

Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP)

Acquisition, livraison et installation d'un système de « FOURS ATMOSPHERIQUES ET SOUS VIDE » (AP-LPCVD)

Contenu

1	Présentation du projet	4
1.1	Contexte	4
1.2	Problématique.....	4
1.3	Description globale du système de base	4
2	Installation.....	5
2.1	Dossier d'installation.....	5
2.2	Planning.....	6
2.3	Contraintes concernant le système.....	6
2.3.1	Contraintes liées à l'implantation sur site :.....	6
2.3.2	Contraintes de sécurité	7
3	Description technique du système de base demandé	7
3.1	Station de chargement motorisée et nacelles	8
3.2	Configuration.....	8
3.3	Éléments chauffants pour les 3 tubes	9
3.4	Gaz de procédés, torche externe et steamer.....	10
3.5	Système de pompage et circuit de vide	12
3.6	Performances attendues pour les fours atmosphériques et LPCVD	13
3.7	Système de pilotage, logiciels et interfaces	14
3.7.1	Fonctionnement	14
3.7.2	Connexions	15
3.7.3	Restauration du système.....	15
3.7.4	Licences et mises à jour logiciels	15
3.8	Documentation.....	15
3.9	Liste de recettes de croissance et dépôts	15
4	Livraison, Garantie, Maintenance, Formation, S.A.V	16
4.1	Livraison.....	16
4.2	Garantie.....	17
4.3	Formation	17
4.4	Pièces détachées	18
4.5	Service après-vente hors garantie.....	18

5	Vérification et réception des prestations.....	18
5.1	Réception provisoire en usine.....	18
5.2	Vérification d'aptitude et réception définitive.....	19
6	Prestations supplémentaires éventuelles (PSE) facultatives et obligatoires	21
6.1	Tube et nacelles en SiC (PSE facultative).....	21
6.2	Trans-LC ou DCE (PSE obligatoire).....	21
6.3	Extension de garantie (PSE facultative).....	21
6.4	Kit de maintenance (PSE facultative)	21
6.5	Contrat de maintenance (PSE facultative)	21
7	Devis	22

1 Présentation du projet

1.1 Contexte

La Centrale de micro nanofabrication de l'IEMN (Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie) dispose d'un ensemble de salles blanches de 1600 m² doté d'un parc d'équipements de 32 millions d'euros permettant de traiter les différentes actions menées au sein du laboratoire se situant en micro nano et optoélectronique, en matériaux nanostructurés, en micro nano et biosystèmes (MEMS, NEMS et BIOMEMS-NEMS).

Le pôle dépôt et épitaxie de la centrale de l'IEMN est équipé de diverses techniques de dépôt physique en phase vapeur (PVD) et de dépôt chimique en phase vapeur assistée (CVD). L'une des machines, acquise en 1998, utilise les techniques spécifiques CVD d'oxydation à pression atmosphérique et de dépôt à faible pression ou « Atmospheric Pressure and Low Pressure Chemical Vapor Deposition » (AP and LPCVD).

Dans le cadre du FEDER 2026 et du Contrat de Plan Etat Région (CPER) 2021/2027 IMITECH, l'IEMN souhaite effectuer **le remplacement d'une partie de son ancien système** en faisant l'acquisition d'un nouveau système de fours AP et LPCVD, qui servira non seulement aux technologues de l'IEMN mais aussi à la communauté scientifique française et internationale dans le cadre du réseau RENATECH.

1.2 Problématique

Le matériel souhaité est un système de fours de croissance et de dépôt de couches minces utilisant les technologies AP et LPCVD. Cet équipement permettra de renouveler et fiabiliser la gamme des moyens d'élaboration des matériaux disponibles dans la centrale de technologie IEMN et de soutenir des projets de recherche technologiques dans les domaines des micro-nano et biosystèmes sur Si, la micro-nano-électronique sur Si.

L'objectif visé est la réalisation de couches minces d'oxyde de silicium thermique (SiO₂) sec et humide (dry TOX, wet TOX), de nitrure de silicium stœchiométrique (Si₃N₄) et faiblement contraint (Si_xN_y-LS) sur des substrats en standard de 100mm mais pouvant aller de 50mm à 150mm avec des chargements de 50 substrats.

En conclusion, l'IEMN souhaite acquérir un nouvel équipement de croissance et dépôt AP et LPCVD offrant une gamme de matériaux (oxydes et nitrures de silicium) fondamentale pour la technologie silicium.

1.3 Description globale du système de base

Le candidat devra décrire précisément les caractéristiques du système de base et des prestations supplémentaires éventuelles (PSE) facultatives et obligatoires proposées dans son offre.

Le système de base demandé est un bâti de **3 fours horizontaux superposés**, à structure compacte, destiné à effectuer des traitements thermiques d'oxydation, de recuit et des dépôts de couches minces pour une utilisation dans des projets de micro-nanofabrication. Ces projets vont de la preuve de concept académique jusqu'au transfert industriel et production de petites séries. L'équipement sera installé en **passee-cloison**. La salle blanche, côté chargement des substrats, est de classe ISO 6 et le local technique, côté tubes et cabinet de gaz, est de classe ISO 7.

L'équipement sera utilisé pour réaliser des films **d'oxyde de silicium sec et humide et de nitrure stœchiométrique et faiblement contraint**.

Les tubes d'oxydation et de dépôt seront dimensionnés pour traiter principalement des substrats de **100mm mais ils devront s'adapter au traitement des substrats de 50mm, 76mm et 150mm**. La capacité de traitement devra être de **50 wafers**.

Les tubes de croissance et dépôt seront **couplés à une station de chargement motorisée**.

La station de chargement sera conçue pour accepter des substrats principalement 100mm mais devra s'adapter pour accepter des substrats de 50mm, 76mm et 150mm. La capacité de chargement devra être de 50 wafers. **Le chargement des substrats devra être automatisé et motorisé**. La station devra être équipée d'un **flux laminaire horizontal** pour limiter la contamination des substrats. Les nacelles seront fournies pour les différentes tailles de substrats. Le système pourra associer plusieurs gaz afin de déposer les composés souhaités et les panneaux de gaz seront intégrés à la machine.

Les commandes électriques seront intégrées au système.

Le système de pompage du tube LPCVD devra être fourni avec tous les éléments nécessaires à sa protection (piège à particules...).

L'équipement sera piloté par un PC de supervision avec une interface conviviale.

Le titulaire fournira **une liste de recettes dans l'offre, et une librairie de recettes lors de l'installation**.

