



Fourniture, installation et mise en service d'une plateforme automatisée de mesure des propriétés physiques des matériaux sous champ magnétique et à basse température pour l'École Polytechnique.

Cahier des clauses techniques particulières (CCTP)

Consultation n°

MX26-038

Personne à contacter :

<i>Gaël GRISSONNANCHE</i> École Polytechnique Laboratoire des Solides Irradiés Route de Saclay 91128 Palaiseau, France Email : gael.grissonnanche@polytechnique.edu	<i>Adrien GOURGOUT</i> École Polytechnique Laboratoire des Solides Irradiés Route de Saclay 91128 Palaiseau, France email : adrien.gourgout@polytechnique.edu
--	---

Table des matières

1. Objet de la demande	3
2. Spécifications techniques.....	3
2.1. Performances cryogéniques.....	3
2.2. Performances magnétiques.....	4
2.3. Caractéristiques diverses.....	5
3. Automatisation et gestion cryogénique/magnétique.....	6
4. Prestations Supplémentaires Éventuelles (PSE) Facultatives.....	8
4.1. Rotateur horizontal motorisé	8
4.2. Magnétomètre à échantillon vibrant (VSM).....	8
4.3. Module de résistivité AC.....	8
5. Tests, installation, formation & documentation	9
5.1. Tests	9
5.2. Installation	9
5.3. Formation.....	9
5.4. Documentation	9
6. Livraison & réception	10
6.1. Délai et adresse de livraison	10
6.2. Réception.....	10
7. Service après-vente	10
7.1. Qualité du système et durabilité	10
7.2. Garantie.....	10
7.3. Maintenance et réparation.....	11

1. Objet de la demande

Le présent marché a pour objet la fourniture, la livraison, l'installation, la mise en service et la formation associée à une plateforme automatisée de mesure des propriétés physiques des matériaux sous champ magnétique et à basse température.

L'équipement sera destiné à l'étude des propriétés de transport électrique de matériaux quantiques (monocristaux, couches minces, dispositifs microfabriqués) dans des conditions contrôlées de température et de champ magnétique, sans consommation de fluides cryogéniques liquides, tout en offrant un haut niveau d'automatisation des opérations cryogéniques et expérimentales.

Une attention particulière sera portée à la simplicité d'utilisation, à la rapidité des cycles thermiques, à la stabilité des conditions expérimentales ainsi qu'à la possibilité de réaliser des séquences de mesures entièrement automatisées sans intervention de l'utilisateur.

L'équipement devra constituer une plateforme mutualisée accessible à des utilisateurs de niveaux d'expertise variés, depuis les étudiants niveau licence jusqu'aux chercheurs confirmés. À ce titre, l'ensemble des fonctions de contrôle de la température, du champ magnétique, du vide, ainsi que des mesures électriques devront être intégrées dans un environnement logiciel unique permettant la programmation, l'exécution et le suivi à distance des expériences.

Le système devra également être évolutif afin de permettre l'ajout futur de modules de caractérisation complémentaires sans modification majeure de l'infrastructure cryogénique principale.

Le présent marché comprend la fourniture de l'équipement complet, de l'ensemble des accessoires nécessaires à son fonctionnement, des logiciels de contrôle et d'acquisition, de la documentation technique, de la formation des utilisateurs ainsi que de la garantie associée.

2. Spécifications techniques

2.1. Performances cryogéniques

- Système cryogénique en circuit fermé (« cryogen-free ») ne nécessitant aucune consommation ni manipulation de fluides cryogéniques liquides pour son fonctionnement normal.
- Refroidissement assuré par cryoréfrigérateur intégré permettant le maintien simultané du système cryogénique et de l'aimant supraconducteur.
- Plage de température accessible au niveau de l'échantillon :
 - Température minimale : inférieure ou égale à 2 K ;
 - Température maximale : supérieure ou égale à 400 K.
- Stabilité en température :
 - meilleure que $\pm 0,1$ % pour $T < 20$ K ;
 - meilleure que $\pm 0,02$ % pour $T > 20$ K.

