

**RAPPORT**CEA/DIF/DASE/SRCE
DO 106

13/04/26



26RRBC000149

Diffusé le 14/04/26

NPR DEFPA RBC CDC 26000149 A

**CAHIER DES CHARGES REFERENCE POUR L'ACHAT D'UN : MICROSCOPE
ELECTRONIQUE A BALAYAGE POUVANT FONCTIONNER EN MODE FAIBLE
VIDE (LV) ET EQUIPE D'UNE COLONNE ELECTRONIQUE FONCTIONNANT AVEC
UN CANON A EFFET DE CHAMP (FEG) ET D'UNE COLONNE IONIQUE (FIB) AU
CEA / DAM – ÎLE DE FRANCE**

[Signature]
Chef du Service
Radioanalyses, Chimie et Environnement

Nombre total de pages : 16

CEA

Centre CEA DAM Ile-de-France - Bruyères-le-Châtel | 91297 Arpajon Cedex
T. +33 (0)1 69 26 46 50 | F. +33 (0)1 69 26 70 65

Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

Direction des applications militaires

Département Analyse, Surveillance, Environnement

Service Radioanalyses, Chimie et Environnement

PAGE SANS TEXTE

TABLEAU DES EVOLUTIONS		
Version	Motif et nature des évolutions	Date
A	Création.	13/04/2026 (version A)

SOMMAIRE

1. OBJET, INTERVENANT ET DOMAINES D'APPLICATION	5
1.1. Objet	5
1.2. Intervenant	5
1.3. Domaine d'application.	5
2. SPECIFICATIONS SUR LES EQUIPEMENTS OBLIGATOIRES (PART FERME)	6
2.1. La colonne électronique	6
2.2. La colonne ionique	6
2.3. La platine et le porte échantillon	7
2.4. Les détecteurs pour l'imagerie	7
2.5. Le spectromètre de rayons X à sélection d'énergie (EDS).	8
2.6. Le logiciel de recherche automatique de particules	8
2.7. Autres équipements techniques obligatoires	9
2.7.1 Injecteurs de gaz pour dépôts de matière	9
2.7.2 Un dispositif de nettoyage de la pollution carbonée dans la chambre de mesure	9
2.7.3 Un dispositif de prélèvement de micro-objets associé à la colonne ionique.	9
2.8. Logiciels obligatoires	10
2.8.1 Ecriture de scripts en langage Python.	10
2.8.2 Réalisation de cartographies de grandes dimensions	10
2.8.3 Découpage automatique de lamelles à l'aide du faisceau ionique	10
3. LES SPECIFICATIONS POUR LES EQUIPEMENTS OPTIONNELS	11
3.1. Spectromètre combinant la détection des électrons rétrodiffusés et des rayons X	11
3.2. Spectromètre EDS sans fenêtre (<i>windowless</i>)	11
3.3. Spectromètre EDS rétractable à faible distance de l'échantillon	11
3.4. Autres injecteurs de gaz	12
3.5. Un détecteur STEM	12
3.6. Un détecteur de type EBSD	12
3.7. Un dispositif de micro-prélèvement munis de pinces	12
3.8. Logiciel de reconstruction en trois dimensions	12
3.9. Logiciel de post-traitement des images et spectres	13
4. AUTRES SPECIFICATIONS	13
4.1. Informatique	13
4.2. Documents	13
4.3. Délais de livraison	13
4.4. Réception	14
4.5. Formation	14
4.6. Garantie (option)	14
4.7. Maintenance (option)	14
4.8. Considérations environnementales et sociales	14
4.9. Réalisation de tests	15
5. REFERENCES	15
6. LISTE DE DIFFUSION	16

1. OBJET, INTERVENANT ET DOMAINES D'APPLICATION

1.1. Objet.

Le présent document décrit les caractéristiques d'un instrument d'analyse de type Microscope Electronique à Balayage équipé d'une colonne électronique à haute résolution fonctionnant avec un canon à effet de champ (FEG : *Field Emission Gun*), pouvant fonctionner en mode faible vide (LV : *Low Vacuum*), équipé de plusieurs détecteurs permettant l'obtention d'images électroniques et l'établissement de spectres de rayons X, ainsi que d'une colonne ionique (FIB : *Focused Ion Beam*), en vue de l'obtention de propositions commerciales de la part de fabricants d'instrumentation scientifique.