Différentes prestations supplémentaires (PSE) facultatives ou obligatoires sont demandées : un tube et des nacelles en SiC pour un tube d'oxydation et recuit, des bulleurs (bubblers) pour le décapage et la décontamination des tubes d'oxydation et wafers, une extension de garantie d'un an supplémentaire, un kit de pièces de maintenance et un contrat de maintenance. Ces prestations sont décrites au paragraphe 6 du présent CCTP.

2 Installation

2.1 Dossier d'installation

Le titulaire, supervisé par les équipes techniques de l'IEMN, s'occupera de l'installation sur le site. Le transport sera sous la responsabilité du titulaire depuis le départ du site de production jusqu'à **la livraison en salle blanche à l'IEMN** et n'aura lieu qu'avec l'accord formel de l'IEMN.

Le titulaire fournira tout outillage spécifique nécessaire à l'installation ou à la mise au point de l'équipement. Les pièces de rechange ou les produits consommables nécessaires pour l'installation du système seront également fournis.

Dans un délai d'un (1) mois maximum après la notification du marché, le titulaire devra obligatoirement fournir :

- Un plan à jour indiquant les dimensions exactes et détaillées de l'équipement ainsi que l'empreinte au sol et le poids ;
- La liste des servitudes nécessaires pour mettre en fonctionnement l'équipement, telles que l'air comprimé, la puissance électrique, les fluides et gaz, les types de raccord, la pression, les débits et la consommation.

Le titulaire devra également indiquer les exigences éventuelles d'emplacement des différentes pièces de sous-assemblage afin de préparer l'installation.

2.2 Planning

Il est de la responsabilité du titulaire de déterminer la charge de travail afin de respecter le planning.

Suite à la notification, le titulaire devra fournir le planning prévisionnel indiquant les éléments suivants :

- Temps nécessaire pour fabriquer l'équipement ;
- Date d'admission provisoire en usine sur le site du titulaire ;
- Transport ;
- Date de livraison en salle blanche à l'IEMN ;
- Planning d'installation ;
- Date d'admission définitive sur le site de l'IEMN.

2.3 Contraintes concernant le système

2.3.1 Contraintes liées à l'implantation sur site :

Le titulaire devra **obligatoirement** respecter les exigences d'implantation de l'IEMN décrites dans ce paragraphe.

Le système sera installé **en passe-cloison**, avec la station de chargement en salle blanche et les tubes d'oxydation et de dépôt ainsi que les éléments chauffants, les panneaux de gaz, le système électrique et de pompage dans le local technique. L'équipement doit être compatible avec une installation en salle propre de classe ISO 6.

La zone disponible pour l'implantation du nouveau système est appelée « zone délimitée pour le nouvel équipement » sur l'image 1 ci-dessous. Le système devra donc être le plus compact possible tout en laissant l'espace nécessaire pour la circulation et la maintenance de l'équipement. Les dimensions des nouveaux équipements indiquées sur le plan considèrent leurs encombrements maximums.

Le candidat pourra demander à visiter les locaux destinés à l'implantation de la machine s'il le juge utile durant la consultation, selon les modalités prévues dans le règlement de la consultation.

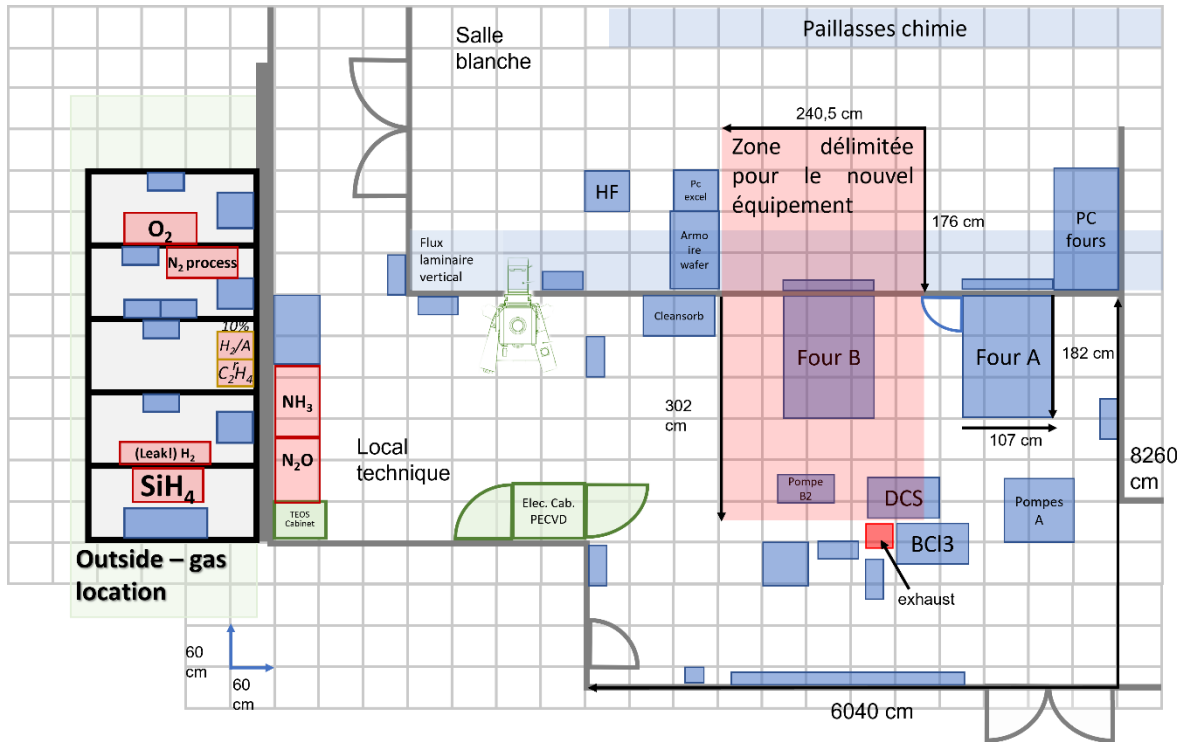


Image 1 : Zone délimitée pour le nouvel équipement en salle blanche et local technique.