- La régulation de température devra être entièrement automatisée sur toute la gamme de température accessible, sans intervention manuelle sur des vannes cryogéniques ou sur des circuits de gaz.
- Le système devra permettre le passage continu entre les différents régimes thermiques, notamment lors du franchissement de la température de l'hélium liquide (4,2 K), sans modification de configuration ni intervention de l'utilisateur.
- Le système devra être capable de refroidir un porte-échantillon standard de la température ambiante jusqu'à une température stabilisée inférieure ou égale à 2 K en moins de 45 minutes.
- Les cycles de refroidissement et de réchauffement devront être entièrement automatisés et programmables par l'utilisateur.
- Le système devra intégrer plusieurs capteurs de température répartis dans la zone cryogénique afin d'assurer le contrôle des gradients thermiques et d'optimiser la stabilité de régulation.
- Une chambre échantillon sous vide devra être intégrée au système. Le vide de la chambre devra pouvoir être généré et contrôlé automatiquement sans recours à des équipements externes permanents du type pompe turbo pouvant générer un vide d'au moins 10^{-5} mbar.
- Le système devra permettre l'utilisation de l'échantillon aussi bien sous vide que sous gaz d'échange statique.
- Le système devra permettre l'insertion et le retrait rapides des porte-échantillons sans nécessiter le réchauffement complet de l'installation.
- Une attention particulière sera portée aux solutions minimisant les temps d'immobilisation entre deux expériences et favorisant un échange rapide des échantillons.
- Le fournisseur précisera :
 - le temps de refroidissement complet du système depuis la température ambiante ;
 - le temps nécessaire pour atteindre les conditions nominales de fonctionnement après une intervention utilisateur ;
 - les opérations de maintenance préventive requises ainsi que leur périodicité.

2.2. Performances magnétiques

Le système devra être équipé d'un aimant supraconducteur intégré dont l'axe principal sera vertical et parallèle à l'axe du cryostat.

Les spécifications minimales requises sont les suivantes :

- Champ magnétique continu accessible : au minimum ± 12 T.
- Le champ magnétique devra pouvoir être balayé de manière continue sur l'ensemble de la plage de fonctionnement, y compris lors du passage par le champ nul.
- Modes de contrôle du champ :
 - balayage linéaire ;
 - balayage oscillant ;
 - mode garantissant l'absence de dépassement de consigne (« no overshoot ») ou équivalent.
- Homogénéité du champ magnétique :
 - meilleure que $\pm 0,1$ % sur une longueur minimale de 55 mm centrée sur la position de l'échantillon.
- Résolution du champ :

- meilleure que 1 G sur toute la gamme de fonctionnement.
- Le temps nécessaire pour atteindre le champ maximal à partir de 0 T devra être inférieur à 25 minutes.
- Le système devra permettre différents modes de balayage du champ magnétique, incluant notamment :
 - rampes linéaires ;
 - rampes avec contrôle du dépassement de consigne ;
 - séquences programmables définies par l'utilisateur.
- Le système devra être équipé d'une alimentation bipolaire permettant le fonctionnement symétrique entre les polarités positive et négative.
- Le contrôle du champ magnétique devra être entièrement intégré à l'environnement logiciel principal du système.
- Le système devra permettre l'exécution simultanée de rampes de champ magnétique et de mesures électriques automatisées.
- La surveillance de l'aimant devra être entièrement automatisée et inclure le contrôle des paramètres critiques nécessaires à la sécurité de fonctionnement.
- Des mécanismes de protection automatiques devront être prévus en cas de défaut du système cryogénique ou de fonctionnement anormal de l'aimant supraconducteur.
- Le fournisseur précisera :
 - l'homogénéité du champ magnétique ;
 - la stabilité temporelle du champ ;
 - les vitesses maximales et minimales de balayage ;
 - les caractéristiques du système de protection en cas de quench ;
 - les valeurs du champ résiduel et du champ de fuite autour de l'installation.

