

CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIERES (CCTP)

Désignation du pouvoir adjudicateur :

Le Président du Centre INRAE Occitanie - Montpellier
Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
Etablissement public à caractère scientifique et technologique (EPST)
2 place Pierre VIALA, 34060 MONTPELLIER CEDEX 2
Courriel : sam-montpellier@inrae.fr

Prescripteurs : Unité Mixte de Recherche (UMR) LEPSE

Objet de la consultation :

EQUIPEMENT COMPLET EN LEDs DES PLATEFORMES M3P PHENOARCH et PHENODYN

Procédure d'appel d'offre ouvert passée en application des articles L 2124-1, L 2124-2, R 2124-1, R 2124-2 1° et R 2161-2 à R 2161-5 du Code de la commande publique (CCP).

Code nacre : QB.12 : MATERIEL ET ACCESSOIRES DESTINES A L'EXPERIMENTATION VEGETALE SOUS SERRE
Code CPV :
31521000-4 : Lampes
45311000-0 : Travaux de câblage et installations électriques
45214630-5 : Installations scientifiques

Table des matières

1.	CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET OBJET DU MARCHÉ	3
1.1.	CONTEXTE SCIENTIFIQUE	3
1.2.	OBJET DU MARCHÉ	3
2.	CONTEXTE TECHNIQUE	4
2.1.	DESCRIPTION DES SERRES HEBERGEANT LES PLATEFORMES DE PHENOTYPAGE	4
1.	PHENODYN	5
2.	PHENOARCH	5
2.2.	DESCRIPTION DES PROJECTEURS ACTUELS	7
2.3.	SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES DES PROJECTEURS ACTUELS	8
3.	Contraintes physiques de l'équipement	8
3.1.	Hauteur DES PROJECTEURS ACTUELS et raccordement électrique	8
3.2.	Conditions environnementales	9
3.3.	Synthèse des contraintes physiques du dispositif	9
3.4.	Les espèces cultivées	9
4.	Caractéristiques techniques de l'équipement en LED	10
4.1.	Intensité du rayonnement	10
4.2.	La qualité spectrale	10
4.3.	Homogénéité du rayonnement	11
4.4.	Pilotage et gestion des projecteurs	11
4.5.	MATERIEL	12
5.	Éléments majeurs	12
6.	Mise en service	12
7.	PERIODE D'ESSAIS, Vérification et Admission	13
8.	Formation	13

1. CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET OBJET DU MARCHÉ

1.1. CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Les travaux de l'UMR LEPSE (Laboratoire d'Ecophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux <https://www6.montpellier.inra.fr/lepse>) visent à accompagner l'émergence d'une agriculture plus économe en eau et résiliente face aux changements climatiques. Nous étudions les réponses des plantes à la sécheresse, aux températures élevées, au CO₂ et explorons leur variabilité génétique, entre ou au sein d'une même espèce.

Dans ce contexte, les plateformes de phénotypage à haut-débit du LEPSE permettent de caractériser, chez un grand nombre de génotypes, les réponses de processus biologiques dynamiques clés dans la mise en place des couverts végétaux (ex : croissance, développement foliaire, mise en place de l'architecture, transpiration, efficacité d'interception et d'utilisation du rayonnement, efficacité d'utilisation de l'eau...) à des variables environnementales fluctuantes, en particulier au déficit hydrique du sol). Ces plateformes sont regroupées sur l'infrastructure M3P (Montpellier Plant Phenotyping Platforms), nœud de l'IR nationale PHENOME-EMPHASIS) labellisée [ISC](#) et [IBISA](#).

Depuis près de 20 ans, les chercheurs de l'UMR LEPSE et leurs partenaires ont fait la preuve de l'intérêt de ces plateformes dans une démarche intégrée d'analyse, de prédiction et d'accompagnement de la sélection. L'ouverture des plateformes a également permis d'élargir cette démarche aux équipes externes, tant nationales qu'internationales.

La plateforme PHENOARCH, hébergée dans une serre de 380 m² (jusqu'à 2 400 plantes) est équipée d'un automate de convoyage, d'arrosage et de prise d'image (RGB), et de gestion du stress hydrique par irrigation individuelle des pots. Elle permet l'analyse des déterminismes génétiques de la réponse des plantes (croissance, transpiration, développement) face aux conditions environnementales sur un large effectif de plantes.

La plateforme PHENODYN, hébergée dans une serre de 180 m² est équipée de balances et capteurs rotatifs de déplacement. Elle permet l'enregistrement dynamique de la croissance des organes (ex. feuilles) et de la transpiration des plantes, avec une fréquence d'acquisition fine, de l'ordre de la minute.