Attention : Tout matériel proposé par un candidat dont **les dimensions seront incompatibles** avec les contraintes de taille des salles blanches **entraînera le rejet de l'offre.**

2.3.2 Contraintes de sécurité

L'équipement sera conforme à la réglementation française en vigueur. En particulier, la documentation concernant la sécurité et le mode d'emploi utilisateur devra être rédigée en français ou en anglais. L'équipement doit être livré avec un certificat CE à la charge du titulaire. L'équipement doit être conforme aux normes électriques CEE et CEM, mais également françaises (230 V - 50 Hz pour le brochage des prises monophasées et 400 V - 50 Hz pour le triphasé). Les personnes intervenantes lors de l'installation devront être titulaires des titres d'habilitation nécessaires à la mise en marche et la maintenance de l'équipement (notamment l'habilitation électrique).

3 Description technique du système de base demandé

Le système sera équipé de verrouillages de sécurité qui préviendront les risques de dommages matériels et garantiront la sécurité de l'opérateur.

Le système monté en **passerelle** devra être composé **d'un bâti de 3 fours horizontaux superposés, couplés à une station de chargement automatique motorisée**. La configuration de la superposition des 3 tubes devra être la suivante :

- Tube 1 supérieur : oxydation sèche / humide **avec steamer** APCVD
- Tube 2 intermédiaire : oxydation sèche / humide **avec torche** APCVD

- Tube 3 inférieur : Nitrure de silicium stœchiométrique et faiblement contraint LPCVD

3.1 Station de chargement motorisée et nacelles

L'équipement sera pourvu d'une **station de chargement compacte automatique motorisée sous flux laminaire horizontal** afin de permettre le transfert des substrats dans les tubes sous une classe d'empoussièrement ISO 6 minimum. Le système de chargement sera localisé en salle blanche et devra inclure, pour le flux laminaire, les turbines de recirculation d'air, les préfiltres et filtres absolus.

La station de chargement devra permettre, pour chaque tube, le chargement et le déchargement des nacelles contenant les substrats à l'aide d'un bras (cantilever) ou d'un dispositif de support (twin rods) en matériau compatible avec les procédés mis en œuvre dans les tubes (**croissance à 1100°C pour l'oxydation thermique**). Chaque bras (cantilever) ou autre dispositif de support devra être réglable afin d'optimiser le centrage des substrats dans le tube et devra facilement s'adapter aux différents diamètres des substrats de travail (100mm en standard et 150mm, 76mm et 50mm). Le temps nécessaire à l'opérateur pour passer d'un format de substrat à un autre devra être le plus court possible.

Les 3 tubes seront équipés pour leur fermeture de portes en quartz et pour la fermeture de la cage reliée à l'extraction (scavengers) d'une porte inox.

Le matériel à fournir **devra comprendre au minimum** la fourniture pour chaque tube (3 en tout) des nacelles porte-substrats pour chaque dimension (4 en tout) de wafers utilisés 100mm en standard, 150mm, 76mm et 50mm (**12 nacelles minimum au total**) ainsi que **tous les éléments nécessaires** (les écrans thermiques, nacelles pour les wafers écrans, écrans gaz (baffles), etc.) à l'obtention de couches uniformes sur **50 substrats**.

Le candidat décrira dans son offre :

- Le fonctionnement du chargement/déchargement motorisé des nacelles de substrats dans les tubes ainsi que les conditions qu'il recommande pour l'optimisation de l'opération (vitesse, température ...), la sécurité de l'opérateur et de la machine ;
- Le système de maintien et de centrage des nacelles des échantillons ainsi que le rôle de tous les éléments présents sur le bras du robot afin de garantir le placement précis des échantillons dans la zone de dépôt (flat zone) ;
- Le temps nécessaire max à l'opérateur pour passer d'un format de substrat à un autre ;
- Le flux laminaire horizontal proposé ;
- Les nacelles proposées (nombre, type de quartz).

3.2 Configuration

La configuration des fours atmosphériques sera la suivante :

- Tube 1 supérieur : oxydation sèche / humide à **1100°C avec steamer. Trans-LC ou DCE (source liquide)** demandé en PSE obligatoire. **Recuit jusqu'à 1300°C**. Tube en SiC demandé en PSE facultative ;

- Tube2 intermédiaire : oxydation sèche / humide à **1100°C avec torche. Trans-LC ou DCE (source liquide)** demandé en PSE obligatoire. **Recuit jusqu'à 1300°C**. Tube en SiC demandé en PSE facultative.

La configuration du four de dépôt LPCVD sera la suivante :

- Tube 3 inférieur : nitrure de silicium (Si_3N_4 et Si_xN_y faiblement contraint) à 800°C avec **contre-tube (quartz liner)**.

Le système devra inclure la fourniture des éléments suivants :

- 3 tubes **quartz** au diamètre adéquat pour le traitement de substrats en silicium de diamètre 100mm en standard et 150 mm maximum intégrant l'arrivée des gaz et le positionnement de la canne de thermocouples internes ;
- **2 contre-tubes (quartz liner) minimum** pour le tube 3 LPCVD ;
- Les dispositifs nécessaires à la mise sous vide et le contrôle du vide du tube 3 LPCVD ;
- Pour le circuit de vide du tube 3 LPCVD, tous les éléments compris entre le bâti et la pompe devront être fournis (tombacs, joints, raccords, pièges si nécessaire) ;
- 3 cannes en **quartz** pour la mise en place de thermocouples internes 3 points ;
- 3 jeux d'écrans (diffuseur et isolant thermique) en quartz si nécessaire ;
- 3 portes en **quartz**.

Après la livraison, le titulaire devra également **fournir les plans côtés** de tous les éléments en quartz.

Le candidat décrira dans son offre :

- Les tubes proposés avec en particulier les diamètres, les épaisseurs, le type de quartz, la température max de process conseillée et le design ;
- La température maximum pour les opérations d'oxydation longue durée (> 10 heures) avec torche tube 1 et steamer tube 2 ;
- Les contre-tubes (liner) proposés pour le tube 3 LPCVD nombre, épaisseur, le type de quartz et le design ;
- Les cannes pour la mise en place des thermocouples ;
- Les jeux d'écrans thermiques (diffuseur et isolant) ;
- Les portes.

3.3 Éléments chauffants pour les 3 tubes

La partie thermique (éléments chauffants) comprendra des éléments chauffants à 3 zones de chauffe, assurant une **zone plate (flat zone) de dépôt supérieure ou égale à 300mm à +/- 1°C** garantissant **l'homogénéité des épaisseurs obtenues sur 50 substrats**. Pour chaque élément chauffant, le contrôle de température sera assuré au moyen de 3 thermocouples de régulation et 3 thermocouples de sécurité. **Les éléments chauffants des tubes 1 et 2, supérieur et intermédiaire, devront permettre les croissances à 1100°C et des recuits à 1300°C** pour de futures utilisations avec des tubes en SiC. Le système sera équipé des blocs de puissance nécessaires associés aux contrôleurs de procédés afin d'assurer la régulation de température en mode PID ou cascade.

