Laboratoire SIMAP	**OBJET DU MARCHÉ : Équipement tomographique à rayons X** *Marché de fournitures conclu sous la forme d'une location avec option d'achat* *Appel d'offres ouvert – articles L. 2124-2 et R. 2161-2 à R. 2161-5 du code de la commande publique*

CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIÈRES

Préambule

Le laboratoire SIMAP souhaite s'équiper d'un tomographe à rayons X destiné à l'étude de l'impact des rayons X sur les composants électroniques. L'équipement est acquis dans le cadre d'un marché de fournitures conclu sous la forme d'une location avec option d'achat, au sens de l'article L. 1111-2 du code de la commande publique.

Le tomographe devra permettre à la fois de scanner des dispositifs électroniques de différentes tailles et d'étudier l'influence des spectres RX émis sur la santé de ces dispositifs, en particulier des mémoires flash. Il devra donc permettre d'imager avec une résolution spatiale pouvant atteindre 2 µm et un champ de vue minimum de 2 000 × 2 500 pixels. Il devra permettre de faire varier la tension d'accélération au moins dans une gamme allant de 40 kV (possiblement en dessous) jusqu'à au moins 220 kV, et de changer les cibles afin de modifier les spectres des rayons X émis. Il devra posséder un espace de travail suffisamment grand pour permettre d'installer facilement les dispositifs in operando nécessaires à ce type d'étude, avec les contraintes de connectique et de fluides correspondantes.

Le logiciel d'acquisition devra permettre tout type d'acquisition personnalisée de manière automatique. Il est notamment nécessaire de pouvoir interfacer l'acquisition avec des programmes Python via une API donnant accès à toutes les commandes du tomographe, notamment les axes de déplacement et le contrôle de la source X. Le logiciel de reconstruction devra fonctionner sur des environnements GPU et permettre aux chercheurs d'intervenir sur les corrections pour l'amélioration de la reconstruction. Les projections acquises doivent pouvoir être exportées dans un format ouvert afin d'être modifiées par d'autres outils, puis réimportées dans le logiciel pour reconstruire le volume.

Article 1 – Objet et structure du marché

1.1 Structure du marché

marché porte sur la fourniture, la livraison, l'installation, le raccordement, la mise en service, la formation des utilisateurs et la maintenance pendant la période de location d'un équipement tomographique à rayons X, ainsi que sur la cession de cet équipement à l'acheteur en cas de levée de l'option d'achat.

La période de location court à compter de la date d'admission prononcée dans les conditions de l'article 8 et s'achève au mois d'octobre 2027. Le nombre de loyers est arrêté par ordre de service au moment de l'admission ; seul le montant total des loyers est global et forfaitaire.

Le marché est financé par deux ressources distinctes et non fongibles : le montant non consommé sur l'une ne peut abonder l'autre. Les crédits budgétaires alloués au marché, déterminés et établis avant le lancement de la présente procédure, s'élèvent à :

- 549 996 € HT pour la période de location ;
- 112 500 € HT pour l'option d'achat et la prestation supplémentaire éventuelle décrite à l'article 11.

L'attention des candidats est appelée sur le fait que ces montants constituent le maximum mobilisable par l'acheteur, et non le montant attendu des offres ni un prix de référence. Les candidats fixent librement le prix de leur offre, dans le respect de ces plafonds. Le prix constitue l'un des critères de jugement des offres, dans les conditions et selon la pondération fixées au règlement de la consultation.

Conformément à l'article L. 2152-3 du code de la commande publique, est inacceptable et éliminée l'offre dont le montant total des loyers excède 549 996 € HT, ou dont le prix de l'option d'achat augmenté du prix de la prestation supplémentaire éventuelle excède 112 500 € HT.

1.2 Prestation supplémentaire éventuelle et variante

L'offre comprend une offre de base et une prestation supplémentaire éventuelle décrite à l'article 11. Le chiffrage de cette prestation est obligatoire ; son absence rend l'offre irrégulière. L'acheteur se réserve la faculté de la retenir ou non au moment de l'attribution du marché.