1.2. OBJET DU MARCHÉ

L'objet du marché est de remplacer les projecteurs actuels sur les 2 plateformes PHENODYN et PHENOARCH par des projecteurs LED, afin d'obtenir un rayonnement plus homogène, une intensité plus forte, et un spectre plus en accord avec le spectre naturel. Le rendement énergétique et les économies d'énergie sont également un attendu essentiel. Le pilotage de ce système doit être précis, convivial, évolutif.

Ce « relampage » aura donc pour objectif de permettre une **augmentation** ainsi qu'une **meilleure répartition** annuelle de l'activité expérimentale, couplées à une **réduction énergétique**.

Pour la plateforme PHENOARCH, l'offre de base comprend le démontage des anciennes lampes de la serre, la fourniture des nouveaux projecteurs LEDs, le calcul de la charge électrique et structurelle de la serre et la modification induite, l'installation des nouveaux projecteurs, l'interface de pilotage, la mise en service, la formation, ainsi que les garanties et le service après-vente d'un équipement complet en projecteurs LEDs.

Pour la plateforme PHENODYN, l'offre de base comprend l'interface de pilotage uniquement.

Les prestations supplémentaires éventuelles suivantes sont demandées :

- PSE 1 : Calcul de la charge électrique et structurelle serre Phenodyn et la modification induite.
- PSE 2 : démontage des anciennes lampes de la serre Phenodyn.
- PSE 3 : nouveaux projecteurs LEDs de la serre Phenodyn.

ATTENTION : concernant le PSE 3, seule la partie 1 des lampes de PHENODYN sera remplacée. Cependant, Il est tenu compte des 2 parties (1+2) dans l'interface et le dimensionnement des armoires électriques, pour une future migration en LEDs de cette zone dans un avenir proche.

2. CONTEXTE TECHNIQUE

2.1. DESCRIPTION DES SERRES HEBERGEANT LES PLATEFORMES DE PHENOTYPAGE

Les plateformes de phénotypage M3P sont situées sur le campus La Gaillarde Institut Agro/INRAE, au Nord-Ouest du centre-ville de Montpellier. Les serres sont entourées au Nord-Ouest par le bâtiment IBIP (bâtiment 0070), au Sud-Est par un terrain de sport (**Fig. 1**).



Figure 1. Plan de Montpellier et Vue aérienne des serres M3P

Les serres hébergeant les plateformes PhenoDyn et PhenoArch sont des serres conçues et réalisées par les sociétés Richel – Marchegay – Deforche (Fig. 2).



Figure 2. Vue aérienne des serres PHENOARCH et PHENODYN

1. PHENODYN

La serre hébergeant la **plateforme PHENODYN** a une surface de 175 m² (14 x 12.5m) et comprend deux chapelles de faîtage à 4.47m.

2 parties expérimentales composent cette serre :

- Partie 1 : composée d'un système de 168 balances à 25 cm du sol (**Fig. 3**) : les plantes sont positionnées sur les balances durant leur croissance ou la phase de mesure.
- Partie 2 : cette partie ne comprend pas de balances et est **hors marché pour la fourniture des lampes (le dimensionnement des armoires électriques et le câblage est bien prévu dans le marché).**



Figure 3. Système de balances de la plateforme PHENODYN, rampes de lampes actuelles

2. PHENOARCH

La serre hébergeant la **plateforme PHENOARCH** a une surface de 360 m² (20 x 18m) et comprend trois chapelles de faîtage à 6.42 m (**Fig. 4**).

