

**CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIERES**

**FOURNITURE, INSTALLATION, MISE EN SERVICE D'UN MICROSCOPE  
A FORCE ATOMIQUE (AFM) POUR LE LABORATOIRE PIMM DU  
CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS (CNAM) - PARIS**

---

# CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

Laboratoire PIMM – UMR 8006 CNRS/Arts et Métiers

2 rue Conté – 75003 Paris

---

**Responsable scientifique :** Pr. Stéphane DELALANDE – PIMM, Cnam Paris

**Référence marché :** Procédure n°26-016

## 1. Objet du marché

Le présent Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) définit les exigences techniques minimales relatives à l'acquisition d'un Microscope à Force Atomique (AFM) de haute performance destiné au laboratoire PIMM (Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux) du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam), Paris.

Cet équipement est acquis d'une part dans le cadre du projet ANR AAPG 2026 « MAGIC-3Ds » (Metal-Assisted Graphitization for Innovative Conductive 3D Structures), coordonné par le Pr. Stéphane DELALANDE et d'autre part pour supporter les activités de recherche sur les batteries solides base polymères en cours de développement au sein du PIMM (PEPR Batterie, Réseau RS2E). Il constituera un outil central pour la caractérisation électrique multi-échelle de microstructures 3D conductrices à base de nanotubes de carbone (CNT), de graphène, de céramiques conductrices et de liquide ionique.

Le marché porte sur la fourniture, l'installation, la mise en service et la formation associée à un système AFM complet incluant ses modules applicatifs, accessoires et équipements périphériques tels que détaillés dans les sections suivantes.

## 2. Contexte et objectifs

### 2.1 Contexte scientifique

Les différents projets visent à développer d'une part une voie inédite de fabrication de structures 3D conductrices à l'échelle micro/nanométrique, combinant la polymérisation à deux photons (2PP), la réduction de nanoparticules de nickel (Ni NPs) sous atmosphère hydrogène, et la graphitisation catalytique des chaînes polymères en CNT et graphène. Les matériaux ainsi produits constituent des anodes innovantes pour des micro-batteries tout-polymère à électrolyte solide (PVDF/PEO-LiTFSI) fabriquées par co-extrusion au PIMM. Les cathodes à base de LFP et de NMC pourront également être étudiées. D'autre part, les cellules complètes à base de polymères co-extrudées, dans un procédé original développé au laboratoire, seront également étudiées à neuf, en cours de fonctionnement et après vieillissement.

La caractérisation multi-échelle des propriétés électriques est un axe central des programmes de recherche. Il est impératif de pouvoir cartographier à l'échelle nanométrique les contributions

respectives des chemins conducteurs des feuillets de graphène et des réseaux de CNT au transport de charge macroscopique, par AFM conducteur (C-AFM) sur sections transversales préparées par FIB.

## 2.2 Objectifs techniques de l'équipement

L'AFM acquis doit permettre d'atteindre les objectifs analytiques suivants :

- Cartographie de conductivité électrique locale (C-AFM / PeakForce TUNA) sur coupes FIB de microstructures CNT/graphène–Ni hybrides, avec résolution spatiale inférieure à 20 nm et gamme de courant de 20 pA à 100 nA.
- Cartographie quantitative des propriétés nanomécaniques (module d'Young, adhésion, dissipation) par PeakForce QNM, gamme 1 MPa–5 GPa, indispensable pour corréler conductivité électrique et intégrité mécanique des structures graphitisées. Dans ce mode on doit pouvoir enregistrer l'ensemble des courbes de force à chaque pixel de l'image.
- Cartographie du potentiel de surface (KPFM) pour évaluer la distribution du potentiel de contact entre les phases présentes dans les couches actives et quantifier les jonctions Schottky éventuelles.
- Imagerie topographique haute résolution (ScanAsyst, TappingMode, peak Force Tapping, Résonnance en torsion) des structures 2PP imprimées avant et après graphitisation, pour quantifier l'anisotropie de retrait dimensionnel sur des architectures de taille de struts allant de 1 µm à 20 µm.

