois à compter de la confirmation de commande, avec livraison réalisée au plus tôt au premier 1^{er} janvier 2027.

Exigence 74 – Livraison : La livraison du matériel sera effectuée à l'adresse indiquée par le CEA.

Exigence 75 – Garantie : Les prestations feront l'objet d'une garantie d'une durée minimale de 2 ans à compter de la date d'acceptation sur site. Les modalités minimales de cette garantie seront les suivantes :

- Couverture de l'ensemble des équipements et prestations fournis.
- Prise en charge des défauts de fonctionnement, incluant la fourniture et frais de port des pièces de rechange.
- Assistance technique incluant la prise en charge de la main-d'œuvre ainsi que des frais de déplacement et de séjour associés, nécessaires à la remise en état du système.
- Assistance technique pour les mises à jour mineures et majeures (évolutions logicielles, etc.).

En cas d'indisponibilité de l'équipement pour des raisons couvertes par la garantie, la période de garantie sera prolongée d'une durée équivalente à celle de l'immobilisation de l'équipement.

Exigence 76 – Acceptation sur site : Des tests sur site seront réalisés afin de vérifier la conformité de l'équipement aux spécifications techniques avant son acceptation définitive. Ces tests comprendront a minima un refroidissement complet du système, avec démonstration de la température de base, des puissances frigorifiques ainsi que de la durée de mise à froid, conformément aux performances spécifiées et documentées dans le rapport de test usine.

Exigence 77 – Formation : Une formation en français ou en anglais devra être assurée sur site dans le mois suivant la mise en service du cryostat pour au moins trois personnes. La formation devra couvrir l'utilisation du cryostat et du logiciel de pilotage ainsi que les opérations de maintenance simples, et inclura à minima une démonstration du fonctionnement du système avec un cycle complet de refroidissement et de réchauffement, ainsi qu'une reprise après une coupure de courant simulée.

Exigence 78 – Support technique : Le fournisseur assurera un support client à distance, par téléphone et/ou via Internet, avec un engagement de temps de réaction rapide pendant toute la durée de la garantie, inférieur à 3 jours ouvrés. Les coordonnées du service après-vente seront communiquées au CEA.

Exigence 79 – Documentation fournie : L'ensemble de la documentation nécessaire à l'exploitation du système et à la réalisation de sa maintenance devra être fourni en français ou en anglais au cours du projet. Cette documentation comprendra notamment :

- Le plan d'implantation (voir Exigence 1)
- Une documentation avec les exigences d'installation sur site (voir Exigence 5)

- Une documentation technique complète, incluant un manuel utilisateur avec description détaillée du fonctionnement, des instructions d'exploitation, des procédures de diagnostic et de dépannage, les schémas de câblage du système, les procédures d'exploitation et de sécurité, ainsi que les spécifications techniques
- La documentation technique spécifique des équipements intégrés au système (compresseur, contrôleur de température, etc.)
- La documentation du logiciel de pilotage
- Le plan de maintenance
- Les certificats de conformité ainsi que les certificats de calibration des instruments de mesure (thermomètres, etc)
- Le rapport d'essais usine
- Le rapport d'essais de réception sur site établi après validation des essais au CEA
- La documentation technique relative aux modifications lors de mises à jour apportées au système
- Les plans techniques du cryostat avec les dimensions précises des éléments structurels (platines, écrans thermiques, enceinte à vide, etc.) ainsi que les fichiers 3D correspondants.

Exigence 80 – Pièces détachées et consommables : Dans son offre, le contractant devra inclure :

- Une liste complète des pièces détachées
- Une liste complète des consommables nécessaires au fonctionnement de l'équipement, avec les fonctions, la référence et le prix de chaque composant.

Ces listes pourront servir de base à l'établissement d'un contrat de fourniture de pièces détachées et de consommables. Le fournisseur devra préciser la durée de disponibilité des pièces détachées et les délais de livraison standard.

10. Options facultatives

10.1. *Extension des performances du système*

Option 1 – Isolation aux vibrations du châssis : Si des options sont disponibles au niveau du châssis pour améliorer l'isolation mécanique du cryostat (châssis plus lourd, amortissement actif des vibrations, etc...), et ainsi réduire les vibrations transmises par le bâtiment ou le tube pulsé jusqu'à l'échantillon, le fournisseur aura la possibilité de les présenter en option dans son offre technique et de les chiffrer, accompagnées d'une estimation du gain de performance attendu.

Option 2 – Accélération mise à froid / réchauffement : Si des solutions permettant d'accélérer les temps de refroidissement et/ou de réchauffement du système sont disponibles, elles pourront être proposées et chiffrées comme option dans l'offre technique, en précisant le gain de temps attendu.

Option 3 – Réduction des vibrations : En complément de l'Option 1 relative au châssis, le fournisseur pourra proposer et chiffrer toute solution optionnelle applicable au reste du système permettant de réduire davantage les vibrations au niveau de la platine expérimentale. Les performances attendues avec ces solutions devront être explicitées. Le fournisseur précisera l'ensemble des détails techniques relatifs à ces options.