L'équipement devra être équipé d'un système de contrôle de la température de la partie thermique (ventilateurs, refroidissement à l'eau...) afin d'éviter les perturbations thermiques entre les tubes et l'augmentation de température de l'environnement proche des locaux techniques. L'ensemble pourra également être connectable à une extraction de chaleur.

Les caractéristiques thermiques générales demandées **pour les 3 tubes** sont les suivantes :

- Température de standby entre 550°C-700°C ;
- Contrôle de la température lors des procédés à $\pm 1^\circ\text{C}$;
- Contrôle de la température en mode profil temps réel ou à partir de tables de profils de température ;
- Montée en température ajustable $\geq 10^\circ\text{C}/\text{min}$ de la température de veille (stand-by) à la température de procédé ;
- Descente en température ajustable de la température de procédé à la température de standby, $\geq 3^\circ\text{C}/\text{min}$;
- Zone plate (flat zone) $\geq 300\text{mm}$.

Les caractéristiques thermiques spécifiques demandées **pour chaque tube** sont les suivantes :

- Tube 1 et 2 supérieur et intermédiaire
 - Température de **croissance 1100°C** ;
 - Température de **recuit jusqu'à 1300°C** pour de futures utilisations avec des tubes en SiC.
- Tube 3 inférieur
 - Température de **dépôt 800°C**.

Le candidat décrira dans son offre :

- Les éléments chauffants proposés pour chacun des 3 tubes ;
- Les températures de veille (stand-by) conseillées pour chaque tube ;
- La longueur de la zone plate de croissance et dépôt (flat zone) garantie et la précision de température dans la zone plate (flat zone) pour chaque tube ;
- La gamme des vitesses de montée et descente en température ;
- Les thermocouples proposés ;
- Le contrôle de température de la partie thermique pour limiter les perturbations thermiques entre les tubes et l'augmentation de température de l'environnement proche dans les locaux techniques.

3.4 Gaz de procédés, torche externe et steamer

La configuration demandée est la suivante :

- Tube 1 supérieur : N_2 , O_2 , **steamer** de type RASIRC ou équivalent et le tube devra pouvoir être équipé de **Trans-LC ou DCE** (source liquide) demandé en PSE 2 obligatoire ;
- Tube 2 intermédiaire : N_2 , O_2 , H_2 , **torche externe** et le tube devra pouvoir être équipé de **Trans-LC ou DCE** (source liquide) demandé en PSE 2 obligatoire ;
- Tube 3 inférieur : N_2 , SiH_2Cl_2 , NH_3 , Gaz sup. Une distribution de gaz supplémentaire non attribuée devra être prévue sur le panneau du tube 3 afin de permettre plus tard l'ajout d'un nouveau gaz de procédé (pour l'oxynitride par exemple).

Les caractéristiques générales demandées **pour les 3 tubes** sont les suivantes :

L'extraction des gaz de purge sera assurée par une cheminée en acier inox 316L reliée à 3 extractions (scavengers) indépendantes avec registre réglable.

Les panneaux de gaz (N_2 , O_2 , H_2 , NH_3 , SiH_2Cl_2 , gaz sup) pour les 3 tubes seront intégrés à l'équipement, ils seront équipés de régulateurs, manomètres, filtres et vannes d'isolement. La distribution de chaque gaz comprendra les éléments nécessaires au fonctionnement optimal de l'équipement pour les procédés demandés, elle inclura des débitmètres massiques numériques et des vannes pneumatiques qui seront pilotés par le contrôleur de procédés. Tous les composants seront en acier inoxydable électropoli 316 L Ra : 0.2 micron, les raccords seront de type VCR et les soudures sont réalisées en TIG orbital (UHP piping). Les panneaux de gaz devront permettre le changement rapide de composants défectueux. Ils devront, comme l'ensemble des parties de l'équipement, posséder toute la signalétique nécessaire à la bonne compréhension du fonctionnement et à la sécurité des personnels utilisateurs ou en charge de la maintenance.

La réponse devra tenir compte de la configuration du réseau de distribution des gaz de la salle blanche de l'IEMN qui se fait principalement par le plafond.

Les caractéristiques spécifiques demandées **pour chaque tube** sont les suivantes :

- **Pour le tube 1 : la vapeur d'eau sera produite par un système steamer** (de type RASIRC ou équivalent) pouvant générer la vapeur à partir du réseau d'eau dé-ionisée (Eau DI) de la salle blanche de l'IEMN. **Les procédés de croissance se feront à 1100°C.** Le système devra permettre de produire en continu et sans intervention humaine, pendant une durée de 40 à 50 heures, la vapeur d'eau avec les pressions et débits adaptés au diamètre du tube en quartz. Le système devra être pourvu des organes permettant de garantir la pureté de l'eau DI même après une période de non utilisation (filtration, purge, etc.) ;
- **Pour le tube 2 : la vapeur d'eau sera produite par une torche externe** reliée au tube en quartz. **Les procédés de croissance se feront à 1100°C.**

La torche externe sera composée de :

- Une ampoule en quartz,
- Un Injecteur quartz H_2/O_2 ,
- Un mini four tubulaire,
- Un système de contrôle et de régulation de la température du four,
- Un détecteur de flamme permettant une utilisation sécurisée,
- Les éléments de raccordement aux lignes des gaz et au tube en quartz,
- **Pour le tube 3 : la ligne de gaz SiH_2Cl_2 devra être la plus courte possible** afin d'éviter la condensation. Une solution avec **le cabinet de gaz SiH_2Cl_2 intégré ou accolé à la machine de dépôt est demandée.**

Le candidat décrira dans son offre :

- Les solutions proposées pour le cabinet de gaz SiH_2Cl_2 (fourniture, intégration/accolage à l'équipement) et la distribution de ce gaz afin d'éviter la condensation ;
- L'adaptation de la position du panneau de gaz dans l'équipement par rapport au réseau de gaz IEMN circulant principalement par le plafond ;

- Le nombre maximum de lignes de gaz autorisées dans le panneau de gaz intégré à l'équipement, dans le cas où une ligne de gaz supplémentaire serait ajoutée ultérieurement ;
- Le steamer proposé pour les procédés de croissance à 1100°C (éléments constitutifs, adaptation au réseau EDI de l'IEMN, durée de production en continue sans intervention humaine, pureté de la production) ;
- La torche externe proposée pour les procédés de croissance à 1100°C (éléments constitutifs, matériaux, sécurité) ;
- Le débit de N₂ conseillé en mode veille (stand-by) ;
- Le design d'injection des gaz pour chaque tube ;
- Les spécifications et précautions à prendre en compte.