## 3. Description générale de la ligne

Le système AFM requis est un microscope à sonde locale à balayage large échantillon (« tip-scanning » ou « sample-scanning ») capable de couvrir des échantillons jusqu'à 150 mm de diamètre, équipé d'un plateau motorisé pour les mesures multi-sites programmables. Le système doit intégrer nativement les modes d'imagerie fondamentaux (TappingMode, Contact, ScanAsyst, PeakForce Tapping Mode résonnance en torsion) ainsi qu'un ensemble de modules applicatifs permettant les mesures électriques décrites à la section 2.

L'ensemble comprend : la tête de balayage SPM avec tête de scan en boucle fermée sur les axes X, Y et Z ; le contrôleur numérique avancé avec logiciel de pilotage et d'analyse ; la table d'isolation vibratoire pneumatique ; les modules applicatifs C-AFM/PeakForce TUNA, KPFM; ainsi que le kit d'installation, de mise en service et de formation sur site.

Le système de référence pris en compte pour la rédaction du présent CCTP est le Bruker Dimension Nexus (offre n° 22309836R2, datée du 5 mai 2026). Tout système équivalent ou supérieur, proposé par un autre fabricant, est recevable à condition de satisfaire l'intégralité des exigences techniques définies dans les sections 4 à 9.

## 4. Microscope à force atomique – Exigences principales

### 4.1 Plateau motorisé et capacité d'échantillon

|                                      |                           |
|--------------------------------------|---------------------------|
| <b>Plage XY du plateau motorisé</b>  | ≥ 150 mm × 150 mm         |
| <b>Diamètre max. échantillon</b>     | ≥ 150 mm                  |
| <b>Épaisseur max. échantillon</b>    | ≥ 15 mm                   |
| <b>Programmabilité multi-sites</b>   | Obligatoire               |
| <b>Optique vidéo – plage de zoom</b> | 180 µm à 1 465 µm minimum |

## 4.2 Tête de balayage et performances SPM

Conception en pointe balayée demandée de façon à ce que l'échantillon reste toujours fixe et que les performances restent constantes quel que soit la taille et le poids de l'échantillon.

|                             |                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Type de boucle              | Boucle fermée (closed-loop) sur X, Y et Z                                                                                                                                                   |
| Plage de scan XY nominale   | $\geq 90 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$                                                                                                                                                 |
| Plage de scan Z nominale    | $\geq 10 \mu\text{m}$                                                                                                                                                                       |
| Capteurs X/Y/Z              | Thermiquement compensés, haute précision                                                                                                                                                    |
| Résolution d'image maximale | $\geq 5\,000 \times 5\,000$ pixels                                                                                                                                                          |
| Modes fondamentaux inclus   | TappingMode (air/liquide), Contact, Lateral Force, ScanAsyst, PeakForce Tapping, PhaseImaging, Force Spectroscopy, Force Volume, Lift Mode, resonance en torsion (Torsional Resonance Mode) |

### Pour le mode Peak Force tapping :

- Mode avec oscillation hors résonance sinusoïdale (de 1 à 600nm d'amplitude) avec une excitation jusqu'à 2kHz
- L'asservissement (par PID) doit se faire en temps réel sur l'oscillation hors résonance. Une solution par seuillage n'est pas acceptée
- Doit permettre un contrôle direct de la force d'interaction pointe/ surface de l'échantillon et la force d'appuie asservie doit pouvoir être  $< 30\text{pN}$
- Afin d'assurer une bonne précision des mesures on doit disposer d'une compensation automatique des dérives du signal de déflexion-mécaniques, la soustraction de déflexions parasites (amortissement longue distance, bruit de fond) doit être réalisée en temps réel à chaque pixel de l'image
- Doit permettre une optimisation automatique, continue et en temps réel des paramètres principaux y inclus le « setpoint » et les gains de la boucle d'asservissement
- Ce mode doit pouvoir fonctionner avec des leviers AFM standards

Pour le mode Résonance en torsion :

Le cantilever est excité en résonance de torsion et l'amplitude de cette résonance est utilisée comme signal de rétroaction. La résonance de torsion doit être obtenue par un système à double piézo-élément, avec des signaux d'excitation en opposition de phase.