Deux variantes sont par ailleurs **autorisées** dans les conditions de l'article 12. Elles sont distinctes et non cumulables : un candidat peut présenter, en sus de son offre de base, soit la variante n° 1, soit la variante n° 2, mais pas les deux. Leur présentation est **facultative** : l'absence de variante n'affecte pas la régularité de l'offre et n'entraîne pas son rejet. Le candidat qui présente une variante la chiffre dans l'onglet correspondant du cadre de réponse financier et la décrit à l'article 7 du cadre de réponse technique et environnemental, selon les modalités fixées au règlement de la consultation.

Les exigences minimales sont indiquées ci-dessous :

Article 2 – Tube à rayons X

Le tube à rayons X sera un tube ouvert permettant de faire varier la tension d'accélération de 40 kV (possiblement en dessous) à au moins 220 kV. Le tube devra être capable d'atteindre une taille de point source inférieure ou égale à 2 µm ; le candidat indique la méthode de mesure retenue pour établir cette valeur.

Le filament et la cible doivent pouvoir être changés par l'utilisateur. Le tube doit permettre l'utilisation de plusieurs types de cibles afin de faire varier le spectre de rayons X émis ; le candidat précise les cibles disponibles et leurs matériaux.

Le tube devra disposer d'une distance point source-objet la plus petite possible ; cette distance est précisée dans l'offre et valorisée dans la notation.

Le tube devra présenter toutes les autorisations et attestations de conformité nécessaires à son utilisation en France.

Article 3 – Détecteur

Le détecteur sera un flat panel d'au moins 2 000 × 2 500 pixels, de taille de pixel comprise entre 50 et 150 µm, permettant des acquisitions dans différents modes (a minima binning 2×2) et avec un nombre d'images par seconde en full frame au minimum de 15 fps. Il est demandé

de préciser les vitesses d'acquisition maximales en fonction de la ROI et selon le mode de binning.

Un scintillateur CsI multifibre est demandé, compatible avec la meilleure résolution possible. Il est demandé de préciser la technologie du scintillateur et son épaisseur.

La fourniture d'un détecteur de format supérieur fait l'objet de la variante n° 2 décrite à l'article 12.

Article 4 – Moteurs

4.1 Platine de rotation

La platine de rotation devra pouvoir supporter au minimum 25 kg et présenter une précision de wobbling compatible avec les résolutions recherchées (2 µm ou plus à 15 cm au-dessus de la platine). Les valeurs de wobbling et les vitesses de rotation maximales seront précisées.

Une platine de rotation creuse, permettant de disposer d'une motorisation XY de centrage sur la platine, est valorisée dans la notation. Le candidat précise le diamètre du passage, la valeur la plus grande étant la mieux notée.

Une platine supportant une charge supérieure fait l'objet de la variante n° 1 décrite à l'article 12.

4.2 Translations

Le tomographe devra disposer des translations listées ci-dessous. Il est demandé d'indiquer, pour chacune, les précisions de déplacement et de repositionnement en µm ainsi que les amplitudes de déplacement.

- Déplacement vertical de la platine de rotation.
- Déplacement latéral de la source.
- Déplacement de l'échantillon le long de l'axe de zoom.
- Déplacement de l'imageur le long de l'axe de zoom.
- Déplacement latéral de l'imageur permettant de faire du shifting.
- Déplacement XY sur la platine de rotation permettant le centrage de l'échantillon et supportant au moins 25 kg.

Le déplacement vertical de l'imageur n'est pas exigé ; sa présence est valorisée dans la notation. Le candidat qui le propose en précise l'amplitude ainsi que les précisions de déplacement et de repositionnement.

Article 5 – Environnement, cabine et plan de travail

5.1 Cabine

La cabine devra protéger des rayons X selon les normes en vigueur pour les personnes considérées comme « non exposées » (rayonnement ionisant inférieur à 0,5 µSv/h à l'extérieur de la cabine) et posséder toutes les sécurités requises pour sa localisation dans un espace ouvert au public. Elle devra être suffisamment grande pour permettre d'installer facilement des dispositifs in operando, en permettant les passages de câbles nécessaires.