1.2. Intervenant.

Maître d'ouvrage : Commissariat à l'Energie Atomique ; Direction d'Ile-de-France ; Département Analyse Surveillance Environnement ; Bruyères-le-Châtel ; 91297 Arpajon Cedex

Responsable de l'appareillage : Gabriel GAIFFE, CEA/DASE/SRCE ; Tél. 01 69 26 68 47

E-mail : gabriel.gaiffe@cea.fr

Responsable adjoint : Fabien POINTURIER, CEA/DASE/SRCE ; Tél. 01 69 26 49 17

E-mail : fabien.pointurier@cea.fr

1.3. Domaine d'application.

Le microscope électronique à balayage, équipé d'une colonne haute résolution fonctionnant avec un canon à effet de champ (FEG), sera utilisé pour diverses applications, parmi lesquelles :

- La recherche automatique et la caractérisation morphologique (description précise de la géométrie et de la texture de surface) et élémentaire (identification et détermination semi-quantitative des teneurs des constituants élémentaires majeurs et mineurs) de particules micrométriques et infra micrométriques. Les microparticules d'intérêt sont généralement composées de métaux lourds tels que l'uranium et sont présentes à la surface de divers supports, parmi lesquels les disques de carbone collants (également appelés « stubs »), des disques de graphique (typiquement de diamètre 25 mm), de disques en silicium ou en acier, mais aussi de supports non conducteurs tels que des filtres en nylon. Dans certains cas, les particules recherchées sont composées d'éléments légers (carbone, magnésium, calcium, etc.). Les particules d'intérêt sont le plus souvent entourées d'un nombre bien supérieur de particules dites « environnementales » d'origines naturelles ou industrielles. Les images sont acquises en électrons rétrodiffusés et en électrons secondaires, et les spectres de rayons X à l'aide d'un détecteur à dispersion en énergie (EDS).
- La réalisation de micro-enclumes en diamant par usinage à l'aide d'un faisceau d'ions focalisé (FIB), permettant la réalisation de géométries complexes à l'échelle micrométrique, notamment des profils toroïdaux, ainsi que de structures spécifiques telles que des cavités micrométriques et des microstructures (piliers ou dômes) adaptées à certaines expériences.
- L'usinage de trous de quelques microns de diamètre dans les joints en rhénium indentés, ainsi que l'usinage de couronne d'Au.
- La découpe en tranches fines à l'aide du faisceau ionique de microparticules, l'analyse morphologique et élémentaire des sections découpées et la reconstitution en trois dimensions de la composition élémentaire et de la structure des microparticules.
- La découpe et le micro-prélèvement de fractions de micro-objets d'intérêt, éventuellement sous forme de lamelles, puis le transfert et le positionnement de ces parties découpées sur des supports appropriés.

- Le marquage des disques supports par abrasion à l'aide du faisceau d'ions ou de dépôt élémentaire.

2. SPECIFICATIONS SUR LES EQUIPEMENTS OBLIGATOIRES (PART FERME)

Le microscope électronique à balayage proposé devra être impérativement équipé des équipements et logiciels décrit ci-dessous.

2.1. La colonne électronique

- L'instrument devra comporter une colonne électronique à haute résolution dotée d'un canon à effet de champ (FEG) et le logiciel associé permettant le réglage et le paramétrage de la colonne électronique.
- Le microscope devra fonctionner en mode haut vide et en mode pression contrôlée. La valeur maximale de la pression dans la chambre devra atteindre 500 Pa.
- La colonne électronique devra être équipée d'une L'instrument devra être équipé d'un mode de décélération du faisceau électronique (*beam deceleration*) permettant d'abaisser l'énergie d'atterrissage sur l'échantillon tout en conservant un courant de sonde élevé, afin d'améliorer la résolution et le contraste de surface à basse tension d'atterrissage.

Les principaux éléments, caractéristiques et performances de la colonne électronique seront :

- Source : canon à émission de champ de type Schottky.
- Tension d'accélération : 200 V à 30 kV minimum.
- Résolution en mode haut vide à la distance de travail optimale :
 - Inférieure ou égale à 0,7 nm à 30 kV en électrons secondaires.
 - Inférieure ou égale à 1,4 nm à 1 kV en électrons secondaires.
 - Inférieure ou égale à 1,2 nm à 1 kV avec décélération du faisceau en électrons secondaires.
- Résolution en mode « pression contrôlée » :
 - Inférieure ou égale à 1,5 nm à 30 kV en électrons secondaires.
 - Inférieure ou égale à 3,0 nm à 1 kV en électrons rétrodiffusés.