## 4.3 Contrôleur numérique et logiciel

Le contrôleur numérique doit intégrer au minimum :

- $\geq 11$  convertisseurs analogique-numérique (dont  $\geq 3$  haute vitesse)
- $\geq 13$  convertisseurs numérique-analogique (dont  $\geq 5$  haute vitesse)
- $\geq 3$  détecteurs lock-in numériques
- $\geq 8$  canaux de données simultanés
- $\geq 14$  connexions BNC configurables par logiciel
- Accès au signal virtuel (Virtual Signal Access)
- Contrôle Q digital

Le logiciel de pilotage doit fonctionner sous Windows 10 ou version ultérieure et inclure un module d'analyse d'image avancé (traitement Fourier, analyse de portance, analyse de courbe de force, rendu 3D, historique Undo/Redo, compatible avec tous les formats de fichiers du constructeur).

## 5. Modes électriques, alimentation et injection de signal

### 5.1 Module AFM conducteur – PeakForce TUNA

Ce module est indispensable à la réalisation de cartographie C-AFM sur coupes FIB. Il doit satisfaire les spécifications suivantes :

|                                        |                                                                                        |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Mode principal</b>                  | PeakForce TUNA (courant de pointe et courant moyen par cycle)                          |
| <b>Modes additionnels inclus</b>       | TUNA, TR-TUNA (torsional resonance), C-AFM                                             |
| <b>Gamme de gain</b>                   | $\geq 6$ niveaux, de 100 nA/V à $\leq 20$ pA/V                                         |
| <b>Bande passante (gain max)</b>       | $\geq 10$ kHz pour la détection du courant de pointe                                   |
| <b>Bruit de courant (gain max)</b>     | $\leq 100$ fA (courant moyen en conditions d'imagerie)                                 |
| <b>Plage de polarisation appliquée</b> | mV à $\geq 10$ V                                                                       |
| <b>Compatibilité PeakForce QNM</b>     | Incluse dans le module (module d'Young, adhésion, déformation, dissipation simultanés) |
| <b>Résolution spatiale C-AFM</b>       | $\leq 20$ nm sur coupes FIB de matériaux hybrides CNT/Ni                               |

On doit également disposer d'un mode permettant l'obtention de données mécaniques et électrique de type spectroscopie en plus des mesures topographiques en 3D créant ainsi un mode en 4D.

Ce mode 4D doit permettre :

- L'acquisition, en une seule fois et en créant un seul fichier de données, de la topographie et en chaque pixel de l'image une courbe de force/ distance et une spectroscopie d'un signal électrique (de type I/V ; I/Z par exemple) ceci en 512 x 512
- L'acquisition de ce mode doit se faire en mode cartographie de spectroscopie de force (force volume)
- Logiciel de traitement des données permettant de traiter les images incluant un spectre et une courbe de force/ distance par pixel

### 5.2 Module en température

L'instrument sera compatible avec une option de variation de température (de -35°C à 250°C). En ce qui concerne les expériences avec option de température, la stabilité de l'appareil permettra d'analyser une petite zone (typiquement 4  $\mu\text{m}^2$ ) de l'ambiante à 250 °C sans perdre la zone d'analyse. Il sera important de contrôler également la température de la pointe. Il est impératif, également de pouvoir opérer sous atmosphère contrôlée (gaz inerte, humidité environnementale, etc)..

### 5.3 Compatibilité environnementale pour C-AFM

Compte tenu des exigences de nos projets (mesures sur matériaux sensibles à l'humidité et à l'oxydation), le système C-AFM doit être compatible avec le module de température décrit en 5.2 et un environnement contrôlé (atmosphère inerte, humidité contrôlée). Si cette fonctionnalité n'est pas native, le soumissionnaire précisera les options disponibles pour l'adapter.