Option 4 – Mise à niveau unité de dilution : Dans le cas où cette mise à niveau nécessiterait des composants plus performants que ceux proposés en configuration standard pour le système 1K, le besoin devra être clairement explicité dans l'offre technique. Les composants

correspondants (par exemple : tube pulsé plus puissant, pompe de capacité supérieure, etc...) pourront alors être proposés en substitution des éléments standards, au titre d'option. Le fournisseur chiffrera dans ce cas le surcoût associé à cette option et détaillera l'impact technique sur les performances du système 1K.

Option 5 – Insonorisation : Dans le cas où des solutions optionnelles visant à l'insonorisation du cryostat seraient disponibles, celles-ci pourront être présentées et chiffrées en tant qu'option, accompagnées d'une estimation du niveau d'insonorisation pouvant être atteint.

10.2. Extension de garantie

Option 6 – Extension de garantie : Le coût d'une extension de garantie d'une ou plusieurs années supplémentaires sur les mêmes modalités pourra être chiffré dans l'offre au titre d'option.

10.3. Extension du câblage RF

Option 7 – x2 Lignes RF semi-rigides 18GHz UT85 : 2 lignes coaxiales supplémentaires en sCuNi-CuNi (conducteur central plaqué argent) de diamètre 2.19mm (UT85) avec impédance caractéristique de 50Ω seront proposées en option. Les lignes seront acheminées depuis l'enceinte à température ambiante via une traversée étanche équipée de connecteurs SMA (bande passante jusqu'à 18GHz), jusqu'à la platine échantillon, avec ancrage thermique via des connecteurs SMA (bande passante jusqu'à 18GHz) et atténuateurs 0dB compacts à chaque étage (50K, 4K et 1K).

Option 8 – x2 Lignes RF semi-rigides 40GHz UT85 : 2 lignes coaxiales supplémentaires en sCuNi-CuNi (conducteur central plaqué argent) de diamètre 2.19mm (UT85) avec impédance caractéristique de 50Ω seront proposées en option. Les lignes seront acheminées depuis l'enceinte à température ambiante via une traversée étanche équipée de connecteurs K/2.92mm (bande passante jusqu'à 40GHz), jusqu'à la platine échantillon, avec ancrage thermique via des connecteurs K/2.92mm (bande passante jusqu'à 40GHz) et atténuateurs 0dB (compatibles pour utilisation jusqu'à 40GHz) compacts à chaque étage (50K, 4K et 1K).

10.4. Fourniture d'équipements

Option 9 – LNA cryogénique : Deux des lignes RF 18GHz seront équipées d'un amplificateur faible bruit (compatible avec une utilisation à 4K) opérant dans la gamme 10MHz - 4GHz, présentant une température de bruit inférieure à 4K sur l'ensemble de cette plage, un gain ≥ 30 dB et une dissipation < 50 mW. Le fournisseur pourra proposer et chiffrer de manières optionnelles deux LNA répondant à ces critères, en fournissant les spécifications détaillées des composants. Les LNAs pourront être fournis avec un bias tee intégré à l'entrée de l'étage d'amplification (à défaut, se référer à l'Option 10 pour la fourniture supplémentaire de bias tee).

Option 10 – Bias tee cryogénique : Un bias tee compatible avec la gamme 10MHz - 4GHz et avec une utilisation à 4K sera également intégré sous chaque LNA afin de permettre l'injection d'une tension continue dans la ligne coaxiale à destination de l'échantillon. Le fournisseur pourra proposer et chiffrer deux bias tee cryo-compatible sous forme d'option, en fournissant les spécifications détaillées des composants. Le bias tee cryogénique devra présenter des

pertes d'insertion inférieures à 2 dB, des pertes de retour supérieures à 15 dB et une isolation supérieure à 30 dB à basse température.

Option 11 – Filtre passe bas cryogénique : Le fournisseur pourra proposer et chiffrer en option un filtre cryogénique 24 voies adapté au filtrage et à la thermalisation de câbles DC à 4K, avec des lignes filtrées par paires. Les spécifications détaillées du filtre proposé devront être fournies. Le filtre sera équipé de connecteurs Micro-D 25 pins en entrée et sortie et comportera au minimum deux étages de filtrage RC, une fréquence de coupure ≤ 50 kHz et un courant maximal d'au moins 5 mA. Ils seront logés dans un boîtier robuste en cuivre sans oxygène plaqué or.

Option 12 – Breakout box et câble Fischer : Le fournisseur pourra également proposer en option une « breakout box » externe au cryostat permettant de séparer (et éventuellement de filtrer) les lignes issues d'un des connecteurs Fischer multibroches vers un ensemble de 24 connecteurs BNC. Il pourra aussi proposer un câble Fischer blindé permettant de raccorder 24 des lignes du passe-paroi à la breakout box.