

## **Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP)**

**Acquisition d'une plateforme automatisée pour la  
synthèse, la caractérisation et le vieillissement de  
nouvelles technologies de cellules solaires à base de  
pérovskites**

Marché public de fourniture établi conformément au code de la commande publique



Le présent CCTP comporte 10 pages

## Sommaire

1.	Objet du marché public – Dispositions générales .....	3
1.1.	Objet du marché public .....	3
1.2.	Décomposition du marché public .....	3
2.	Robot de fabrication - Prestations attendues et conditions d'exécution du marché .....	4
2.1.	Contexte général et objectifs de l'acquisition .....	4
2.2.	Caractéristiques et exigences techniques .....	4
2.3.	Prestations supplémentaires éventuelles (PSE) .....	5
2.4.	Formation .....	6
2.6.	Livraison et délais d'exécution .....	6
2.7.	Opération de vérification et tests d'essais .....	7
3.	Système de caractérisation optique - Prestations attendues et conditions d'exécution du marché .....	8
3.1.	Contexte général et objectifs de l'acquisition .....	8
3.2.	Caractéristiques et exigences techniques .....	8
3.3.	Prestations supplémentaires éventuelles (PSE) .....	9
3.4.	Formation .....	9
3.5.	Livraison et délais d'exécution .....	10
3.6.	Opération de vérification et tests d'essais .....	10

## 1. Objet du marché public – Dispositions générales

### 1.1. Objet du marché public

Le présent marché public concerne l'acquisition d'une plateforme automatisée pour la synthèse, la caractérisation et le vieillissement de nouvelles technologies de cellules solaires à base de pérovskites.

L'*Institut Photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF)* est un centre de recherche de pointe dédié à l'innovation dans le domaine de l'énergie solaire. Il rassemble des partenaires académiques et industriels pour accélérer le développement de technologies photovoltaïques de nouvelle génération, en particulier les cellules solaires à haut rendement et faible impact environnemental. Le projet MATCH-UP, porté par Institut Photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF), UMR 9006, CNRS, Ecole Polytechnique - IP Paris, Chimie Paristech – PSL à Palaiseau, cible la découverte de matériaux émergents et l'étude de leurs interfaces dans des dispositifs photovoltaïques avancés. Il joue un rôle clé dans le développement de cellules solaires multijonctions à haut rendement et stabilité renforcée.

Ce marché s'inscrit dans le cadre du projet PEPR (Programmes et équipements prioritaires de recherche) DIADEM « MATCH-UP » : Découverte de MATériaux pour le next-gen photovoltaïque par synthèse et Caractérisation à HaUt débit, et l'analyse Par intelligence artificielle.

Les spécifications techniques figurent aux articles 2 et 3 du présent CCTP.

### 1.2. Décomposition du marché public

Le présent marché public est divisé en deux lots :

- Robot de fabrication
- Système de caractérisation optique

Chaque module – robot de fabrication et système de caractérisation optique – sera initialement assemblé de manière autonome par le fournisseur correspondant. Il reviendra au titulaire du lot 1 de mettre en place une solution d'interfaçage logicielle et matérielle pour connecter ces modules (Robot et système de caractérisation) dans le cadre d'une plateforme automatisée cohérente, capable d'exécuter les protocoles de manière séquentielle ou coordonnée. L'interface s'appuiera sur un bras robotisé, conçu pour transférer automatiquement les échantillons d'un module à l'autre avec une haute précision et répétabilité, tout en préservant leur intégrité physique pendant la manipulation. La conception modulaire du système permettra d'adapter ou de faire évoluer chaque composant en fonction des besoins expérimentaux ou des avancées techniques, tout en assurant une continuité fluide entre les différentes étapes du processus.

## 2. Robot de fabrication - Prestations attendues et conditions d'exécution du marché

### 2.1. Contexte général et objectifs de l'acquisition

L'acquisition d'une plateforme robotisée pour la synthèse de cellules pérovskites s'inscrit dans un contexte de recherche et développement visant à améliorer les performances et la fiabilité des technologies photovoltaïques de nouvelle génération. L'objectif principal est d'automatiser les processus de fabrication, de traitement et de caractérisation des cellules pérovskites, permettant ainsi de réduire les erreurs humaines, d'augmenter la reproductibilité des expérimentations et d'accélérer les cycles de développement, grâce à une gestion optimale des différents paramètres influençant les performances des cellules. Ceci favorisera la standardisation des procédés, la réduction des coûts de production et la mise en place de processus reproductibles, en vue de soutenir l'industrialisation des cellules pérovskites.