2.3. Caractéristiques diverses

Architecture de mesure

- Le système devra être conçu autour d'un porte-échantillon amovible permettant l'installation et le retrait rapides des échantillons.
- Le porte-échantillon devra être connecté à l'instrument via un connecteur multipoints assurant une connexion électrique et mécanique reproductible.
- Le porte-échantillon devra permettre le raccordement d'au moins 12 connexions électriques indépendantes.
- L'offre devra comprendre au minimum six porte-échantillons réutilisables.
- L'architecture proposée devra minimiser les opérations manuelles nécessaires à l'installation d'un échantillon et au lancement d'une expérience.

Chambre échantillon

- La chambre échantillon devra être compatible avec un fonctionnement sous vide ou sous gaz d'échange statique.
- Le système devra intégrer les équipements nécessaires à la mise sous vide de la chambre échantillon.
- Le temps nécessaire à l'évacuation de la chambre devra être précisé par le constructeur.
- Le diamètre utile de l'espace échantillon devra être précisé.

Mesures électriques intégrées

- Le système devra être équipé d'un module intégré de mesure de résistivité en courant continu DC.
- Les mesures devront être réalisables dans une configuration quatre contacts.

- La gamme de résistances mesurables devra être comprise au minimum entre 10 $\mu\Omega$ et 5 M Ω .
- Les courants injectés devront pouvoir être réglés sur une gamme s'étendant au minimum de 10 nA à 8 mA.
- Le système devra permettre l'inversion automatique de la polarité du courant afin de réduire les tensions d'offset.
- Le système devra permettre la réalisation automatisée de mesures de résistivité en fonction de la température et du champ magnétique.

Évolutivité

- Le système devra permettre l'ajout ultérieur de modules complémentaires sans modification majeure du cryostat principal.
- Le fournisseur précisera les options disponibles permettant notamment :
 - les mesures de transport thermique ;
 - les mesures de chaleur spécifique ;
 - les mesures de susceptibilité magnétique ;
 - les mesures de moment magnétique ;
 - les mesures sous hélium-3 ;
 - les mesures sous dilution ;
 - les mesures avec rotation angulaire ;
 - les mesures optiques ;
 - l'intégration de dispositifs développés par l'utilisateur.

3. Automatisation et gestion cryogénique/magnétique

Automatisation et gestion cryogénique / magnétique

Le système devra être conçu pour permettre une exploitation simple, fiable et largement automatisée par des utilisateurs de niveaux d'expertise variés.

Automatisation cryogénique

- L'ensemble des opérations cryogéniques devra être piloté automatiquement par le système.
- Le système devra permettre le refroidissement, la stabilisation en température et le réchauffement sans intervention manuelle sur des vannes cryogéniques ou sur un circuit de fluide cryogénique.
- Les transitions entre les différents régimes de fonctionnement cryogénique devront être entièrement automatisées.
- Le passage sous la température de l'hélium liquide (4,2 K) devra être réalisé automatiquement sans intervention de l'utilisateur.
- Le système devra permettre l'exécution de cycles thermiques complets automatisés entre la température minimale et la température maximale accessibles.
- Les paramètres critiques du système cryogénique devront être surveillés en permanence et enregistrés automatiquement.
- Le système devra intégrer des procédures automatisées de diagnostic permettant de faciliter l'identification des dysfonctionnements éventuels.
- Une attention particulière sera portée aux solutions minimisant les opérations de maintenance courante et les temps d'immobilisation de l'installation.

Gestion du vide et de l'environnement échantillon

- La gestion du vide de la chambre échantillon devra être intégrée au système.
- La mise sous vide, la surveillance du niveau de vide ainsi que le changement d'environnement de la chambre échantillon devront pouvoir être réalisés de manière automatisée.

- Les opérations liées à la préparation de la chambre échantillon devront être compatibles avec l'exécution de séquences expérimentales programmées.