3.5 Système de pompage et circuit de vide

Le candidat devra proposer une **pompe à vide sèche** adaptée au tube dédié au dépôt de nitrure de silicium stœchiométrique et faiblement contraint LPCVD.

La pompe devra être pilotée par le système de supervision du four de dépôt LPCVD, la ventilation et l'ouverture du tube devra être possible sans arrêt du système de pompage. Dans tous les cas, la pression devra être mesurable de l'atmosphère au vide limite par un système de jauges adaptées, dont les spécifications seront précisées par le candidat dans son mémoire technique. **Si la pompe possède un mode éco, le candidat indiquera si le système proposé permet de basculer en mode éco en cas de veille prolongée (stand-by).**

Le circuit de vide devra inclure :

- Une vanne d'isolation pneumatique de type MKS ou équivalent,
- Une vanne de régulation de type MKS ou équivalent,
- Une vanne de pré-pompage pneumatique,
- Les canalisations du circuit de vide inox 316L et tombacs pour raccordement aux 3 pompes,
- Un piège froid ou à particules si nécessaire,
- Une soupape de surpression,
- Un circuit de balayage pompe,
- Un circuit de dilution effluent pompe,
- Capteurs de pression.

Les caractéristiques de vide demandées pour le tube 3 sont les suivantes :

- Vide limite dans le tube de procédé $\leq 10\text{mTorr}$;
- Taux de fuite $\leq 10\text{mTorr/minute}$.

Le candidat devra fournir dans son offre :

- La description de la pompe sèche proposée (débit de pompage, diamètre de l'orifice de pompage, refroidissement, balayage) ;
- S'il existe un programme de pompage économique et si le système de dépôt peut basculer dans le mode économique en cas de veille prolongée ;
- Le vide limite dans le tube de procédé et le taux de fuite ;
- La description du pilotage du système de pompage (vannes, jauges, ...) ;

- Les jauges utilisées pour mesurer la pression, et leurs emplacements ainsi que, si nécessaire, le moyen de protection utilisé lors des procédés ;
- La régulation utilisée.

3.6 Performances attendues pour les fours atmosphériques et LPCVD

Les caractéristiques et les performances ci-dessous devront être atteintes pour des **substrats en silicium de 150 mm**

- Performances fours atmosphérique APCVD – Tubes 1 et 2
 - Oxyde sec 100nm à 1100°C :
 - Uniformité sur un substrat <2%,
 - Uniformité de substrat à substrat sur une nacelle de 50 wafers <3%,
 - Uniformité de procédé à procédé de 50 wafers < 3%,
 - Oxyde humide avec torche épaisseur 300nm à 1100°C :
 - Uniformité sur un substrat <2%,
 - Uniformité de substrat à substrat sur une nacelle de 50 wafers <3%,
 - Uniformité de procédé à procédé de 50 wafers < 3%,
 - Oxyde humide avec steamer épaisseur 1µm à 1100°C :
 - Uniformité sur un substrat <3%,
 - Uniformité de substrat à substrat sur une nacelle de 50 wafers <3%,
 - Uniformité de procédé à procédé de 50 wafers < 3%.
- Performances four sous vide LPCVD – Tube 3
 - Nitrure de silicium stœchiométrique 100nm à 800°C :
 - Uniformité sur un substrat <3%,
 - Uniformité de substrat à substrat sur une nacelle de 50 wafers <3%,
 - Uniformité de procédé à procédé de 50 wafers < 4%,
 - Nitrure de silicium faiblement contraint (Low stress) <200MPa 100nm à 800°C :
 - Uniformité sur un substrat <3%,
 - Uniformité de substrat à substrat sur une nacelle de 50 wafers <3%,
 - Uniformité de procédé à procédé de 50 wafers < 4%,

Le candidat donnera dans son offre :

Pour les 5 matériaux suivants réalisés sur des **substrats silicium de 150 mm dans des nacelles de 50 wafers** :

- Oxyde de silicium sec 100nm à 1100°C,
- Oxyde de silicium humide avec torche épaisseur 300nm à 1100°C,
- Oxyde de silicium humide avec steamer épaisseur 1µm à 1100°C,
- Nitrure de silicium stœchiométrique 100nm à 800°C,
- Nitrure de silicium faiblement contraint (Low stress) <200MPa 100nm à 800°C.

Les valeurs suivantes :

- La non-uniformité à partir de la formule suivante $(e_{\max} - e_{\min}) / (2 \times e_{\text{moyenne}})$:
 - Pour un wafer placé au centre de la nacelle,
 - Pour 3 wafers placés en première position, au centre et en dernière position de la nacelle,

- Pour 3 dépôts consécutifs d'un wafer placé au centre de la nacelle,
- La plage de variation de l'indice de réfraction à 633nm pour 3 wafers placés en première position, au centre et en dernière position de la nacelle ;
- Les contraintes intrinsèques moyennes.

3.7 Système de pilotage, logiciels et interfaces

3.7.1 Fonctionnement

Le système de croissance et dépôt sera **supervisé par un ordinateur commun aux 3 tubes**. Si le système offre la flexibilité supplémentaire de gestion et visualisation complète des paramètres, des procédés et des sécurités par un terminal opérateur sur chaque tube, alors ce sera considéré comme un avantage.

L'ordinateur superviseur permettra l'édition de recettes, le téléchargement des recettes dans l'automate, la lecture des événements en temps réel ou différé et la gestion des tables de profil.

L'interface utilisateur du logiciel affichera distinctement les paramètres et les sous-ensembles constituant l'équipement grâce à un synoptique. Elle devra permettre une gestion simple de l'équipement et des procédés sur celui-ci.

Plusieurs profils d'utilisation devront être disponibles et éventuellement protégés par mot de passe ainsi qu'une **liste des droits modifiables par l'administrateur** en fonction des besoins.