2.2. La colonne ionique

La colonne ionique produit un faisceau d'ions focalisés (FIB) pour la découpe ou le micro-usinage de haute précision de micro-objets dans des matrices diverses, constituées d'éléments lourds (uranium par exemple) ou légers (carbone, silicium, ...). L'instrument comportera le logiciel associé permettant le réglage et le paramétrage de la colonne ionique. Le faisceau ionique pourra également être utilisé pour la réalisation de repères qui permettent de relocaliser les micro-objets d'intérêts après transfert dans un autre instrument d'analyse. Les repères consisteront en gravures dont les dimensions sont de l'ordre de quelques μm .

Il est demandé que :

- La colonne ionique soit dotée d'un système de pompage différentiel pour une meilleure protection de la source ionique, afin de préserver la qualité du faisceau et permettre une utilisation sécurisée des gaz dans la chambre (pour le dépôt ou la gravure).

- Il soit possible de passer d'un mode d'utilisation FIB (micro-usinage, préparation de lamelles) à un mode d'analyse microchimique (cartographie EDS, recherche de particules) sans intervention mécanique majeure. Le délai de reconfiguration logicielle et d'alignement devra être précisé par le soumissionnaire.
- Le système dispose d'une compensation automatique qui permette de maintenir automatiquement la coïncidence des faisceaux et la hauteur eucentrique lors des mouvements de rotation ou d'inclinaison de la platine.
- Le logiciel intègre un moniteur d'alignement qui avertit l'utilisateur lorsque les conditions de faisceau ionique doivent être recalibrées en fonction du temps écoulé.
- Le système dispose de fonctions pour compenser automatiquement les taux de pulvérisation différents selon les matériaux afin d'assurer une épaisseur de lamelle uniforme.

Les principaux éléments, caractéristiques et performances de la colonne ionique seront :

- Source : gallium liquide
- Courant de faisceau : de 1 pA à au minimum 100 nA.
- Diamètre du spot à l'intensité maximale de 100 nA : < 10 nm.
- Tension d'accélération comprise entre 500 V et 30 kV.
- Durée de vie de la source : supérieure à 1000 heures.
- Résolution : inférieure ou égale à 2,5 nm à 30 kV.

Par ailleurs, la colonne ionique devra comporter :

- Un mode de suppression de la dérive spatiale du faisceau ionique (drift suppression) utilisant le faisceau électronique comme référence de repositionnement en temps réel, afin de maintenir la précision de l'usinage sur des durées prolongées.
- Un dispositif de correction des effets dynamiques du faisceau (temps de réponse / dwell time), permettant de garantir la fidélité des motifs pour des temps de pose courts (de l'ordre de 25 ns).

2.3. La platine et le porte échantillon

Les principales caractéristiques de la platine seront :

- La platine motorisée est mobile sur cinq axes X, Y, Z, Tilt et Rotation.
- Les déplacements pour chaque axe seront à minima les suivants : X = 55 mm, Y = 55 mm, Z = 65 mm, Tilt = de -35° à +90°, Rotation = 360° en continu.
- La répétabilité de repositionnement de la platine pour des déplacements de grandes amplitudes (d'un bord à l'autre de la platine) devra être inférieure ou égale à $\pm 3 \mu\text{m}$.
- Il devra également être possible de positionner sur le porte échantillons au minimum 18 « stubs » standards (diamètre de 12 mm) éléments pour effectuer plusieurs recherches automatiques de particules.
- La chambre de mesure devra comporter au moins 20 ports pour l'ajouts de périphériques.

2.4. Les détecteurs pour l'imagerie

Le microscope électronique devra être équipé de détecteurs d'électrons secondaires et rétrodiffusés qui permettent les acquisitions d'images en modes « haut vide » et « pression contrôlée ».

Plus précisément, l'offre devra comporter :

- Un détecteur d'électrons secondaires immergé dans la colonne électronique.
- Un détecteur d'électrons secondaires rétractable situé dans le haut de la colonne électronique pour capter les électrons secondaires issus de l'extrême surface de l'échantillon.
- Un détecteur d'électrons rétrodiffusés immergé dans la colonne électronique à haute vitesse d'acquisition.
- Un détecteur qui permet à la fois la détection des ions (après conversion en électrons) et des électrons secondaires. Il permet de réaliser des images même en conditions de neutralisation de charge positive.

