

CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES

MARCHE DE FOURNITURES COURANTES ET DE SERVICES

Liquéfacteur d'hydrogène mobile avec pompe à vide

Table des matières

- 1. Contexte3
- 2. Spécifications techniques3
 - 2-1 Système de liquéfaction :3
 - 2-2 Pompe à vide :4
- 3. Livrables5

1. Contexte

Afin de structurer ses projets dans le domaine de l'enseignement et de la recherche et d'aboutir à une vision globale H2 à l'ISAE-SUPAERO, le Département Aérodynamique Energétique et Propulsion (DAEP) souhaite acquérir un liquéfacteur d'hydrogène projetable et opérable sur un site d'essai.

2. Spécifications techniques

2-1 Système de liquéfaction :

- **Taux de liquéfaction :**
 - minimum 20 L/jour, max 50 L/jour (*avec pré-refroidissement à l'azote liquide - LN2*)
 - minimum 10 L/jour, max 50 L/jour (*sans pré-refroidissement à l'azote liquide - LN2*)
- **Capacité du Dewar (stockage) :** minimum 100 L
- **Consommation électrique typique et plage de tension :**
 - Compatible avec 50 Hz : 380/415 V AC / 3 phases
- **Besoins en hydrogène gazeux :** H₂ (pureté min 99,995% - pureté 4.5)
- **Dimensions du système (L x l x h) :** maximum Conteneur standard 20 pieds (6.06 m x 2.44 m x 2.59 m)
- Le liquéfacteur doit être certifié aux **normes CE**.
- **Transport :** Le système complet de liquéfaction de l'hydrogène doit être transportable et mobile. Cette exigence implique la possibilité de charger l'ensemble du système sur un camion afin de le déplacer jusqu'au site d'essai. L'ensemble des équipements devrait idéalement être intégré dans un conteneur. Cette condition implique que l'assemblage de l'équipement doit tenir dans le conteneur et que seule l'alimentation électrique et les bouteilles de gaz hydrogène (pressurisées à un maximum de 200 bars) sont nécessaires au fonctionnement de l'équipement. Tous les sous-systèmes, concernant le refroidissement, l'alimentation en air et la gestion de l'énergie, doivent être inclus et intégrés dans le système.
- **Stockage d'LH2 :**
 - Le système doit fournir un stockage d'au moins 100 litres d'hydrogène liquide, incluant le sous-système qui intègre le refroidissement actif du gaz d'évaporation. Cette exigence implique que le gaz d'évaporation ne soit pas perdu, mais plutôt re-liquéfié.
 - Une étude sur le système de soupape de sécurité pour le réservoir de stockage à évaporation rapide/brutale (perte de vide) est requise et sera demandée dans le cadre de l'offre.
- **Sécurité :** Le système de liquéfaction devra intégrer un dispositif de sécurité permettant la coupure de l'ensemble des sources électriques en cas de détection de fuite d'hydrogène. Cette condition implique l'existence obligatoire d'un système de détection de gaz hydrogène devant être intégré à l'ensemble du liquéfacteur. Des capteurs de détection d'hydrogène doivent être placés à tous les emplacements potentiels où une accumulation due à des fuites d'hydrogène pourrait survenir. À partir d'un seuil détectable de 1000 PPM de H₂, le système complet doit s'arrêter automatiquement et ne doit fournir aucune énergie susceptible d'enflammer l'hydrogène en fuite.
- **Mobilité :** Cet aspect concerne les exigences opérationnelles sur tout site d'essai. Un soutien minimal en éléments extérieurs est nécessaire pour le fonctionnement du système de liquéfaction. Celui-ci ne devra nécessiter que l'alimentation en hydrogène gazeux sous forme de bouteilles (remplies à 200 bars et contenant 750 g/bouteille d'H₂) ainsi qu'une

alimentation électrique. Tous les autres sous-systèmes nécessaires à la liquéfaction devront être intégrés au sein du système et du conteneur transportable.

➤ **Connexions et composants externes** : Parallèlement au système de liquéfaction, le fournisseur doit fournir tous les tuyaux isolés et connexions nécessaires pour remplir les petits réservoirs embarquables utilisés pour les drones ou les stations de ravitaillement. Les détails des connexions seront repris lors de la phase de négociation., le fournisseur devra fournir :

- toutes les connexions et composants externes nécessaires pour le transport de l'hydrogène vers la connexion **Johnston-Cox et Linde couplage femelle de 3 pouces** de la station de ravitaillement en hydrogène liquide.
- les raccordements, les tuyauteries et la régulation de pression pour l'alimentation en hydrogène gazeux à 200 bars maximum devront également être fournis avec l'appareil.

2-2 Pompe à vide :

L'objectif est de pouvoir mettre sous vide pour la maintenance et l'exploitation l'ensemble des réservoirs de stockage cryogéniques que possède l'ISAE-SUPAERO, incluant les petits réservoirs de 5 à 20 L, les grandes stations de remplissage de 50 à 250 L ainsi que les cuves de stockage de liquéfacteurs de 80 à 200 L.