L'IEMN demande au minimum les modes suivants :

- Un **mode "opérateur"**, dans lequel il sera possible d'effectuer les opérations de dépôt et d'oxydation (lancer des procédés à partir de recettes préexistantes, modification possible du temps de dépôt dans la recette), avec une interface simplifiée ;
- Un **mode "Maintenance/administrateur"**, dans lequel il sera possible d'agir sur tous les éléments de la machine, avec des synoptiques détaillés tout en conservant une interface conviviale (ouverture/fermeture des vannes, réglage des débits, lecture des jauges, puissance/intensité/tension des alimentations, etc.).

La création des recettes devra être simplifiée et clairement structurée et permettre d'enregistrer un nombre important de recettes différentes. **L'écriture des recettes pourra s'effectuer à partir de l'ordinateur de supervision en salle blanche ou également à partir d'un autre PC, à l'extérieur de la salle blanche**, toutes les licences nécessaires devront être fournies.

Afin d'assurer la meilleure traçabilité d'utilisation de la machine, le logiciel devra fournir **l'historique de passage** des plaques avec un rapport présentant au minimum la date, l'heure, le dépôt, les paramètres et l'accès à l'historique des défauts signalés sur les paramètres surveillés. L'historique devra pouvoir être exporté dans un format lisible sous Microsoft Excel. Le logiciel devra permettre de **visualiser le déclenchement d'alarme** à partir de données digitales et/ou analogiques correspondant aux paramètres cités ci-dessus ; également lors du franchissement des seuils de tolérances programmés ainsi que le déclenchement d'interlock (arrêt du programme en cours) en cas d'opération et/ou défaut pouvant mettre en jeu l'intégrité de l'équipement ou de l'opérateur.

En cas d'environnement Microsoft sur le PC, il sera impératif d'utiliser Windows 11 ou à défaut un Windows maintenu jusqu'en 2032 minimum (type Windows 10 IOT Entreprise LTSC 2021).

Le candidat donnera dans son offre :

- La configuration et les possibilités du système informatique de gestion de l'équipement (PC, environnement, dispositif de sauvegarde OS, profils de connexion) ;
- Les captures d'écrans des principales pages de contrôle (édition des recettes, synoptique de fonctionnement, journaux de log, maintenance, etc.).

3.7.2 Connexions

L'ordinateur de supervision devra permettre des **connexions à distance ponctuelles à des fins de maintenance**. Il devra permettre également une **connexion au réseau interne** de l'IEMN pour la récupération de données.

Pour faciliter les opérations de maintenance dans les doigts gris, **une connexion réseau sera ajoutée sur le système de dépôt du côté du local technique afin de permettre la duplication de l'écran de supervision** sur un PC portable fourni par l'IEMN.

3.7.3 Restauration du système

Le titulaire s'engage à fournir à l'IEMN, la procédure permettant le « back-up » complet des disques durs embarqués et le matériel nécessaire à la bonne application de celle-ci. Il formera le personnel de l'IEMN à cette procédure. Un back-up sera réalisé pour la réception.

3.7.4 Licences et mises à jour logiciels

Le titulaire s'engage à livrer avec l'équipement toutes les licences d'exploitation permettant son utilisation par l'IEMN. Il communiquera systématiquement à l'IEMN les modifications software (upgrade, nouvelles versions, correction de bugs, etc.) et les installera gratuitement pendant la période de garantie. Les modifications liées à une correction seront fournies et installées gratuitement.

3.8 Documentation

La documentation devra être fournie en français ou en anglais sous 2 formes : un exemplaire sur papier compatible salle blanche et un au format numérique (pdf).

La documentation comprendra au moins un manuel d'utilisation, un manuel de maintenance et les avertissements concernant les risques potentiels et les précautions à prendre.

3.9 Liste de recettes de croissance et dépôts

Le présent marché inclus la fourniture et l'installation des recettes de base pour chaque tube.

Il est demandé au candidat de fournir à la livraison de la machine **la liste suivante de dix (10) recettes minimum** :

- Tube 1 supérieur
 - Oxydation sèche 100nm à 1100°C sans Trans-LC ou DCE (source liquide),
 - Oxydation sèche 100nm à 1100°C avec Trans-LC ou DCE (source liquide),
 - Oxydation humide 300nm avec torche à 1100°C sans Trans-LC ou DCE,
 - Oxydation humide 300nm avec torche à 1100°C avec Trans-LC ou DCE,
- Tube 2 intermédiaire
 - Oxydation sèche 100nm à 1100°C sans Trans-LC ou DCE (source liquide),
 - Oxydation sèche 100nm à 1100°C avec Trans-LC ou DCE (source liquide),
 - Oxydation humide 1µm avec steamer à 1100°C sans Trans-LC ou DCE,

- Oxydation humide 1µm avec steamer à 1100°C avec Trans-LC ou DCE,
- Tube 3 inférieur
 - Dépôt de Nitrure de Silicium stœchiométrique de 100nm à 800°C,
 - Dépôt de Nitrure de Silicium faiblement contraint (Low stress) de 100nm à 800°C avec des contraintes inférieures à 200MPa.

Le titulaire pourra choisir les paramètres les plus adaptés (en dehors de la température de procédé qui est imposée) pour les procédés demandés. Le temps de dépôt et croissance des recettes devra être optimisé pour être le plus court possible tout en gardant un bon contrôle de l'épaisseur, de l'uniformité et de l'indice de réfraction. **Les performances des couches attendues sont indiquées au paragraphe 3.6.**

Dans le cas où le candidat dispose de recettes supplémentaires et de caractéristiques des couches, il pourra les ajouter.

Le candidat devra indiquer dans son offre :

- S'il est en capacité de fournir à la livraison de la machine les dix (10) recettes minimum demandées. S'il souhaite en donner plus, il le précisera ;
- **La consommation énergétique (en KW/h) du système au repos et durant un procédé standard de croissance de SiO₂ sec de 100 nm à 1100 °C ;**
- La description du service support process (nombre d'ingénieurs disponibles, mode de communication, échanges d'échantillons...) et l'accès proposé par l'équipementier à ce service (libre accès ou non, durée d'accès).

4 Livraison, Garantie, Maintenance, Formation, S.A.V

4.1 Livraison

L'équipement devra **obligatoirement être livré avec un camion muni d'un hayon**. L'IEMN **ne possède pas de chariot élévateur**.

Le titulaire devra obligatoirement venir repérer sur le site le trajet à parcourir du quai de livraison jusqu'au lieu d'implantation de la machine en salle blanche pour contrôler la largeur et hauteur des portes, les virages et l'encombrement des couloirs.

De manière générale, les équipements et l'ensemble de leurs périphériques devront être livrés propres et conditionnés de manière sérieuse et appropriée jusqu'à leurs emplacements dans la salle blanche de l'IEMN.