- Porte vitrée permettant un accès facile en position ouverte et une bonne visibilité de l'espace de travail en position fermée. Dans le cas d'une porte non vitrée, il sera nécessaire de prévoir une caméra dans le tomographe.
- Une lumière interne indépendante du système d'ouverture et de fermeture : l'utilisateur pourra allumer ou éteindre la lumière intérieure lors de toute opération sans perturber celle-ci.
- Une lumière externe indiquant clairement si les rayons X sont activés.
- Au moins une chicane suffisamment grande et présentant un rayon de courbure de plus de 8 cm, permettant les passages de câbles et de tuyaux des dispositifs in situ et dédiée aux utilisateurs. La présence d'une seconde chicane est valorisée dans la notation.

5.2 Plan de travail du tomographe

Il est demandé de préciser ce qui est mis en œuvre pour assurer la précision des acquisitions : stabilité mécanique, thermique et vibratoire notamment.

Il est demandé une distance minimale entre le haut de la platine de rotation et le bas du tube d'au moins 5 cm, pour permettre la mise en place de dispositifs in situ.

Un système de fixation rapide de caméra, avec une précision de positionnement de quelques microns, est demandé.

La présence de filetages sur les deux côtés du plan de travail, permettant la fixation de profilés en aluminium, est valorisée dans la notation. Le candidat qui les propose en précise le pas et l'implantation.

5.3 Poids du dispositif et charge au sol

L'ensemble du système – tomographe, alimentation électrique, parc informatique – devra peser moins de 6 tonnes. L'ensemble du tomographe sera installé dans une salle dont la dalle admet une charge maximale de 1,5 tonne par m². Il est demandé de prévoir une plaque de répartition si nécessaire et d'indiquer le matériau et les dimensions de cette plaque.

Article 6 – Contrôle et acquisition

6.1 PC d'acquisition

- L'offre devra détailler la configuration du matériel informatique : processeur, capacités mémoires, cartes graphiques, périphériques, taille des écrans.
- Il doit disposer de suffisamment d'entrées Ethernet, FireWire ou RS232 pour contrôler toutes les translations et les deux caméras optiques.

Les caractéristiques minimales du PC d'acquisition doivent être les suivantes :

  - microprocesseur minimum 4 cœurs ;
  - fréquence du ou des microprocesseurs supérieure ou égale à 2,4 GHz ;
  - mémoire RAM : minimum 128 Go ;
  - système d'exploitation : Windows 11 Pro ;
  - 2 disques durs SSD montés en RAID 1 d'au moins 4 To ;
  - au moins 4 ports USB3 ;

- au minimum 3 sorties 10 GbE libres, pour connexion au réseau informatique du bâtiment, pour une connexion privée avec le PC de reconstruction et pour une connexion avec un PC d'instrumentation ;
- une carte vidéo dédiée à l'affichage capable de gérer les paramètres d'écran indiqués ci-dessous, avec au minimum 4 Go de RAM dédiée ;
- écran plat de type LCD, minimum 27 pouces, 4K ;
- un clavier USB AZERTY ;
- une souris optique USB avec 2 boutons et molette.

6.2 Logiciel d'acquisition et de contrôle

- La suite logicielle doit être ouverte pour permettre la programmation de macros et le contrôle total du tomographe, des différents moteurs et des caméras, indépendamment les uns des autres.
- Elle doit permettre de réaliser les acquisitions précisées à l'article 6.3.
- Il doit être possible de personnaliser n'importe quel type d'acquisition.
- Il doit être possible de prendre le contrôle du PC à distance et de lancer des scans à distance, via le réseau, en utilisant des outils de type VNC.
- Il doit exister une aide contextuelle sur les fonctions de programmation accessibles.
- Il doit permettre d'ajouter facilement d'autres moteurs ou dispositifs d'instrumentation par RS232 ou Ethernet.
- Le logiciel doit permettre de réaliser facilement la calibration du tomographe et d'enregistrer celle-ci pour des configurations données.
- Les fonctionnalités de pilotage du tomographe – pilotage des axes, mise en route et extinction des rayons X, lancement des acquisitions, pilotage éventuel des filtres – doivent pouvoir être fournies sous forme d'API intégrable dans des programmes Python externes.
- Le logiciel d'acquisition doit intégrer la possibilité de réaliser des acquisitions d'images de référence pour corriger les éventuels mouvements de source ou d'échantillon durant l'acquisition.