### 2.2. Caractéristiques et exigences techniques

Le robot de synthèse doit consister d'un bras robotisé avec un module de pipetage automatique et un préhenseur monté sur une plateforme pour le positionnement de matériel de laboratoire et d'instruments. Le système doit être capable de traiter plusieurs échantillons avec plusieurs couches par cycle.

Ce robot doit incorporer un module de pipetage avec une capacité allant jusqu'à 1 ml, ainsi qu'un module de haute précision (< 3.5%) adapté à une large gamme de solvants et d'encres.

Il doit également intégrer un module de préhension électronique pour le transport de substrats et de couvercles de flacons.

Le système devra également intégrer le quenching de solvant pour les pérovskites, avec une pompe seringue contrôlée par ordinateur pour l'injection d'antisolvant. Il devra en outre permettre le quenching sous vide grâce à une chambre à vide adaptée à la taille des substrats, dans laquelle l'échantillon est déplacé automatiquement par le robot, qui referme ensuite la chambre. Cette chambre devra permettre un quenching sous vide immédiat. À titre indicatif, un temps de mise sous vide permettant d'atteindre une pression de l'ordre de 10 Pa en 10 secondes est visé. La chambre devra être équipée d'une ouverture pneumatique, connectée à un réservoir de vide, lui-même relié à une pompe à vide dont le corps de pompe devra être conforme à la norme ATEX.

Le système doit disposer d'un logiciel basé sur Python, permettant de configurer des expériences, d'enregistrer et charger des expériences précédentes et de contrôler la variation des paramètres clés suivants : la vitesse de rotation, la température de recuit, la quantité d'encre et le mode de distribution de l'encre par substrat.

Le robot doit être livré en tant qu'élément d'une plateforme équipée d'un plateau standard comprenant :

- Le bras permettant la prise et le transfert automatisé des échantillons. Ceci doit se faire uniquement par les bords, sans aucun contact avec la surface active ou fonctionnelle des cellules. Le système doit pouvoir manipuler des substrats de dimensions comprises entre 15 mm × 15 mm et 25 mm × 25 mm, avec une épaisseur comprise entre 1,1 mm à 3,2 mm.

- Au moins trois piles de supports de substrats, chacun pouvant contenir au moins 8 porte-substrats et conçus pour une manipulation robotisée par le bras, avec une conception permettant l'ajout de piles supplémentaires à l'avenir si besoin.
- 2 racks de pointes de pipette jusqu'à 1000 µl avec au moins 90 pointes chacun.
- Une poubelle avec un couvercle conçu pour une manipulation robotisée par le bras.

La plateforme robotique doit pouvoir intégrer au moins deux spin coaters entièrement automatisés, avec une vitesse de rotation entre 0 et 10 000 rpm et une précision de  $\pm 1$  % pour l'enduction centrifuge. Chaque spin coater devra être équipé d'une pompe à vide avec séparateur de solvant, ainsi que des tuyaux, connecteurs et d'une intégration complète au logiciel du robot.

Elle doit également comporter au moins 2 stations de recuit de substrats entièrement automatisées et compatibles avec le robot, permettant une montée en température jusqu'à 310 °C. Le système doit inclure une pince capable de fonctionner à haute température et offrir un espace suffisant pour traiter plusieurs substrats par cycle, avec une plaque adaptatrice/homogénéisatrice assurant une homogénéité thermique avec un écart de température inférieur ou égal à  $\pm 2$  °C à 100 °C.

Elle doit également intégrer une chambre de traitement des substrats close qui se ferme automatiquement.

L'interfaçage entre le robot de fabrication (lot 1) et le système de caractérisation optique (lot 2) devra être conçu et mis en œuvre par le titulaire du lot 1. Cette prestation inclura la conception et l'intégration d'un bras robotisé chargé de transférer automatiquement les échantillons entre les deux modules tout en préservant leur intégrité avec une précision supérieure ou égale à  $\pm 25$  µm. Sur le plan mécanique, le bras devra s'adapter aux contraintes d'intégration physique des deux modules, garantissant un positionnement précis et un transfert fiable des échantillons. Sur le plan logiciel, une interface de communication développée en Python devra permettre l'échange d'instructions et d'états entre les équipements, assurant la synchronisation fluide et automatisée des séquences de fabrication et de caractérisation. Les spécifications techniques du système de caractérisation sont détaillées à l'article 3.2 du CCTP. Les informations complémentaires nécessaires à la conception précise du bras robotisé (dimensions, positionnement ou autres informations jugées utiles) seront transmises par l'IPVF au titulaire du lot 1 après notification du marché.