Les plateaux de transport, palettes et caisses d'emballage devront être adaptés aux poids et volumes des éléments afin d'assurer un transport sécurisé et éviter par la suite tout litige lié à un mauvais conditionnement.

Pour le cas particulier des équipements destinés à entrer dans les salles blanches, les exigences de propreté suivantes devront être appliquées :

- Nettoyage très soigné de tous les sous-ensembles avant expédition afin de supprimer toute trace de copeaux, d'hydrocarbures, graisses ou autre contaminant potentiel.
- Emballage de toutes les parties destinées à entrer en salle blanche sous double film afin de pouvoir procéder à un déballage progressif en emmenant un minimum de contamination particulière à l'intérieur de la salle blanche.
- De même, tous les emballages contenant la câblerie, les pièces détachées, les accessoires divers nécessaires à l'assemblage de l'équipement devront être compatibles

avec les salles blanches ; les matières qui s'apparentent à du bois, du carton, du papier traditionnel sont prohibées ; le titulaire fournira des contenants non contaminants.

Le candidat devra fournir dans son offre :

- L'évaluation de l'empreinte carbone liée à la fabrication de la machine et à sa livraison à l'IEMN.

4.2 Garantie

L'IEMN souhaite une garantie minimum de douze (12) mois, extensible en PSE facultative à douze (12) mois supplémentaires. Celle-ci comprendra le travail et les pièces détachées ainsi que les frais de transport, de déplacement et de séjour. Elle débutera à compter de la date d'admission définitive. La fin de garantie sera prononcée dans les conditions suivantes :

- Levée totale des réserves éventuellement émises à la réception.
- Pas d'anomalie détectée.
- Conformité aux spécifications sur cette période.

En cas d'anomalie, le titulaire devra prendre en charge la mise en conformité de l'équipement. Pour un fonctionnement non satisfaisant, c'est-à-dire avec arrêt des dépôts ou dépôts en mode dégradé, la période de garantie sera automatiquement prolongée d'une durée équivalente aux dysfonctionnements constatés.

Une maintenance préventive sera prévue le dernier mois de la période de garantie.

Le candidat devra indiquer dans son offre :

- Le temps de réponse durant la garantie après réception d'un e-mail,
- Le nombre d'ingénieurs disponibles en France et à l'étranger pour la maintenance,
- Le nombre d'ingénieurs disponibles en France et à l'étranger pour le support process,
- Le délai d'intervention sur site après notification.

4.3 Formation

Une formation de cinq jours minimum, comprenant une formation théorique d'au moins une journée pour 3 personnes et une formation pratique de quatre jours pour 3 personnes sera incluse dans les prestations dues. La formation théorique pourra être effectuée à une autre période que la formation pratique. La formation pratique devra avoir lieu sur le site de l'IEMN lors de la mise en service de la machine. Une journée de la formation pratique sera notamment axée sur la maintenance de base et la maintenance avancée. Les dates seront fixées d'un commun accord entre l'IEMN et le titulaire.

La formation aura pour objectif l'acquisition de connaissances théoriques générales sur l'AP-LPCVD, et de connaissances relatives aux procédures élémentaires d'utilisation, d'élaboration de procédés, de maintenance et de sécurité du matériel.

Un support numérique de la formation théorique en français ou en anglais devra être fourni à l'issue de la formation.

4.4 Pièces détachées

Pendant la période de garantie, le titulaire maintiendra, sous sa responsabilité, un stock disponible de pièces détachées pour la maintenance. Si le titulaire fournit des pièces détachées supplémentaires avec la machine, il devra en communiquer la liste.

Un kit de maintenance comportant des pièces importantes et/ou des consommables est demandé en PSE facultative.

4.5 Service après-vente hors garantie

Le candidat ne devra pas intégrer sur l'équipement de matériels structurels et électroniques en fin de série.

Le titulaire s'engage à être en mesure d'assurer la maintenance préventive et corrective de l'équipement et ce, pendant une durée minimum de 10 ans.

Le candidat devra indiquer dans son offre :

- Le temps de réponse après réception d'un e-mail,
- Le nombre d'ingénieurs disponibles en France pour la maintenance,
- Le nombre d'ingénieurs disponibles en France et à l'étranger pour le support process,
- Le délai d'intervention sur site après notification,
- Le candidat indiquera également la disponibilité des pièces détachées et les délais d'approvisionnement en cas d'urgence.

5 Vérification et réception des prestations

5.1 Réception provisoire en usine

L'IEMN demande à réaliser en présentiel dans l'usine du candidat, les tests listés dans le tableau ci-dessous pour valider la réception du système avant livraison :

	Procédure	Valeur attendue
Documentation		
Documentation (guide utilisateur, manuel maintenance, notice sécurité...)	En français ou en anglais, en support papier salle blanche et en support numérique.	Présente
Station de chargement		
Chargement/déchargement	Transfert d'une nacelle de 100 mm de Si de la station à la zone de croissance/dépôt dans le tube. Répétition de 2 cycles de chargement/déchargement pour chaque tube.	2 cycles fonctionnels par tube
Flux laminaire horizontal	Présence du flux laminaire et contrôle visuel des paramètres de fonctionnement.	Présent et visualisation des paramètres sur logiciel
Vide		

Ventilation / Pompage	Ventilation et pompage du tube 3.	Fonctionnel
Gaz		
Balayage N ₂	Présence du balayage N2 sur les 3 tubes	Fonctionnel
Température (si possible)		
Chauffage	Montée à 800°C sur les tubes atmosphérique et LPCVD (ou une autre température jugée plus adaptée)	Températures atteintes
Arrêt d'urgence		
Bouton arrêt d'urgence	Présence des boutons d'arrêt d'urgence	Arrêt d'urgence fonctionnel
Logiciel		
Affichage	Lecture des consignes et valeurs en temps réel des paramètres suivants : -Débits des gaz, -Température, -Pression dans le tube LPCVD	Affichage présent et fonctionnel
Profil utilisateur	Connexion aux profils « utilisateur » et « administrateur/maintenance » et contrôle des droits pour chaque profil. Droits « utilisateur » réduits et droits « administrateur/maintenance » très élargis	Profils existants et droits différents
Recettes		
Liste de recettes	Lecture des dix (10) recettes demandées dans le logiciel	Présentes
Pièces		
Ecrans, centreurs, nacelles, contre-tubes	Pour chaque tube, contrôle de l'existence de toutes les pièces nécessaires à l'obtention de croissance et dépôt uniforme (écrans, centreurs), des nacelles pour les 4 tailles de substrats (50mm, 76mm, 100mm, 150mm), les nacelles avec encoches tiltées, 2 contre-tubes pour la LPCVD	Pièces présentes

Si le candidat n'autorise pas le contrôle en présentiel dans l'usine ou que certaines étapes du contrôle ne peuvent pas être réalisées, alors il devra le préciser dans l'offre.