2-2-1- Le système de pompage doit permettre :

- la création d'un vide primaire puis secondaire jusqu'à la plage du vide poussé,
- une vitesse de pompage suffisante pour l'évacuation de volumes de l'ordre de 10–100L,
- une compatibilité avec les environnements cryogéniques (températures basses, risques de condensation, ambiance N₂/LH₂).

Le système doit être fourni en configuration compacte, intégrant :

- un groupe turbomoléculaire,
- une pompe primaire sèche ou lubrifiée,
- un module de contrôle/commande intégré

2-2-2- Interfaces :

Afin d'assurer la compatibilité de la pompe à vide avec l'ensemble des réservoirs cryogéniques et des lignes sous vide du système, **les interfaces suivantes** doivent impérativement être fournies avec l'équipement :

➤ **Interface obligatoire avec brides ISO-K**

Le système doit obligatoirement pouvoir se raccorder à :

- DN63 ISO-K (interface principale de pompage sur réservoirs cryogéniques).

Les éléments suivants doivent être fournis ou compatibles :

- bride d'adaptation ISO-K DN63,
- collier de serrage / claws-clamps appropriés,
- joint O-ring ISO-K.

L'architecture globale doit permettre un montage/démontage rapide pour les opérations de maintenance

➤ **Compatibilité ISO-KF (QF)**

Le système doit également permettre un raccordement direct ou via adaptateur aux brides :

- KF16,
- KF25,
- KF40.

Ces interfaces sont nécessaires pour les opérations de pompage :

- sur lignes instrumentées,

- sur petits volumes isolés sous vide,
- lors des essais ou opérations de maintenance.

L'équipement doit inclure :

- adaptateurs KF ↔ DN63,
- centering rings,
- colliers KF.

➤ **Compatibilité ConFlat (CF) pour atmosphères hydrogène**

Le système doit être compatible, au minimum via adaptateur, avec :

- CF40,
- CF63.

Ces interfaces peuvent être requises pour :

- les lignes de haute pureté hydrogène,
- les enveloppes nécessitant une étanchéité métallique,
- les opérations à vide poussé (10^{-7} mbar et au-delà).

Les adaptateurs doivent inclure :

- joints cuivre adaptés,
- visseries et étriers nécessaires.

2-2-3 Exigences de performance du vide

Le matériel doit atteindre :

- pression finale $\leq 1 \times 10^{-5}$ mbar en fonctionnement standard,
- pression $\leq 1 \times 10^{-6}$ mbar avec la pompe primaire assistée,
- vitesse de pompage suffisante pour atteindre ces niveaux dans un délai raisonnable pour des volumes cryogéniques (< 10 minutes pour 50–80 L est typique, sans exigence stricte).

Aucune architecture spécifique n'est imposée (turbomoléculaire, hybride, etc.), mais la performance doit être vérifiable via documentation.

2-2-4 Exigences électriques et de commande

- Interface de commande locale obligatoire (écran / panneau intégré).
- Possibilité d'arrêt d'urgence.
- Fonctionnement sur alimentation monophasée 230 V ou équivalent disponible sur site.
- Démarrage et coordination automatique entre la pompe primaire et la pompe secondaire.

2-2-5 Ensemble d'accessoires requis

Le fournisseur doit fournir ou garantir la disponibilité des éléments suivants :

- adaptateurs pour toutes les brides KF, ISO-K et CF décrites ci-dessus,
- joints O-rings et joints cuivre en quantité suffisante,
- colliers de serrage KF et ISO-K,
- câbles d'alimentation et de commande,
- manuel technique complet.

3. Livrables

Liquéfacteur et pompe à vide qui répondent aux exigences techniques décrites dans le présent document.

Livraison et déchargement des matériels à l'ISAE-SUPAERO.

Le stockage, l'emballage et le transport des fournitures sont de la responsabilité du titulaire, y compris les formalités douanières en cas d'expédition depuis un pays hors Union Européenne

La qualité des emballages doit être appropriée aux conditions et modalités de transport et est de la responsabilité du titulaire. Les emballages restent la propriété du titulaire. Le transport s'effectue sous sa responsabilité jusqu'au lieu de l'installation. Le conditionnement, le chargement, l'arrimage et le déchargement sont effectués sous sa responsabilité.

Mise en route : L'installation, l'assemblage complet ainsi que la démonstration initiale de liquéfaction devront être réalisés lors de la livraison de l'équipement.

Documentation : Le dispositif doit être livré avec les manuels correspondants, concernant le fonctionnement, l'entretien et les services de remplissage, y compris les schémas des systèmes électriques, pneumatiques ou hydrauliques du dispositif.

Formation : Une formation du personnel de l'ISAE-SUPAERO (max 10 personnes) est requise. Celle-ci devra permettre d'atteindre un niveau d'autonomie opérationnelle sur l'ensemble du système de liquéfaction, incluant tous les aspects liés à la sécurité et à la maintenance.