Exigences de conformité et de certification :

- Marquage CE pour la conformité aux normes de sécurité et de performance

Garantie et support après-vente :

- Période de garantie minimale de deux ans
- Support technique après-vente à distance et/ou sur site

### 2.3. Prestations supplémentaires éventuelles (PSE)

Les 7 PSE suivantes sont proposées à titre facultatif :

1. Un kit d'intégration pour une enceinte environnementale ou boîte à gants dans laquelle le robot sera positionné, avec une plaque de passage pour le routage de tous les câbles entre l'armoire électrique située à l'extérieur.
2. Une chambre climatique équipée d'un simulateur solaire pour permettre le vieillissement accéléré de cellules pérovskites sous conditions environnementales contrôlées. Cette solution offrira un contrôle précis de la température (intervalle entre -20 °C et 90 °C) et de l'humidité

(intervalle entre 0% et 90%), associé à un simulateur solaire haute puissance couvrant un spectre large (UV à IR), avec un contrôle indépendant des différentes bandes spectrales. Une interface API Python permettra l'intégration à la plateforme robotisée existante, avec un pilotage coordonné des tests et une collecte centralisée des données. Des adaptations matérielles permettant de charger les échantillons individuellement ou en lot à l'aide d'un support dédié doivent également être fournies pour une automatisation complète.

3. Un module de chauffage pour la chambre de traitement des substrats.
4. Un système de traitement sous vide pour la chambre de traitement des substrats.
5. Un module de traitement UV-Ozone pour la chambre de traitement des substrats.
6. Un module de traitement par plasma atmosphérique pour la chambre de traitement des substrats.
7. Une station photo équipée d'une caméra de 10 MP ou plus capable de capturer des substrats jusqu'à 50 mm × 50 mm, avec un porte-échantillon inclinable permettant un alignement vertical précis avec la caméra, un éclairage avant et arrière assurant une visibilité optimale du substrat, et une capacité d'intégration aux tâches de reconnaissance d'images.

## 2.4. Formation

Le titulaire effectue à l'installation une formation à l'utilisation de l'instrument et du logiciel, telle que décrite dans son offre. Une formation à l'utilisation de l'équipement et des logiciels associés sera dispensée en présentiel lors de l'installation, incluant une présentation détaillée des fonctionnalités, la remise de supports pédagogiques (guides, fichiers types) et, si nécessaire, des sessions de suivi ou de clarification.

## 2.5. Opération de vérification et tests d'usine

Afin de garantir la conformité et la performance du système, des tests seront réalisés en usine en présence de membres du personnel de l'IPVF :

- Vérification de la présence de l'ensemble des composantes à livrer
- Test du spincoater : réalisation du spincoating pour chaque spincoater à trois vitesses distinctes réparties dans l'intervalle de fonctionnement spécifié (0 - 10 000 rpm)
- Test du solvant quenching : application du quenching liquide sur substrat avec trois temps d'application différents compris dans la plage de fonctionnement cible (15 - 22 s)
- Test du vacuum quenching : réalisation du quenching sous vide sur trois durées distinctes comprises dans la plage de fonctionnement cible (15 - 22 s)
- Vérification de l'enchaînement automatique des différentes étapes de fabrication et l'exécution d'un protocole complet via l'interface graphique ou l'API

A l'issue de ces tests, un rapport de tests devra être produit par le titulaire et validé par l'IPVF.

## 2.6. Livraison et délais d'exécution

A l'issue des tests en usine, un rapport de tests en usine ainsi que des documents logistiques et techniques prouvant l'achèvement de la fabrication de l'équipement devront être transmis pour validation par l'IPVF en amont de l'expédition. **Un bon d'enlèvement signé par le titulaire et l'IPVF validera l'envoi de l'équipement.** Les fournitures seront livrées et les prestations exécutées à l'adresse suivante :

L'équipement, devra être livré, installé, mis en service, avec une prestation d'interfaçage avec le Système de caractérisation optique du lot 2, et avec une formation à l'utilisation de l'équipement dans un délai de **12 mois maximum** à compter de la notification du marché.