Automatisation du champ magnétique

- Le contrôle du champ magnétique devra être entièrement intégré au système de pilotage.
- Le système devra permettre l'exécution automatique de rampes de champ magnétique, de séquences programmées et de profils définis par l'utilisateur.
- Les opérations de montée, descente et inversion de champ devront pouvoir être réalisées automatiquement.
- Le système devra assurer une surveillance continue des paramètres critiques de l'aimant supraconducteur.
- Des procédures de protection automatiques devront être prévues en cas de fonctionnement anormal du système cryogénique ou magnétique.

Logiciel de pilotage

- L'ensemble des fonctions cryogéniques, magnétiques et de mesure devra être piloté depuis un environnement logiciel unique fourni par le constructeur.
- Le logiciel devra permettre la programmation de séquences expérimentales automatisées comprenant notamment :
 - des consignes de température ;
 - des rampes de température ;
 - des consignes de champ magnétique ;
 - des rampes de champ magnétique ;
 - des périodes de stabilisation ;
 - des acquisitions de données synchronisées.
- Le système devra permettre l'exécution de mesures sans surveillance pendant plusieurs jours.
- Le logiciel devra permettre l'enregistrement automatique des paramètres expérimentaux et des données acquises dans des formats ouverts et documentés.
- Le fournisseur précisera les possibilités de création de séquences utilisateur ainsi que les outils de diagnostic et de maintenance intégrés.

3.5. Contrôle à distance et communication

- Le système devra être accessible via le réseau informatique de l'établissement.
- Le contrôle et la surveillance à distance du système devront être possibles sans logiciel tiers spécifique.
- Une interface de communication documentée devra être fournie afin de permettre le développement d'applications utilisateurs.
- Les fonctions principales du système (lecture des températures, du champ magnétique, de l'état du vide, envoi de consignes et lancement de séquences) devront être accessibles par programmation.
- Une compatibilité avec les environnements de développement utilisés couramment dans la recherche scientifique, notamment Python, sera appréciée.

3.6. Validation des performances d'automatisation

Le fournisseur décrira précisément les opérations pouvant être réalisées sans intervention de l'utilisateur et fournira les temps caractéristiques associés aux principales opérations automatisées :

- refroidissement d'un porte-échantillon de la température ambiante à la température minimale ;
- réchauffement jusqu'à la température ambiante ;
- mise sous vide de la chambre échantillon ;
- montée au champ maximal ;
- exécution d'un cycle expérimental complet comprenant température, champ magnétique et acquisition de données.

4. Prestations Supplémentaires Éventuelles (PSE) Facultatives

4.1. Rotateur horizontal motorisé

Le fournisseur proposera en option un système de rotation angulaire automatisée de l'échantillon compatible avec l'ensemble de la plage de température et de champ magnétique du système principal.

Caractéristiques minimales requises :

- rotation continue sur une plage minimale de -10° à $+370^{\circ}$;
- résolution angulaire meilleure que $0,02^{\circ}$;
- mesure et contrôle automatisés de la position angulaire ;
- compatibilité avec les mesures de transport électrique ;
- possibilité de réaliser des séquences automatisées combinant angle, température et champ magnétique ;
- capteur de température intégré au voisinage immédiat de l'échantillon.

Le fournisseur précisera la résolution réelle, le jeu mécanique (« backlash ») et les vitesses de rotation disponibles.

4.2. Magnétomètre à échantillon vibrant (VSM)

Le fournisseur proposera en option un magnétomètre à échantillon vibrant entièrement intégré au système principal.

Caractéristiques minimales requises :

- mesure du moment magnétique en fonction de la température et du champ magnétique ;
- compatibilité avec l'ensemble de la plage de température et de champ du système principal ;
- sensibilité meilleure que 10^{-6} emu ;
- temps d'acquisition compatible avec des mesures rapides en fonction du champ ou de la température ;
- porte-échantillons adaptés aux monocristaux, couches minces, poudres et matériaux massifs ;
- possibilité de réaliser des séquences automatisées de mesure.

Le fournisseur précisera la sensibilité, le bruit de fond, la précision absolue ainsi que les différents porte-échantillons disponibles.