6.3 Possibilités d'acquisition

Le logiciel doit permettre de réaliser ou d'implémenter facilement :

- des séries de radiographies ;
- de la tomographie standard en mode rotation continue ou pas à pas ;
- de la tomographie hélicoïdale ;
- de la laminographie ;
- de la tomographie multi-échelle de manière automatique ;
- de la tomographie avec axe de rotation décalé pour élargir le champ de vue, en précisant les amplitudes de décalage ;
- de la tomographie locale ;
- de la tomographie par stack ;

- le transfert automatique des données du PC d'acquisition vers le PC de reconstruction, via un lien privé gigabit, dès qu'une acquisition est terminée ;
- la création de macros standards d'acquisition ;
- le contrôle du tomographe via des API dans des programmes Python.

Article 7 – Reconstruction des volumes et PC de reconstruction

7.1 Reconstruction des volumes

- La reconstruction doit se faire sur carte GPU.
- La suite logicielle de reconstruction doit permettre de reconstruire tous les types de tomographie présentés à l'article 6.3.
- La suite logicielle de reconstruction doit permettre d'intervenir sur les corrections des images avant la reconstruction.
- La suite logicielle doit proposer des corrections de beam hardening, de ring artefact et d'axe de rotation, ainsi qu'une correction du focal spot durant les acquisitions, et permettre de choisir les projections retenues pour la reconstruction (nombre et espacement).
- La suite logicielle doit permettre de reconstruire des données acquises avec le tomographe mais modifiées par d'autres programmes.

7.2 PC de reconstruction

L'offre devra détailler la configuration du matériel informatique : processeur, capacités mémoires, cartes graphiques, périphériques, taille des écrans. Le PC de reconstruction doit présenter les caractéristiques suivantes :

- microprocesseur minimum bi-processeur, 6 cœurs par processeur ;
- fréquence du ou des microprocesseurs supérieure ou égale à 2,4 GHz ;
- mémoire RAM : au moins 256 Go ;
- une carte GPU dédiée à la reconstruction (8 000 cœurs minimum, mémoire 16 Go minimum) ;
- système d'exploitation : Windows 11 Pro ;
- 2 disques durs SSD en RAID 1 d'au moins 4 To ;
- 2 disques durs d'au moins 10 To à 7 200 tours par minute montés en RAID 1 ;
- au moins 6 ports USB3 ;
- au minimum 2 sorties 10 GbE, pour connexion au réseau informatique du bâtiment et pour une connexion privée avec le PC d'acquisition ;
- une carte vidéo dédiée à l'affichage capable de gérer 2 écrans, compatible avec les paramètres des écrans indiqués ci-dessous, avec au minimum 4 Go de RAM dédiée ;
- deux écrans plats de type LCD, minimum 27 pouces, 4K ;
- un clavier USB AZERTY ;
- une souris optique USB avec 2 boutons et molette.

Article 8 – Fonctionnement, livraison, installation et mise en service

8.1 Fonctionnement

Le système ne devra nécessiter, pour un fonctionnement optimal, qu'une alimentation en 220 V monophasé. L'ensemble des systèmes électriques devra être placé derrière un onduleur, compris dans l'offre, permettant de supporter sans dommage ni perturbation du fonctionnement les micro-coupures du réseau électrique. Un dispositif de mise en sécurité devra permettre de mettre en pause le système lors de coupures supérieures à 5 minutes et de reprendre les acquisitions en cours lors du redémarrage.

8.2 Livraison et installation

Le délai de livraison ne peut excéder quatre (4) mois à compter de la notification du marché. Le candidat indique dans son offre le délai sur lequel il s'engage ; ce délai est contractuel et son dépassement est sanctionné par les pénalités prévues au CCAP.