- Un détecteur d'électrons secondaires dédié au mode bas-vide, utilisant le gaz résiduel de la chambre comme milieu d'amplification du signal par ionisation en cascade (effet Townsend), permettant l'imagerie d'échantillons non conducteurs sans métallisation préalable.
- Un détecteur d'électrons rétrodiffusés rétractable comportant plusieurs segments pour des images en contraste de numéro atomique à basse tension. Il devra être possible de sélectionner les segments par le logiciel.

2.5. Le spectromètre de rayons X à sélection d'énergie (EDS).

Un spectromètre de rayons X à dispersion en énergie (EDS) et le logiciel associé permettant l'acquisition et le traitement des spectres ainsi que la réalisation de cartographies élémentaires en mode haut vide et en mode partiel.

Le détecteur du spectromètre EDS, de technologie SDD (*Silicon Drift Detector*), devra présenter les caractéristiques suivantes :

- Résolution inférieure à 46 eV à 50000 coups par secondes pour la raie $K\alpha$ du Carbone.
- Résolution inférieure à 59 eV à 50000 coups par secondes pour la raie $K\alpha$ du Fluor.
- Résolution inférieure à 127 eV à 200000 coups par secondes pour la raie $K\alpha$ du Manganèse.
- Surface supérieure ou égale à 60 mm².
- Détection des éléments légers à partir du bore.
- Gamme de détection très large, de la raie L de l'Al à 73 eV jusqu'à l'Am.
- Electronique numérique ultra rapide capable de supporter des taux de comptage atteignant 2×10^6 coups/s en entrée pour un nombre de coups traités de $8,5 \times 10^5$ coups/s.
- Protection du détecteur par un clapet de protection automatique lorsque celui est rétracté.

Le logiciel associé au spectromètre devra être capable d'effectuer les fonctions de base classiques telles que :

- Acquisition et observation des spectres.
- Réajustement automatique et continu de l'échelle des spectres.
- Manipulation des spectres à la souris.
- Calibration en énergie automatique ou manuelle avec indication de la résolution.
- Visualisation de la position des raies K, L et M par marqueurs.
- Annotation des pics caractéristiques, des pics somme et des pics d'échappement.
- Identification automatique et manuelle des pics caractéristiques.
- Définition de régions d'intérêt par l'utilisateur.
- Comparaison de spectres.
- Présence des fonctions : Normalisation, Addition, Soustraction, Multiplication, lissage des spectres, génération de pics, soustraction des pics d'échappement, du fond continu.
- Réalisation de cartographies.
- Possibilité de déconvolution des spectres, avec affichage de celle-ci en superposition du spectre.
- Analyses quantitatives.
- Sauvegarde des spectres aux formats TIFF, JPEG ou BMP.
- Réalisation de cartographies élémentaires.

2.6. Le logiciel de recherche automatique de particules

Un logiciel de recherche automatique de particules de type GSR (*Gun Shot Residue*) ou équivalent qui permet de détecter spécifiquement les particules dont les éléments chimiques constitutifs possèdent un numéro atomique moyen supérieur à un seuil donné.

Les particules à détecter auront des tailles comprises entre quelques centaines de nanomètres et 10 micromètres. Ces particules sont déposées à la surface de différents supports, conducteurs ou non, tels

que des disques de carbone, autocollant ou non, des disques de silicium, des disques inox ou des filtres nylon.

Le logiciel proposé devra présenter les caractéristiques suivantes :

- Détection spécifique des particules dont les éléments chimiques constitutifs possèdent un numéro atomique moyen supérieur à un seuil donné choisi par l'opérateur.
- Possibilité de choisir tous les paramètres de la recherche automatique (nombre de pixel, durées de l'analyse EDS, etc.) et de définir les classes de particules (éléments majeurs dans les particules).
- Analyse complètement automatique.
- Utilisation du même logiciel que celui proposé pour l'acquisition des spectres EDX.
- Fourniture d'un étalon pour la calibration de la réponse en niveaux de gris en fonction du numéro atomique du détecteur d'électrons rétrodiffusés,
- Possibilité d'analyser jusqu'à un minimum de 18 échantillons avec des caractéristiques de recherche différentes pour chaque échantillon.
- Indication précise de la position, du diamètre, de la surface, du numéro atomique moyen de chaque particule détectée et analysée,
- Possibilité aisée de réanalyser les particules pour une confirmation d'un résultat en permettant le positionnement immédiat du faisceau électronique sur la particule à étudier.
- Possibilité de détecter jusqu'à 10000 particules de chaque classe.