4.3. Module de résistivité AC

Le fournisseur proposera en option un module de mesure de résistivité en courant alternatif intégré au système principal.

Caractéristiques minimales requises :

- mesure quatre points ;
- gamme de résistances comprise au minimum entre $10\ \mu\Omega$ et $10\ M\Omega$;
- possibilité de mesures à haute impédance ;
- fréquence d'excitation réglable ;
- possibilité de mesures de résistivité, courbes courant-tension (I-V) et résistances différentielles ;

- compatibilité avec des séquences automatisées en fonction de la température et du champ magnétique ;
- possibilité de mesurer simultanément plusieurs voies.

Le fournisseur précisera la gamme de fréquences accessible, les sensibilités, les courants disponibles ainsi que les performances de mesure aux faibles signaux.

5. Tests, installation, formation & documentation

Les tests, l'installation, la formation et la documentation doivent tous être inclus dans le prix total des équipements.

5.1. Tests

Les systèmes doivent être entièrement testés en usine. Les données de tests satisfaisants le cahier des charges du présent appel d'offres doivent être fournies avant livraison de l'équipement.

5.2. Installation

Le titulaire du présent marché doit réaliser l'installation complète des systèmes dans le laboratoire situé au sein de l'École polytechnique. Les spécifications promises par le constructeur devront être démontrées sur place.

5.3. Formation

Le titulaire du présent marché doit former les chercheurs à l'utilisation du système entier. Une formation courte (d'environ une journée) pour deux personnes doit être fournie au moment de l'installation pour chaque système. Il doit être fait démonstration d'au moins un refroidissement de chaque système au complet, d'un porte échantillon, d'un réchauffement dont la durée doit être équivalent ou mieux aux caractéristiques spécifiées plus haut, une rampe au champ maximum pour les deux polarités à la vitesse maximum, un contrôle à distance, et une reprise suite à une coupure de courant simulée de 5 minutes.

5.4. Documentation

Le fournisseur devra fournir l'ensemble de la documentation nécessaire à l'installation, à l'exploitation, à la maintenance et à l'utilisation scientifique de l'équipement.

Cette documentation comprendra au minimum :

- les manuels utilisateurs complets du système principal et des accessoires fournis ;
- les manuels d'installation et de maintenance ;
- les schémas fonctionnels du système ;
- les procédures de mise en service, de démarrage et d'arrêt ;
- les procédures de maintenance préventive recommandées ;
- les consignes de sécurité applicables à l'exploitation du système.

L'ensemble de la documentation devra être fourni sous format électronique. Une version papier des documents principaux sera appréciée.

Le fournisseur devra également fournir :

- la description détaillée des performances garanties du système ;
- les certificats de conformité applicables ;
- les procédures de diagnostic et de dépannage ;
- les procédures de remplacement des pièces d'usure éventuelles ;

- les informations relatives aux mises à jour logicielles.

Concernant le pilotage informatique du système, le fournisseur devra fournir :

- la documentation complète de l'environnement logiciel de contrôle ;
- la description des interfaces de communication disponibles ;
- la documentation des commandes permettant le pilotage automatisé du système ;
- les exemples de programmation éventuellement disponibles ;
- la documentation nécessaire à l'intégration du système dans des environnements logiciels développés par l'utilisateur.

Toute évolution de la documentation ou du logiciel intervenue pendant la période de garantie devra être mise à disposition gratuitement.

6. Livraison & réception

L'expédition, les taxes, les droits et l'installation doivent être inclus dans le prix.

6.1. Délai et adresse de livraison

Le système devra être livré, installé et mis en service dans un délai prévisionnel de **10 mois** à compter de la date de notification du marché, à l'adresse suivante :

**École polytechnique
Aile 5, rez-de-chaussée
91128 Palaiseau
France**

6.2. Réception

La réception sera considérée comme effective après l'installation complète des systèmes dans le laboratoire et une fois que les points suivants auront été vérifiés par l'École Polytechnique :

- toutes les spécifications techniques sont respectées,
- tous les documents requis sont fournis,
- la formation des utilisateurs désignés a été finalisée.