Les prestations de livraison, d'installation, de raccordement électrique et de mise en service du tomographe et du système informatique associé sur le site du laboratoire SIMAP seront comprises dans le prix global de l'équipement. Elles devront être détaillées dans la proposition et seront assurées en totalité par le titulaire. Ce dernier est réputé connaître les contraintes liées à la livraison.

L'installation de l'équipement sera précédée d'une visite de pré-installation effectuée par le titulaire dans le local d'accueil de l'appareil, de façon à contrôler que l'environnement est compatible avec un fonctionnement correct du tomographe en haute résolution : mesure de vibrations, de champs magnétiques, notamment. Cette visite fera l'objet d'un compte rendu détaillé du titulaire, proposant les mesures correctives éventuelles à réaliser avant l'installation du matériel.

L'installation et la mise en service devront être réalisées dans un délai maximum d'une (1) semaine à compter de la livraison. La date d'admission, prononcée dans les conditions de l'article 8 du CCAP, constitue le point de départ de la période de location.

Adresse de livraison:

Site du Laboratoire SIMAP : ECOMARCH building, SIMaP, 1130, rue de la piscine, Domaine Universitaire, BP75 38402, Saint-Martin d'Hères)

Article 9 – Formation des utilisateurs

Le titulaire assurera la formation des utilisateurs dans un délai d'un mois à compter de la mise en service. Le contenu de cette formation devra être détaillé dans l'offre et sera au moins équivalent à 2 journées pour six personnes.

Cette formation devra inclure la prise en main de l'équipement et de tous les logiciels associés, les réglages et alignements, les calibrations, l'entretien et la maintenance courante de l'appareil (notamment le changement de filament et de cible), ainsi qu'un volet relatif aux conditions d'utilisation de l'appareil en sécurité au regard du risque d'exposition aux rayonnements ionisants.

Le prix de l'équipement englobe le coût de la formation et les frais de déplacement du titulaire ou de son sous-traitant s'il y a lieu.

Article 10 – Maintenance, garantie, pièces détachées

10.1 Maintenance pendant la période de location

Pendant toute la période de location, la maintenance de l'équipement est intégralement à la charge du titulaire et comprise dans le montant des loyers. Elle porte sur l'ensemble de l'équipement, pièces et main-d'œuvre comprises, et couvre aussi bien la maintenance préventive que la maintenance corrective.

Le candidat précise dans son offre le contenu de la maintenance préventive, les délais d'intervention sur lesquels il s'engage à compter de la déclaration d'un incident, ainsi que les moyens de service après-vente dont il dispose en France.

10.2 Garantie - en cas de levée de l'option d'achat

Le titulaire garantit l'équipement pendant une durée minimale de douze (12) mois à compter du transfert de propriété consécutif à la levée de l'option d'achat. Le candidat précise dans son offre l'étendue de la garantie qu'il propose.

10.3 Mises à jour logicielles - en cas de levée de l'option d'achat

Dans la mesure où des logiciels sont fournis par le titulaire, ce dernier s'engage à informer le laboratoire SIMAP des éventuelles modifications, mises à jour ou extensions du ou des logiciels, et à en faire bénéficier gratuitement le laboratoire SIMAP pendant une durée d'au moins trois ans à compter de la date admission de l'appareil.

10.4 Pièces détachées - en cas de levée de l'option d'achat

Le titulaire garantit la disponibilité des pièces détachées de l'équipement pendant une durée minimale de cinq (5) ans à compter du transfert de propriété. Le candidat indique dans son offre la durée de disponibilité sur laquelle il s'engage ; toute durée supérieure à cinq ans est valorisée dans la notation, afin de limiter l'obsolescence prématurée et de prolonger la durée de vie de l'équipement.

Article 11 – Prestation supplémentaire éventuelle : contrat de maintenance

Le chiffrage de la présente prestation supplémentaire éventuelle est obligatoire ; son absence rend l'offre irrégulière. L'acheteur se réserve la faculté de la retenir ou non au moment de l'attribution du marché. Son prix est porté sur une ligne distincte de la décomposition du prix et entre dans l'assiette du critère prix dans les conditions fixées au règlement de la consultation.