Le couplage de ce logiciel avec un système permettant d'augmenter la vitesse de balayage sera considéré comme un avantage. La durée approximative pour balayer la surface d'un support de dépôt des échantillons moyenne requise pour détecter environ 10000 particules et réaliser un spectre permettant d'identifier les éléments majeurs les constituants devra être comprise entre 10 et 17h.

2.7. Autres équipements techniques obligatoires

2.7.1 Injecteurs de gaz pour dépôts de matière

Ces dépôts seront utilisés pour la protection de zones d'intérêt lors d'opération de fraisage et pour la réalisation de repères qui permettent de relocaliser les particules. Les marques apposées seront par exemples des lettres, chiffres ou des symboles géométriques, dont les dimensions seront comprises entre quelques μm et quelques dizaines de μm .

- Le système sera équipé de deux injecteurs de gaz pour le dépôt de matière avec le faisceau d'ions ou le faisceau d'électrons de matière contenant respectivement du platine et du tungstène.

Par ailleurs, le soumissionnaire devra indiquer :

- La précision du contrôle de la distance entre l'aiguille d'injection et la surface de l'échantillon au point eucentrique.
- Si le remplacement des précurseurs peut être effectué par l'utilisateur via un système de filtration d'air dédié pour minimiser le temps d'arrêt de l'instrument.
- Si le système permet de réaliser des dépôts protecteurs assistés par faisceau d'électrons avant la découpe FIB pour préserver la surface des échantillons.

2.7.2 Un dispositif de nettoyage de la pollution carbonée dans la chambre de mesure

- Le système sera équipé d'un dispositif de type *Plasma Cleaner* qui puisse assurer un nettoyage de la chambre de mesure (élimination de tout ou partie des composés organiques volatiles).

2.7.3 Un dispositif de prélèvement de micro-objets associé à la colonne ionique.

L'instrument devra comporter un dispositif piloté par l'utilisateur et permettant de prélever des objets micrométriques à l'intérieur de la chambre d'analyse du microscope électronique.

Ce dispositif comportera typiquement une pointe extrêmement fine mise en contact avec le micro-objet à prélever, qui sera soudé à la pointe au moyen du faisceau ionique. Le dispositif sera utilisable pour la récupération *in-situ* de lames minces en vue d'analyses TEM mais aussi pour le prélèvement de particules de quelques centaines de nm à quelques μm . Ces particules pourront être présentes à la surface de disques de graphite, de filtre en nylon ou autre matériau support de diamètre 1 pouce ou $\frac{1}{2}$ pouce ou de disque de carbone collant (ou « stub »).

Quelques caractéristiques et performances attendues sont les suivantes :

- Ce dispositif sera installé de manière permanente dans la chambre du microscope.
- Le plus petit pas de déplacement devra être inférieur ou égal à 100 nm.
- La répétabilité du repositionnement dans une direction donnée devra être inférieure à 150 nm.
- La dérive après l'insertion doit être inférieure à 200 nm par minute.
- Les déplacements maximums du dispositif en X, Y et Z seront précisés par le fournisseur.
- Le manipulateur pourra effectuer des rotations de 360° . Le soumissionnaire devra indiquer la précision du maintien de la pointe sur le point d'intérêt (déplacement attendu) après une rotation de 180° .
- Le micromanipulateur devra être entièrement contrôlé par le logiciel du microscope (sans boîtier de commande externe) et devra permettre le rappel de positions via un asservissement en boucle fermée.

2.8. Logiciels obligatoires

2.8.1 Ecriture de scripts en langage Python.

- L'instrument devra être équipé d'une interface de programmation (API) basée sur un langage standard (comme le Python) qui permette de contrôler via des scripts dans un langage standard l'intégralité des fonctions du microscope (vide, platine, faisceaux, détecteurs, ...).
- Il devra être possible de rédiger des scripts à distance (depuis un ordinateur de support ou un ordinateur portable) afin de ne pas monopoliser l'ordinateur de contrôle du microscope pour le développement de routines.
- Il est souhaité que l'environnement de développement inclue des outils d'aide au codage, comme un navigateur de commandes intégré ou un support pour des bibliothèques tierces de traitement d'image (OpenCV, NumPy, Matplotlib).