## 2.7. Opération de vérification et tests d'essais

Dans un délai de **15 jours** suivant la formation, le titulaire procédera en compagnie du personnel de l'IPVF à une série d'opérations de vérification et d'essais destinés à valider le bon fonctionnement de l'équipement en conditions réelles. Ces vérifications incluront le contrôle de la conformité des éléments livrés, l'intégration physique et logicielle au sein de la plateforme, ainsi que les systèmes de sécurité associés.

Des essais fonctionnels porteront notamment sur :

- L'exécution complète et reproductible d'un protocole via l'interface graphique ou l'API
- L'enchaînement automatique des étapes de fabrication, y compris le transfert des échantillons entre les étapes intermédiaires, ainsi que leur chargement et déchargement automatisé dans le système de caractérisation par bras robotisé
- Le cas échéant, les plages et la stabilité des paramètres environnementaux (température, humidité, spectre) pour les chambres de traitement de substrat et l'enceinte climatique pour vieillissement
- Le suivi et export des données de chaque étape
- La conformité aux exigences de sécurité pour l'utilisateur et pour l'environnement de travail

A l'issue de ces essais, un rapport sera remis et soumis à validation par l'IPVF. L'approbation de ce rapport vaudra validation définitive de l'équipement.

### 3. Système de caractérisation optique - Prestations attendues et conditions d'exécution du marché

#### 3.1. Contexte général et objectifs de l'acquisition

Afin de garantir la qualité et la performance des cellules pérovskites fabriquées, il est primordial de procéder à des caractérisations approfondies, aussi bien sur le plan optique qu'électrique. Ces mesures offriront des informations cruciales concernant les caractéristiques des matériaux, telles que l'absorption, la photoluminescence et l'efficacité, permettant ainsi de mieux comprendre l'impact des procédés de fabrication. L'intégration de la modélisation avancée et de l'intelligence artificielle dans cette approche permettra d'analyser et de prédire les propriétés des matériaux, tout en établissant des liens avec les processus de fabrication pour guider leur optimisation. En produisant des données expérimentales fiables et reproductibles, cette approche permettra aussi de mettre en place un réseau européen de partage d'informations, favorisant ainsi la collaboration et l'échange de savoir-faire, et contribuant aux progrès dans le domaine des technologies solaires.

#### 3.2. Caractéristiques et exigences techniques

Le système visé est une solution complète de caractérisation optique, capable de réaliser l'analyse simultanée et automatisée de plusieurs propriétés optiques des matériaux à l'aide d'un seul dispositif, pour les échantillons fabriqués par le robot à haut débit.

La solution devra inclure les personnalisations matérielles nécessaires à cet effet, telles qu'un couvercle coulissant ou doté d'un orifice d'accès, afin de permettre le transfert automatisé des échantillons par le bras robotisé d'interfaçage conçu par le titulaire du lot précédent. Le chargement/déchargement pourra se faire soit échantillon par échantillon, soit par lot via un porte-substrat, en cohérence avec les dimensions des substrats fabriqués par le robot de synthèse. Les informations complémentaires nécessaires à la conception de cette solution (dimensions des échantillons) seront transmises par l'IPVF au titulaire du lot 2 après notification du marché.

Le système attendu devra permettre l'analyse des propriétés optiques des matériaux à travers :

1. Un module de transmittance et réflectance totale avec :
  - une source lumineuse couvrant une plage de longueurs d'onde de 400 nm à au moins 950 nm
  - une plage de détection de 350 à 1050 nm
  - une résolution spectrale inférieure à 15 nm
  - une roue à filtre pilotée
2. Un module de photoluminescence spectrale (PL) avec :
  - une calibration photométrique à  $\pm 10\%$
  - une longueur d'onde d'excitation laser monochromatique comprise entre 400 et 800 nm
  - une plage de détection de 350 à 1050 nm
  - une résolution spectrale inférieure à 5 nm
  - un temps d'intégration de mesure par point réglable entre 100 ms et 10s
  - une densité de puissance optique du laser modulable sur plus plusieurs ordres de grandeur entre  $10 \text{ mW/cm}^2$  et  $10^3 \text{ mW/cm}^2$  pour une taille de spot entre 0.01 et 1 mm, avec illumination homogène
  - une roue à filtre pilotée sur la voie d'excitation et une autre sur la voie de détection



- La possibilité d'ajouter un beamsplitter sur chaque voie d'excitation et de détection, afin de permettre l'insertion d'une nouvelle source et d'un nouveau détecteur dans la chaîne de mesure, au moins en mode réflexion
- un système permettant de sélectionner les points où se font les mesures avec une précision de  $\pm 5 \mu\text{m}$

Les mesures doivent être sans contact, afin de suivre la qualité des matériaux ou de couches fonctionnelles à différents stades du procédé de fabrication.