7. Service après-vente

7.1. Qualité du système et durabilité

Les systèmes fournis doivent être entièrement neufs. Le titulaire du présent marché sera tenu comme seul responsable de toute malfaçon ou défaut, y compris lorsque les composants impliqués ne proviennent pas du même fabricant.

Le design doit minimiser les coûts et les périodes d'indisponibilité liés aux maintenances préventives.

7.2. Garantie

Le système proposé devra être couvert par une garantie constructeur minimale de vingt-quatre (24) mois à compter de la date de réception définitive de l'équipement.

La garantie devra couvrir l'ensemble des éléments matériels et logiciels fournis dans le cadre du présent marché, y compris :

- le système cryogénique ;
- l'aimant supraconducteur ;

- les alimentations et électroniques associées ;
- les modules de mesure fournis ;
- les logiciels de pilotage et d'acquisition ;
- les accessoires et équipements livrés avec l'installation.

Pendant la période de garantie, le fournisseur s'engage à assurer sans frais supplémentaires :

- la correction des défauts de fonctionnement ;
- la réparation ou le remplacement des composants défectueux ;
- les interventions sur site lorsque celles-ci sont nécessaires ;
- les mises à jour correctives des logiciels ;
- l'assistance technique à distance.

Le titulaire précisera dans son offre :

- les modalités de prise en charge des demandes d'assistance ;
- les délais d'intervention garantis ;
- les délais moyens de remise en service ;
- l'organisation du support technique en France et en Europe ;
- les modalités de fourniture des pièces détachées.

Le fournisseur indiquera également la durée pendant laquelle il garantit la disponibilité des pièces détachées et du support technique après la fin de commercialisation de l'équipement. Une disponibilité minimale de dix (10) ans sera appréciée.

Toute période d'immobilisation supérieure à quinze (15) jours calendaires consécutifs, imputable à une défaillance couverte par la garantie, entraînera une prolongation de la garantie d'une durée au moins équivalente à celle de l'immobilisation.

Le fournisseur précisera les différentes offres de maintenance préventive et corrective disponibles à l'issue de la période de garantie.

7.3. Maintenance et réparation

Le fournisseur décrira précisément les opérations de maintenance préventive et corrective nécessaires au maintien des performances nominales de l'équipement.

L'offre devra préciser :

- la fréquence recommandée des opérations de maintenance préventive ;
- la durée estimée de ces opérations ;
- les interventions pouvant être réalisées par les utilisateurs ;
- les interventions nécessitant l'intervention du fournisseur ou d'un représentant agréé ;
- les consommables et pièces d'usure éventuels.

Le fournisseur indiquera les moyens mis en œuvre pour assurer le diagnostic et le suivi de l'équipement, notamment :

- assistance téléphonique ;
- assistance par courrier électronique ;
- diagnostic à distance via connexion sécurisée ;
- mises à jour logicielles ;
- outils de surveillance et de diagnostic intégrés au système.

Le fournisseur précisera les délais habituels d'intervention pour les opérations de maintenance corrective ainsi que les modalités de prise en charge des pannes.

L'offre devra également préciser :

- la disponibilité des pièces détachées ;
- la durée de maintien en condition opérationnelle de l'équipement ;
- les délais moyens d'approvisionnement des pièces critiques ;
- la localisation des équipes de support technique.

Le fournisseur s'engage à assurer la disponibilité des pièces détachées, des mises à jour logicielles et du support technique pendant une durée minimale de dix (10) ans à compter de la réception définitive de l'équipement.

Le système proposé devra intégrer des fonctions de diagnostic permettant l'identification rapide des défaillances et la réduction des temps d'immobilisation.

Le fournisseur décrira les contrats de maintenance préventive et corrective pouvant être souscrits à l'issue de la période de garantie, en précisant les prestations incluses ainsi que les niveaux de service associés.

Le titulaire est tenu de fournir la documentation selon les dispositions du CCAP.