2.8.2 Réalisation de cartographies de grandes dimensions

- L'instrument devra être équipé d'un logiciel qui permet la réalisation de cartographies élémentaires sur de très grandes surfaces (plusieurs cm^2).
- Le logiciel devra ainsi permettre l'assemblage parfait de cartographies de plus petites dimensions.
- Le logiciel devra permettre d'importer et de corrélérer des données provenant de microscopes tiers (optiques, autres MEB).
- Le logiciel devra permettre de superposer les cartographies élémentaires aux images électroniques (BSE/SE) pour une analyse visuelle directe.
- Le fournisseur devra préciser s'il est possible de piloter le déplacement de la platine du MEB en utilisant comme guide une image provenant d'un autre instrument et préalablement alignée.

2.8.3 Découpage automatique de lamelles à l'aide du faisceau ionique

L'objectif est de produire des échantillons de haute qualité de manière répétable, même pour des non-experts.

- Une solution logicielle devra être proposée pour la préparation entièrement automatisée et non surveillée (y compris pendant la nuit) de lamelles TEM, incluant les étapes de découpe, de retrait (*lift-out*) et d'amincissement final.

Par ailleurs, le soumissionnaire indiquera :

- La durée moyenne pour la préparation complète d'une lamelle (du retrait à l'amincissement final) par un utilisateur débutant.
- Si le logiciel de pilotage permet de programmer et d'exécuter la préparation automatique de plusieurs lamelles sur différents sites au cours d'une même session.
- En complément, le système devra permettre l'intégration, au sein des procédures automatisées, de séquences dédiées à la réalisation d'usinage spécifiques (type enclumes toroïdales). Ces fonctionnalités pourront reposer sur un développement spécifique (scripts avancés via API, modules additionnels ou prestations du fournisseur). Elles devront pouvoir fonctionner sans surveillance durant (la nuit) et s'intégrer dans des processus de travail automatisés comportant plusieurs étapes.

3. LES SPECIFICATIONS POUR LES EQUIPEMENTS OPTIONNELS

Certains accessoires apporteraient une plus-value mais ne sont pas considérés comme essentiels. A ce titre, ils sont mentionnés ci-dessous sous forme d'options.

3.1. Spectromètre combinant la détection des électrons rétrodiffusés et des rayons X

L'instrument devra pouvoir être équipé d'un détecteur permettant la détection simultanée des électrons rétrodiffusés et des rayons X pour permettre la réalisation d'imagerie élémentaire combinant une information topographique et élémentaire pour réduire l'effet d'ombrage dû au relief d'un échantillon non plan.

3.2. Spectromètre EDS sans fenêtre (*windowless*)

L'ajout possible, sous forme d'option, d'un spectromètre de rayons X à dispersion en énergie (EDS), fonctionnant seulement en mode haut vide, uniquement basé sur un détecteur sans fenêtre (*windowless*) pour la détection des éléments légers est demandé.

Les caractéristiques attendues sont les suivantes :

- Surface de détection d'au moins 160 mm².
- Résolution inférieure à 128 eV pour la raie K_α du Mn pour un taux de comptage de 10⁵ coups/s.
- Fonctionnement dans une plage de haute tension de 1 kV à 30 kV
- Le détecteur devra être protégé des risques de dégradation consécutif à une remise à l'air ou à l'utilisation du mode faible vide.
- La chaîne d'acquisition numérique devra accepter 10⁶ coups/s en entrée et 5.10⁵ coups/s traités sans saturation.

3.3. Spectromètre EDS rétractable à faible distance de l'échantillon

- L'instrument devra pouvoir être équipé d'un spectromètre EDS à détecteur silicium à dérive (SDD) à fenêtre ultra-mince, monté sur un bras motorisé rétractable permettant d'approcher le détecteur à faible distance de travail de l'échantillon.
- L'angle solide de collection devra être précisé par le soumissionnaire (valeur typiquement supérieure à 0,9 stéradian pour les détecteurs de grande surface active).

- La résolution en énergie sur la raie K_{α} du Mn devra être précisée.

3.4. Autres injecteurs de gaz

Il est demandé de chiffrer l'ajout de deux autres injecteurs de gaz, pour la réalisation de repères à la surface du matériau support et la protection de zones d'intérêt lors des opérations de fraisage :

- Un injecteur d'or
- Un injecteur de carbone.

3.5. Un détecteur STEM

L'ajout possible d'un détecteur des électrons transmis en STEM est demandé.

- Ce détecteur se composera de trois sections concentriques en forme d'anneaux pour la réalisation d'imagerie en champ clair, en champ sombre réglable et un contraste de composition amélioré, et en champ sombre à grand angle
- Le logiciel de contrôle du microscope permettra de passer facilement d'un mode d'imagerie à l'autre

3.6. Un détecteur de type EBSD

Nous demandons au soumissionnaire de chiffrer un système EBSD standard.