Le système devra disposer d'une interface API basée sur Python pour assurer un pilotage fluide du matériel et une gestion du flux de données de la plateforme.

Garantie et support après-vente :

- Période de garantie minimale de deux ans
- Support technique après-vente à distance et/ou sur site

### 3.3. Prestations supplémentaires éventuelles (PSE)

Les 4 PSE suivantes sont proposées à titre facultatif :

1. Un module de photoluminescence résolue en temps (TRPL) avec :
  - une longueur d'onde d'excitation laser monochromatique comprise entre 400 et 800 nm
  - une plage de détection de 450 à 1000 nm
  - une résolution temporelle d'au moins 0,5 ns
  - une fluence minimale de  $10^{12}$  photons/pulse/cm<sup>2</sup> sur un spot d'au moins 100  $\mu\text{m}$
  - un taux de répétition des pulses laser réglable, couvrant au minimum les plages 100kHz-1MHz
2. Une entrée de gaz avec un capteur d'humidité intégré : un raccord tubulaire push-to-connect ajouté au panneau arrière de l'enceinte pour permettre une purge continue de gaz (par exemple N<sub>2</sub>) durant le fonctionnement de l'outil avec un capteur d'humidité intégré près de la position de mesure de l'échantillon.
3. Une position de mesure supplémentaire pour mesure personnalisée par fibre optique : une position de mesure supplémentaire pourrait être ajoutée à l'outil standard pour permettre une mesure personnalisée via fibre optique. Des ports fibre permettraient le couplage avec une source lumineuse externe et un détecteur. La taille de la position de mesure supplémentaire devrait permettre de loger des échantillons 10x10 cm<sup>2</sup>
4. Une station photo équipée d'une caméra de 10 MP ou plus capable de capturer chaque substrat avec une capacité d'intégration aux tâches de reconnaissance d'images.

### 3.4. Formation

Le titulaire assurera une formation à distance portant sur l'utilisation complète de l'instrument et des logiciels de contrôle associés. Cette formation devra permettre aux utilisateurs d'être autonomes pour l'ensemble des opérations courantes. Elle inclura notamment la prise en main des différents modules de mesure, le paramétrage des acquisitions, ainsi que l'exploitation des données. Le titulaire devra également fournir des supports pédagogiques adaptés, incluant des fichiers de démonstration (données types, scripts éventuels), facilitant la compréhension et la reproductibilité des manipulations.

### 3.5. Livraison et délais d'exécution

Dans un **délai maximum de 5 mois à compter de la notification du marché**, des documents logistiques et techniques prouvant l'achèvement de la fabrication du système devront être transmis pour validation par l'IPVF en amont de la livraison, qui sera prise en charge par Ulisse, l'unité de transport et logistique du CNRS. **La signature du bon de transport, par le titulaire et par le transporteur mandaté par ULISSE atteste du point de départ de la prise en charge de la prestation par ULISSE.**

Les fournitures seront livrées par Ulisse et les prestations exécutées par le titulaire de l'équipement à l'adresse suivante :

**UMR9006 IPVF CNRS**  
18 boulevard Thomas Gobert  
91120 Palaiseau  
France

La conception et la fabrication du système devront être réalisées par le titulaire dans un délai de 5 mois à compter de la notification du marché. Suite à la livraison par Ulisse, l'équipement devra être installé, mis en service et faire l'objet d'une formation par le titulaire dans un délai **d'un mois à compter de livraison dans les locaux de l'IPVF**. Celui-ci pourra réaliser ces opérations sur site ou avec assistance à distance.

### 3.6. Opération de vérification et tests d'essais

Dans un délai de 15 jours suivant la formation, des essais fonctionnels effectués par les utilisateurs porteront notamment sur :

- La validation des plages spectrales et des résolutions attendues pour chaque module (transmittance, PL et TRPL)
- La stabilité et de la répétabilité des mesures sur des échantillons de référence
- La calibration photométrique du module PL
- La vitesse d'acquisition de chaque module, en conditions réelles
- La vérification de l'interface utilisateur (GUI) et du contrôle logiciel

A l'issue de ces essais, un rapport sera remis et soumis à validation par l'IPVF. L'approbation de ce rapport vaudra validation définitive de l'équipement.