## 6. Modules applicatifs spécialisés

### 6.1 Module PeakForce KPFM

La caractérisation du potentiel de surface à l'échelle nanométrique est requise pour identifier les différences de potentiel de contact entre les phases actives dans les structures hybrides.

|                                                    |                                                                           |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <b>Détection KPFM</b>                              | AM-KPFM et FM-KPFM (les deux modes requis)                                |
| <b>Mode topographique</b>                          | TappingMode ET PeakForce Tapping (les deux)                               |
| <b>Mode haute tension</b>                          | PeakForce KPFM-HV pour cartographie de potentiel en gamme étendue         |
| <b>Résolution spatiale KPFM</b>                    | $\leq 20$ nm (FM-KPFM)                                                    |
| <b>Mesure sans diaphonie topographie/potentiel</b> | Obligatoire (crosstalk-free)                                              |
| <b>Répétabilité quantitative</b>                   | Haute (corrélée avec mesures macroscopiques)                              |
| <b>Sondes incluses</b>                             | $\geq 10$ sondes SCM-PIT-V2 et $\geq 10$ sondes PFQNE-AL (ou équivalents) |

## 7. Instrumentation et contrôle procédé

### 7.1 Sondes et porte-sondes inclus

La fourniture de base doit inclure au minimum les consommables suivants :

|                                                                                |                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Porte-sondes PeakForce/Contact/TappingMode (air)</b>                        | $\geq 2$ unités                              |
| <b>Sondes TappingMode (types RTESPA-300, RTESPA-150, TESPA-V2, VTESPA-300)</b> | $\geq 40$ sondes (répartition entre modèles) |
| <b>Sondes ScanAsyst-Air-HPI</b>                                                | $\geq 20$ sondes                             |
| <b>Sondes ScanAsyst-Fluid et ScanAsyst-Fluid+</b>                              | $\geq 10$ sondes de chaque type              |
| <b>Sondes PeakForce TUNA (PFTUNA)</b>                                          | $\geq 10$ sondes (pack)                      |
| <b>Sondes SCM-PIT-V2 (KPFM)</b>                                                | $\geq 10$ sondes                             |

|                                                                                     |                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| <b>Sondes PFQNE-AL (KPFM)</b>                                                       | $\geq 10$ sondes           |
| <b>Sondes calibrées (SAA-HPI-30, RTESPA-150-30, RTESPA-300-30 et RTESPA-525-30)</b> | $\geq 5$ sondes par modèle |

## 7.2 Logiciels de pilotage et d'analyse

- Logiciel de pilotage SPM : version  $\geq V10.0$  (ex. NanoScope 6 ou équivalent), incluant les modes PeakForce Tapping avec fréquence variable et échantillonnage haute vitesse.
- Module d'analyse d'image avancé : traitement Fourier, analyse de portance (bearing), analyse de courbes de force, rendu 3D, superposition de couches (skin overlay), filtrage, math image, Undo/Redo, compatible avec toutes versions de fichiers du constructeur.
- Interface utilisateur redessinée avec rendu graphique optimisé pour une utilisation efficace dans tous les modes.
- Compatibilité avec les flux de données en temps réel du logiciel de pilotage.

## 7.3 Configuration informatique

|                                |                                                           |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>Processeur minimum</b>      | Intel Core i7 (génération $\geq 8700$ ) ou équivalent     |
| <b>Moniteur</b>                | $\geq 1$ écran LCD $\geq 27$ pouces (100-240 V, 50/60 Hz) |
| <b>Système d'exploitation</b>  | Windows 10 ou version ultérieure                          |
| <b>Alimentation contrôleur</b> | 100-240 V, 50/60 Hz (commutation automatique)             |