Ce système comportera une caméra avec les caractéristiques et performances suivantes :

- Basée sur la technologie CMOS.
- Un écran phosphore optimisé pour les acquisitions rapides/haute sensibilité.
- Une très haute vitesse d'acquisition supérieure ou égale à 2000 images par seconde (fps).
- Un taux d'indexation qui atteint 99%, même sur matériaux complexes
- Une précision d'orientation inférieure à $0,1^{\circ}$, sans procédure de correction avancée.
- Détecteur d'électrons secondaires de type FSD (*Forward Scatter Detector*) pour l'acquisition d'image

Le logiciel de l'EBSD devra permettre :

- La réalisation de mesures d'orientation.
- L'établissement de corrélation chimie / cristallographie avec l'EDS.

3.7. Un dispositif de micro-prélèvement munis de pinces

L'ajout possible d'un dispositif de micro-prélèvement d'objets micrométriques (particules) à l'intérieur de l'instrument pouvant être prolongé avec deux micro-pincettes (sous forme de *plug in*) est demandé. Ces particules pourront être présentes à la surface de disques de carbone ou de filtres nylon.

- Ce dispositif devra permettre de prélever des particules de tailles comprises entre quelques centaines de nm et quelques μm .
- Le dispositif pourra être mis en place dans la chambre du microscope au niveau de la platine lorsque de besoin et retiré si nécessaire.
- Les déplacements maximums des dispositifs de micro-prélèvements en X, Y et Z seront précisés.

3.8. Logiciel de reconstruction en trois dimensions

L'ajout possible d'un logiciel de reconstruction en trois dimensions d'un micro-objet, de dimensions micrométriques, à partir des images électroniques et des spectres de rayons X effectuées sur des tranches de l'objet obtenues par découpage à l'aide du faisceau ionique est également demandé.

3.9. Logiciel de post-traitement des images et spectres

Il est également demandé de proposer un logiciel complet de post-traitement des images et spectres acquis. Ce logiciel pourra être piloté avec un ordinateur dédié. Il permettra notamment :

- La fusion de données de natures différentes.
- La segmentation des images.
- Le « nettoyage » des images (élimination des artéfacts).
- Le recalage des images.
- L'automatisation des traitements d'images.
- La reconstruction 3D en combinant des informations de différentes natures.

4. AUTRES SPECIFICATIONS

4.1. Informatique

L'ensemble du système devra être piloté par un ou deux ordinateurs. Ils devront permettre le pilotage complet de l'appareil, ainsi que l'acquisition, le traitement et la sauvegarde des données. Les logiciels devront permettre l'exportation des données de façon simple et automatique vers MS-Office™.

Le ou les ordinateurs devront être munis d'un lecteur graveur de DVD, d'un disque dur interne et d'un disque dur externe d'une capacité au moins égale à 2 To, d'écrans plats d'au moins 32 pouces et d'une imprimante laser couleur. Le nombre de claviers et de souris sera réduit le plus possible. Les différentes caractéristiques de la configuration proposée devront être précisées.

L'ensemble devra également être équipé d'une imprimante couleur de qualité laser et d'une imprimante vidéo de type « Videoprint » (clichés des images électroniques).

Enfin, les exigences pour l'exploitation de l'outil informatique et du respect du volet cybersécurité sont fournies dans le document applicable « Rapport CCTG – Exigences spécifiques applicables aux marchés incluant une fourniture ou un service en lien avec de l'informatique, du logiciel ou du contrôle-commande ». Une attention particulière sera portée aux exigences liées au maintien en condition de sécurité, à la gestion de l'obsolescence et à la maîtrise par le CEA des éléments matériels et immatériels.

Les informations manipulées par le système spécifié seront de sensibilité maximale « diffusion restreinte ».

4.2. Documents

Le fournisseur devra joindre au dossier une description technique détaillée de l'instrument et de tous ses accessoires, ainsi que des manuels d'instruction des utilisateurs et la liste complète des références des consommables et des pièces de rechange, le tout en français ou en anglais.

4.3. Délais de livraison

Le matériel sera livré et installé sur le site CEA de Bruyères-le-Châtel au plus tard le 1^{er} décembre 2026.

4.4. Réception

Le transfert de propriété du matériel sera prononcé après installation au laboratoire et contrôle des performances annoncées par le fournisseur après vérification des performances indiquées dans le présent cahier des charges.