Le candidat chiffre une configuration unique de contrat de maintenance, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- durée de trois (3) ans, à prix global et forfaitaire , prenant effet à l'expiration de la période de garantie ;
- une visite préventive de contrôle par an ;
- trois visites correctives par an, avec fourniture des pièces détachées ;
- mises à jour des logiciels de pilotage du tomographe et de reconstruction comprises.

Le candidat porte un prix global et forfaitaire unique pour cette configuration.

Article 12 – Variantes autorisées

Deux variantes sont autorisées. Elles sont distinctes et non cumulables : un candidat peut présenter, en sus de son offre de base, soit la variante n° 1, soit la variante n° 2, mais pas les deux. Leur présentation est facultative : l'absence de variante n'affecte pas la régularité de l'offre et n'entraîne pas son rejet. Le candidat qui présente une variante respecte l'intégralité des exigences du présent cahier des clauses techniques particulières, à l'exception des caractéristiques que la variante a pour objet de modifier. Les modalités de présentation des variantes et les conditions dans lesquelles elles sont jugées sont fixées au règlement de la consultation.

L'acheteur retient l'offre (de base ou variante) économiquement la plus avantageuse au regard de l'application des critères de jugement définis au règlement de la consultation.

12.1 Variante n° 1 non obligatoire – Platine de rotation de capacité renforcée

Le candidat peut proposer, en lieu et place du système de rotation de l'offre de base, une platine de rotation ainsi que les motorisations nécessaires supportant 80 kg. Les précisions de déplacement, de repositionnement et de wobbling sont précisées et doivent rester compatibles avec la résolution recherchée.

12.2 Variante n° 2 non obligatoire – Détecteur de format supérieur

Le candidat peut proposer, en lieu et place du détecteur de l'offre de base, un détecteur d'au moins 2 800 × 2 800 pixels, de taille de pixel comprise entre 90 µm et 150 µm et permettant au moins 15 fps en full frame. L'offre inclut l'intégration du détecteur dans le logiciel de pilotage.

Article 13 – Protection de l'environnement

Les spécifications techniques ci-dessous et celles relatives à l'exécution du marché sont en lien direct avec l'objet du marché.

13.1 Spécifications techniques des fournitures

Le soumissionnaire indique les spécifications techniques de la machine visant à réduire son impact environnemental. Il répond dans son cadre de mémoire technique aux questions posées, en annexant tout document utile.

Il indique la consommation électrique de l'équipement en fonctionnement et en veille, exprimée en valeurs chiffrées, ainsi que les dispositifs de mise en veille ou d'extinction automatique de la source dont il dispose.

Il décrit les caractéristiques de l'équipement favorisant sa réparabilité, notamment la possibilité pour l'utilisateur de remplacer lui-même le filament et la cible, la disponibilité de la documentation technique de maintenance et la possibilité d'interventions à distance.

Il indique la durée de disponibilité des pièces détachées dans les conditions de l'article 10.4, ainsi que tout renseignement utile sur l'écoconception s'il y a lieu.

13.2 Transport et livraison

Le mode de transport a une incidence directe et significative sur les émissions de gaz à effet de serre. Le soumissionnaire renseigne dans le cadre de mémoire technique les efforts fournis

pour réduire l'impact environnemental des conditions de transport et de livraison mises en œuvre au titre de l'exécution de ce marché.

13.3 Gestion des emballages

Le titulaire limite le nombre d'emballages, notamment plastiques, dans la limite de ce qui est possible pour assurer un transport sécurisé des fournitures. Il privilégie les emballages en matériaux recyclés. Le soumissionnaire précise, dans le cadre de mémoire technique, la proportion d'emballages recyclables ayant servi à l'emballage de l'équipement objet de ce marché, et indique s'il assure la reprise des emballages après installation.

13.4 Gestion des déchets et fin de vie

Le soumissionnaire décrit dans le cadre de mémoire technique ce qu'il met en œuvre pour le traitement des déchets liés à la fabrication et au transport de l'équipement objet du marché, ainsi que les conditions dans lesquelles il assure la reprise de l'équipement en fin de vie au titre de la filière des déchets d'équipements électriques et électroniques.