## 8. Table d'isolation vibratoire et équipements périphériques

### 8.1 Table d'isolation vibratoire pneumatique

Une table d'isolation vibratoire pneumatique est requise pour garantir les performances nominales du système AFM en environnement laboratoire. Elle doit satisfaire les exigences suivantes :

|                                                                   |                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Type</b>                                                       | Table pneumatique avec ensemble de roulettes                                                                 |
| <b>Dimensions (L <math>\times</math> P <math>\times</math> H)</b> | $\geq 600$ mm $\times$ 600 mm $\times$ 780 mm                                                                |
| <b>Charge utile maximale</b>                                      | $\geq 150$ kg                                                                                                |
| <b>Compatibilité sol</b>                                          | Sol béton plein (non compatible avec planchers surélevés de type informatique sans plateforme intermédiaire) |
| <b>Alimentation en air comprimé</b>                               | Fournie séparément (non incluse dans la table)                                                               |

## 8.2 Module d'alimentation air/vide pour plateau motorisé

Le kit d'alimentation en air comprimé et vide pour le plateau motorisé doit être fourni. Il doit inclure le mandrin à vide 150 mm usage général. Note : ce kit n'assure pas l'alimentation de la table anti-vibratoire.

## 8.3 Équipements informatiques et mobilier

Le soumissionnaire précisera dans son offre si un bureau ou poste de travail est inclus pour le placement du moniteur, du clavier, de la souris et du contrôleur. À défaut, le titulaire du marché informera l'acheteur des prérequis d'implantation (surface minimale, hauteur dégagée, distance au microscope) au moment de la livraison.

## 9. Encombrement, mobilité et intégration

### 9.1 Implantation en laboratoire

L'équipement sera implanté dans une salle dédiée à la caractérisation de surface du laboratoire PIMM (Cnam, Paris 3e). Le soumissionnaire fournira avec son offre un plan d'encombrement indicatif (vue de dessus) indiquant les emprises du microscope, de la table anti-vibratoire et des équipements périphériques (contrôleur, écran, ordinateur).

### 9.2 Conditions ambiantes requises

|                                      |                                                                                     |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Température de fonctionnement</b> | 18 °C à 26 °C (stabilité $\leq \pm 1$ °C/h recommandée)                             |
| <b>Humidité relative</b>             | 20 % à 60 % HR (sans condensation)                                                  |
| <b>Niveau vibratoire du sol</b>      | Conforme aux préconisations du constructeur (communiquer les critères dans l'offre) |
| <b>Alimentation électrique</b>       | 230 V $\pm$ 10 %, 50 Hz – préciser la puissance appelée totale                      |
| <b>Réseau informatique</b>           | RJ45 ou Wi-Fi (préciser)                                                            |

### 9.3 Dégagements minimaux

- Dégagement frontal (accès opérateur) :  $\geq 900$  mm
- Dégagement latéral (maintenance) :  $\geq 600$  mm
- Hauteur libre disponible sous plafond :  $\geq 2\,400$  mm

## 10. Sécurité et conformité

### 10.1 Conformité réglementaire

|                    |                                                         |
|--------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Marquage CE</b> | Obligatoire – l'ensemble du système doit être marqué CE |
|--------------------|---------------------------------------------------------|

|                                              |                                                                                                |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Compatibilité électromagnétique (CEM)</b> | Conforme à la directive 2014/30/UE                                                             |
| <b>Basse tension</b>                         | Conforme à la directive 2014/35/UE                                                             |
| <b>RoHS</b>                                  | Conforme à la directive 2011/65/UE (restriction des substances dangereuses)                    |
| <b>Substances chimiques (REACH)</b>          | Les consommables et matériaux fournis doivent être conformes au règlement REACH (CE 1907/2006) |

## 10.2 Sécurité laser et optique

Si le système inclut une source laser (par exemple pour l'alignement de la détection optique du levier), la classe laser et les équipements de protection associés doivent être précisés. La source laser doit être de classe  $\leq 3R$  selon IEC 60825-1, ou être intégralement encapsulée (risque laser intrinsèquement maîtrisé).