4.5. Formation

Une formation à l'utilisation de l'appareil et du logiciel et de formation à la maintenance de l'instrument sera dispensée sur site pour trois utilisateurs. Il est bien entendu que la formation devra couvrir, outre l'utilisation du MEB lui-même et sa maintenance, l'utilisation de tous les périphériques (EDS, FIB, etc.) et de tous les logiciels qui seront fournis avec l'instrument. Son coût éventuel sera mentionné dans l'offre. La durée de la formation sera également mentionnée.

4.6. Garantie (option)

Le fournisseur garantira le bon fonctionnement du matériel pour une durée de 2 ans ou de 3 ans selon l'option levée par le CEA. La période de garantie s'entend à compter de la signature du procès-verbal de réception.

4.7. Maintenance (option)

Le fournisseur fera une offre de maintenance pour une période d'un an à l'issue de la période de garantie. Un certain nombre d'opérations de maintenance simples pourront être assurées par le personnel du CEA. Ces derniers devront disposer à ce titre de l'ensemble des documents techniques permettant le suivi de la qualité des opérations.

Le contenu et le coût des divers contrats de maintenance proposés par le fournisseur devront être décrits. Les indications qui devront à minimal y figurer sur une base annuelle sont :

- Le nombre de visites correctives par an (éventuellement illimité pour certains contrats).
- Le nombre de visites annuelles de maintenance préventive.
- Le délai d'intervention garanti (à distinguer du délai de prise en charge et de réponse).

Le fournisseur précisera les pièces qui sont prise en charge dans le cadre du contrat et celles qui ne le sont pas. Par ailleurs, une liste exhaustive des pièces d'usure et de rechange, avec leurs références complètes sur catalogue (n° de référence et coût) devra être jointe.

Enfin, une présentation de la structure SAV au niveau national et la liste des utilisateurs en France, sera fournie avec la réponse à la consultation.

4.8. Considérations environnementales et sociales

Le fournisseur présentera une offre dans laquelle il s'engage, pendant la durée du marché, à opérer les actions de maintenance (préventive et corrective) permettant d'allonger la durée de vie des produits. Le fournisseur s'engage à pouvoir fournir les pièces de rechange nécessaires au maintien en conditions opérationnelles des produits pendant 10 ans à compter du terme du marché. A ce titre, le fournisseur présentera dans un chapitre - Environnement les éléments suivants :

- Part de produits écolabellisés proposés,
- Qualité des prestations de maintenance proposées (optimisation de la durée de vie des produits, logistique mise en place, réparations, etc.),
- Proposition d'emballages recyclés, recyclable et éventuellement réutilisés,
- tout élément complémentaire que le soumissionnaire propose dans le cadre de son offre pour la préservation de l'environnement.

Le fournisseur accompagnera le CEA dans le déploiement d'un data management dédié à la sobriété numérique, promouvant une gestion « sobre » de la donnée. Ceci permettra également la réduction d'impact des serveurs.

Le fournisseur aura recours à l'éco-conception des algorithmes et des outils (ex. optimisation du code, paramétrage sobre, architecture modulaire et frugale, simplification des IHM-interfaces homme-machine).

Le fournisseur présentera dans son offre sa politique de déplacements visant à limiter les impacts environnementaux. Le soumissionnaire proposera des optimisations du temps passé sur site CEA.

4.9. Réalisation de tests

Les sociétés candidates enverront le rapport d'analyse d'un échantillon représentatif des particules émises par une arme à feu (Pb, Ba, Sb) réalisé à l'aide d'un logiciel de type GSR. Cet échantillon sera constitué de particules déposées à la surface d'un support d'analyse (stub avec un disque de carbone autocollant ou disque de graphite). Les sociétés candidates indiqueront également, la taille, la position et les principaux éléments constitutifs de chaque particule détectée. Un spectre et une image devront être associés à chacune de ces particules.

Ces tests devront être reproduits lors de la recette technique au laboratoire et des résultats similaires devront être obtenus.

5. REFERENCES

Titre	Référence à 23 caractères
EXIGENCES SPECIFIQUES APPLICABLES AUX MARCHES INCLUANT UNE FOURNITURE OU UN SERVICE EN LIEN AVEC DE L'INFORMATIQUE, DU LOGICIEL OU DU CONTRÔLE-COMMANDE	CEA/DAM/DSID/SEAS DO 1 du 16/01/2026 CB GCAO (affiche) 26SSBD000001

6. LISTE DE DIFFUSION

Pas de liste.