Le candidat devra indiquer dans son offre :

- Si la réception usine en présentiel est autorisée ou si elle se fait selon un autre mode par exemple en visio ;
- Quelles sont les demandes de contrôle listées dans le tableau ci-dessus qui ne peuvent pas être effectuées et la raison invoquée.

5.2 Vérification d'aptitude et réception définitive

Pour la réception définitive, l'équipement sera testé dans les locaux de l'IEMN avec le candidat sur les points suivants :

- Chargement/déchargement motorisé des nacelles ;
- Réglage du flux laminaire ;
- Librairie avec au minimum des dix (10) recettes demandées ;
- Les tests de croissance/dépôt sur Si 150mm à partir des recettes ci-dessous :

Matériau et recette demandée	Température	Gamme d'épaisseur requise	Propriétés demandées	
			Gamme de contraintes	Autres propriétés désirées
SiO ₂ humide avec torche + trans LC/DCE (si option prise)	1100 °C	300nm	Compression	Indice de réfraction à 633nm
SiO ₂ humide avec steamer + trans LC/DCE (si option prise)	1100 °C	1µm	Compression	Indice de réfraction à 633nm
SiO ₂ Sec dans le tube atmosphérique 1	1100°C	100nm	Compression	Indice de réfraction à 633nm
SiO ₂ Sec dans le tube atmosphérique 2	1100°C	100nm	Compression	Indice de réfraction à 633nm
Si ₃ N ₄	800°C	100nm	Tension	Indice de réfraction à 633nm
Si _x N _y LS	800 °C	100nm	Tension < 200 MPa	Indice de réfraction à 633nm

- Les analyses des tests de croissance/dépôt du tableau ci-dessus :
 - La non-uniformité de l'épaisseur sur un substrat de 150 mm sera calculée selon la formule $[(e_{\max} - e_{\min}) / (2 \times e_{\text{moyenne}})]$. 17 points de mesures par ellipsométrie seront réalisés en excluant 5 mm à partir du bord du substrat. Ces points seront positionnés sur les axes verticaux et horizontaux du substrat (par rapport à l'orientation du méplat principal),
 - Pour le calcul de la non-uniformité entre substrats 150mm, une mesure au centre de chaque substrat sera réalisée pour 3 substrats d'un même procédé placés au début, au centre et à la fin d'une même nacelle,
 - Pour le calcul de la non-uniformité entre procédés, une mesure au centre du substrat placé au centre de la nacelle sera réalisée pour 3 procédés identiques consécutifs,
 - Le calcul des contraintes sera effectué avec la méthode du rayon de courbure par profilométrie mécanique,
 - Le contrôle de l'indice de réfraction à 633nm sera effectué par ellipsométrie,
- Les performances attendues selon les matériaux seront celles indiquées au paragraphe.

L'IEMN se réserve le droit de tester l'équipement, les recettes demandées dans le paragraphe 3.9, ainsi que d'analyser les couches **pendant une durée de quatre (4) semaines** à compter de la date de mise en service sur le site **avant de prononcer l'acceptance définitive**. Ces tests sans la présence du candidat porteront sur :

- La variabilité entre plaques et entre dépôts (runs) ;
- Les mesures des contraintes.

6 Prestations supplémentaires éventuelles (PSE) facultatives et obligatoires

Le candidat devra décrire précisément les caractéristiques des PSE facultatives et obligatoires demandées et le prix pour chaque prestation supplémentaire éventuelle. L'absence de des prestations supplémentaires éventuelles obligatoires dans l'offre d'un candidat rend cette dernière irrégulière et, en conséquence, impose son rejet.

6.1 Tube et nacelles en SiC (PSE facultative)

Dans le cas de futurs recuits jusqu'à 1300°C **sur le tube 1 supérieur**, en PSE facultative le candidat proposera **un ensemble de tube et nacelles** pour une capacité de **50 wafers de 100mm en standard mais pouvant varier de 50mm à 150mm**.

6.2 Trans-LC ou DCE (PSE obligatoire)

La distribution de Trans-LC ou DCE est assurée par bullage d'azote dans un bulleur (bubbler) quartz pour source liquide à base de chlore. Le système sera composé de :

- Un débitmètre massique N₂ ;
- Une vanne pneumatique associée ;
- Un clapet anti-retour ;
- Un système de régulation de température de la source liquide ;
- Une vanne pneumatique d'injection ;
- L'injection de vapeur est assurée par tuyauterie et composants en PFA.

Les sources liquides (consommables) seront fournies par l'IEMN.

Le candidat décrira dans son offre :

- Le bulleur (bubbler) proposé (capacité, qualité) et les éléments qui le composent (débitmètre, vanne, clapet, régulation).

6.3 Extension de garantie (PSE facultative)

La garantie initiale d'un an pourra être étendue d'une durée de douze (12) mois supplémentaires.

6.4 Kit de maintenance (PSE facultative)

Le candidat proposera un kit de maintenance rapide avec la liste des pièces de rechange proposées.

6.5 Contrat de maintenance (PSE facultative)

En PSE facultative, le candidat proposera un contrat de maintenance d'une durée de douze (12) mois pour la période au-delà de la garantie, avec des délais d'intervention au maximum de trois (3) semaines. Le contrat apparaîtra dans le mémoire technique, décrit de façon précise avec les

coûts annuels. Les conditions de mise à jour du logiciel de l'équipement devront faire partie du contrat. Afin que l'IEMN optimise l'utilisation du contrat de maintenance, le candidat devra proposer un nombre annuel de jours d'intervention utilisables sur l'équipement décrit dans ce CCTP.

7 Devis

Le candidat présentera un devis détaillé incluant obligatoirement le système de base décrit dans ce CCTP au paragraphe 3 et les PSE obligatoires et facultatives décrites au paragraphe 6. Si les contraintes du site nécessitent de démonter différentes parties du système afin de pouvoir effectuer le trajet de livraison jusqu'à sa localisation en salle blanche, le devis devra l'inclure.