## 10.4 Gestion des consommables et déchets

Les sondes AFM usagées, les solutions électrochimiques et les réactifs associés relèvent des filières de collecte spécifiques aux déchets de laboratoire. Le soumissionnaire précisera les procédures de traitement et d'élimination recommandées pour les consommables fournis (sondes, solutions de référence, gaz spéciaux le cas échéant).

## 11. Livraison, essais et réception

### 11.1 Conditions de livraison

|                                                                                    |                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| <b>Lieu de livraison</b>                                                           | Cnam Paris – PIMM, 151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris                 |
| <b>Mode de livraison</b>                                                           | DAP Paris (75013) – Delivered at Place                                     |
| <b>Délai de livraison – éléments principaux (microscope, table, modules 1 à 4)</b> | $\leq 16$ semaines à compter de la réception du bon de commande            |
| <b>Conditionnement</b>                                                             | Emballage adapté au transport d'instruments de précision (chocs, humidité) |
| <b>Préavis de livraison</b>                                                        | $\geq 5$ jours ouvrés avant la date de livraison effective                 |

### 11.2 Mise en service et essais de réception

La mise en service comprend l'installation mécanique et électrique de l'ensemble du système, l'alignement optique, la vérification des performances en boucle fermée (bruit de base  $Z < 50$  pm RMS en conditions normales de laboratoire), la qualification de chaque mode applicatif sur échantillons de référence fournis par le titulaire, et la validation du logiciel de pilotage.

Les essais de réception porteront au minimum sur :

- Imagerie en TappingMode ScanAsyst : bruit de ligne  $\leq 0,2$  nm RMS sur échantillon de référence plan.

- Mesure C-AFM/PeakForce TUNA : résolution de courant  $\leq 100$  fA (bruit cycle-moyen au gain maximal) sur échantillon conducteur de référence.
- Cartographie KPFM (FM) : résolution de potentiel  $\leq 5$  mV sur échantillon de référence bimétallique fourni.
- Imagerie PeakForce QNM : mesure du module réduit sur deux polymères de référence (module 1–10 GPa et 1–100 MPa) avec écart  $< 15$  % par rapport aux valeurs certifiées.

### 11.3 Formation initiale

Une formation sur site d'au minimum 5 jours (ou équivalent en formation hybride présentiel/distanciel) est requise, couvrant : l'utilisation des modes d'imagerie de base et avancés, l'exploitation de chaque module applicatif (C-AFM, KPFM), les opérations de maintenance courante (nettoyage optique, remplacement de porte-sondes, étalonnage), et l'utilisation du logiciel d'analyse. La formation doit être planifiée avec un préavis minimal de 2 semaines.

## 12. Documentation

### 12.1 Documents à fournir à la livraison

- Manuel d'utilisation complet (en anglais, au minimum ; version française appréciée), au format électronique (HTML ou PDF) livré sur le système informatique intégré.
- Schémas électriques de raccordement (alimentation, BNC, potentiostat, contrôleur de température).
- Plans d'encombrement et de raccordement fluides/gaz.
- Procédures de maintenance préventive et corrective de premier niveau.
- Fiches de sécurité (FDS/SDS) des consommables chimiques livrés.
- Déclaration CE de conformité de l'ensemble du système.
- Rapport de réception signé par le constructeur, récapitulant les résultats des tests effectués en usine (FAT – Factory Acceptance Test), si applicable.

### 12.2 Documentation complémentaire souhaitée

- Notes d'application relatives aux mesures C-AFM sur matériaux hybrides conducteurs.
- Notes d'application relatives à la mesure KPFM en mode FM sur hétérostructures carbone/métal.

## 13. Maintenance, garantie et support technique

### 13.1 Garantie

|                                             |                                                                    |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Durée de garantie</b>                    | $\geq 12$ mois à compter de la réception définitive                |
| <b>Périmètre garanti</b>                    | Pièces, main-d'œuvre, déplacements et transport                    |
| <b>Exclusions</b>                           | Pièces et matières consommables (sondes, solutions, gaz)           |
| <b>Délai d'intervention sur site</b>        | $\leq 5$ jours ouvrés à compter de la déclaration de panne         |
| <b>Disponibilité des pièces de rechange</b> | Garantie $\geq 10$ ans après la fin de commercialisation du modèle |

---

### 13.2 Contrat de maintenance (option)

Le soumissionnaire proposera en option un contrat de maintenance annuel (CMA) prenant effet à l'expiration de la garantie constructeur, incluant : une visite préventive annuelle, l'accès au support téléphonique/e-mail avec temps de réponse  $\leq 4$  heures ouvrées, les mises à jour logicielles majeures et mineures, et les pièces de rechange hors consommables.

### 13.3 Support technique et mises à jour logicielles

- Accès aux mises à jour logicielles (correctifs et nouvelles fonctionnalités) pendant toute la durée de garantie, sans surcoût.
- Hotline technique (téléphone ou e-mail) en français ou anglais, disponible les jours ouvrés (9 h–18 h CET/CEST).
- Accès à une base de connaissances en ligne (notes d'application, FAQ, tutoriels vidéo).
- Possibilité de prise en main à distance pour diagnostic.

## Annexe 1 – Tableau récapitulatif des exigences

Le tableau ci-dessous résume les exigences minimales opposables à tout soumissionnaire. La mention « Obligatoire » signifie que l'absence de cette fonctionnalité est éliminatoire.

| Exigence                                     | Valeur minimale requise                                   | Statut                        |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Plateau motorisé XY                          | $\geq 150 \times 150$ mm, multi-sites programmable        | Obligatoire                   |
| Boucle fermée X/Y/Z                          | Capteurs thermiquement compensés                          | Obligatoire                   |
| Plage scan XY                                | $\geq 90 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$               | Obligatoire                   |
| Plage scan Z                                 | $\geq 10 \mu\text{m}$                                     | Obligatoire                   |
| Résolution image                             | $\geq 5\,000 \times 5\,000$ pixels                        | Obligatoire                   |
| Modes fondamentaux                           | TappingMode, Contact, ScanAsyst, PeakForce Tapping        | Obligatoire                   |
| Contrôleur – ADC haute vitesse               | $\geq 3$ ADC HS parmi 11 total                            | Obligatoire                   |
| DAC haute vitesse                            | $\geq 5$ DAC HS parmi 13 total                            | Obligatoire                   |
| Lock-in numériques                           | $\geq 3$                                                  | Obligatoire                   |
| Module C-AFM/PeakForce TUNA                  | $\geq 6$ niveaux de gain, bruit $\leq 100$ fA             | Obligatoire                   |
| Résolution spatiale C-AFM                    | $\leq 20$ nm sur coupe FIB                                | Obligatoire                   |
| Module PeakForce QNM                         | Inclus dans C-AFM (module d'Young, adhésion, déformation) | Obligatoire                   |
| Module KPFM                                  | AM + FM, PeakForce Tapping et TappingMode, sans diaphonie | Obligatoire                   |
| Table anti-vibratoire pneumatique            | $\geq 600 \times 600 \times 780$ mm, $\geq 150$ kg        | Obligatoire                   |
| Marquage CE                                  | Ensemble du système                                       | Obligatoire                   |
| Installation + mise en service               | Sur site, $\leq 16$ semaines (éléments principaux)        | Obligatoire                   |
| Formation sur site                           | $\geq 5$ jours                                            | Obligatoire                   |
| Garantie                                     | $\geq 12$ mois pièces + main-d'œuvre + déplacement        | Obligatoire                   |
| Compatibilité environnement contrôlé (C-AFM) | Atmosphère inerte / humidité contrôlée                    | Fortement souhaité            |
| Contrat de maintenance annuel (option)       | Visite préventive + support + MAJ logiciel                | Option obligatoire à chiffrer |