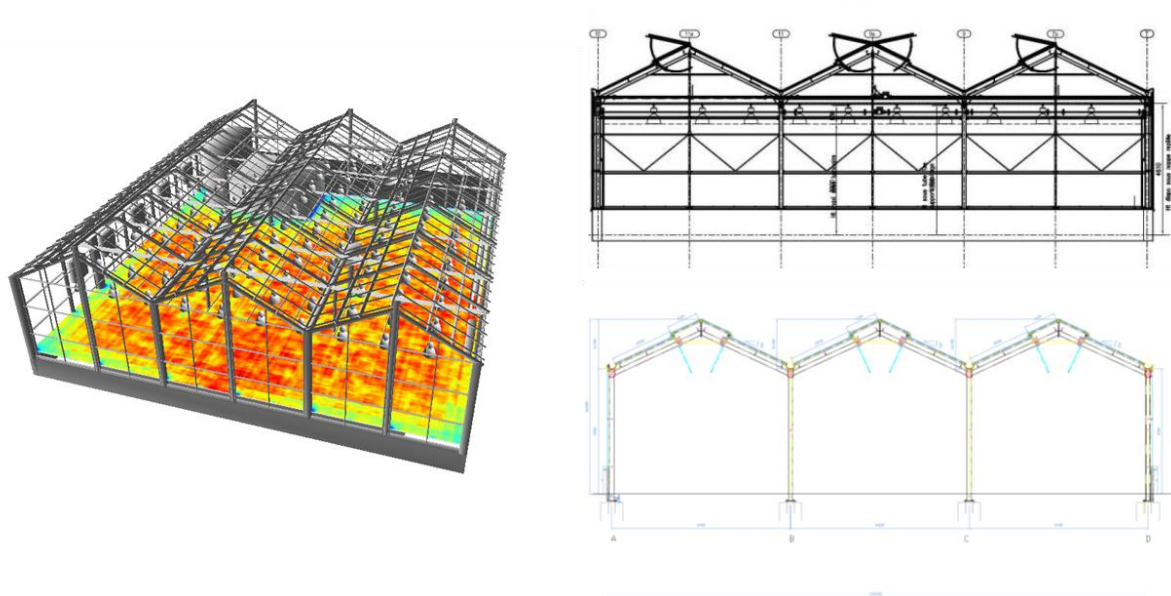


Figure 4. Maquette 3D, coupes de la façade et chapelles de la serre PHENOARCH et image d'expérimentation vigne

Un système de convoyage permet d'héberger jusqu'à 2400 plantes et de les déplacer de manière automatisée vers les cabines d'imagerie et les stations d'arrosage. Les convoyeurs, d'une hauteur de 83 cm, accueillent directement les plantes qui y sont positionnées pour leur prise en charge (**Fig. 5**).

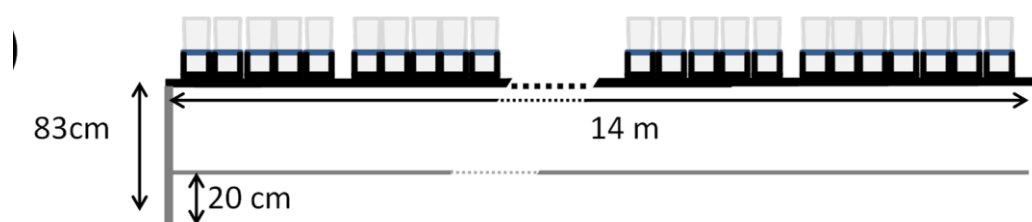


Figure 5. Schéma du système de convoyage de la plateforme PHENOARCH

2.2. DESCRIPTION DES PROJECTEURS ACTUELS

Les serres PHENOARCH et PHENODYN sont actuellement équipées de projecteurs de type sodium/HPI de 400 W, montés sur rails (**Fig. 6**). La serre PHENOARCH dispose de 120 projecteurs avec un design de 12 lampes x 10 rangées, à une hauteur du sol de 390 cm du sol et PHENODYN de 96 projecteurs avec un design de 12 lampes x 8 rangées, à 270 cm du sol. Ces dispositifs fournissent une intensité lumineuse d'environ $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Attention : Seule la moitié des projecteurs de PHENODYN est concernée par ce marché, soit 48 projecteurs sur la partie « Balances » (PSE 3). Le dimensionnement des armoires électriques et le câblage électrique est à prévoir pour l'ensemble des 2 zones.



Figure 6. Détail des projecteurs HPI/sodium existants.

2.3. SYNTHÈSE DES CARACTÉRISTIQUES DES PROJECTEURS ACTUELS

	Nombre de lampes	Type	Distance de la base des projecteurs au sol	Distance de la base du projecteur actuel à la hauteur d'un couvert moyen de 1m	Puissance totale maximale
PHENOARCH	120	HPI/sodium	390 cm	167	48 kW
PHENODYN :	96 lampes	HPI/sodium	270 cm	100	48 kW
2 parties	Partie 1 « Balances » : 48 lampes				
	Partie 2 : « Hors Balances » : 48 lampes (Hors marché)	Hors marché	Hors marché	Hors marché	Hors marché

	Ecartement actuel des projecteurs sur la ligne (m)	Ecartement des lignes (m)
PHENOARCH	1.80	1.65
PHENODYN	1.50	1.4

Table 1. Synthèse des caractéristiques de projecteurs actuels et géométrie

3. Contraintes physiques de l'équipement

3.1. HAUTEUR DES PROJECTEURS ACTUELS ET RACCORDEMENT ELECTRIQUE

Le nouveau système d'éclairage LED est installé de préférence sur les supports déjà en place dans les deux serres. Il est également raccordé électriquement au système existant, à proximité et en remplacement des ballasts actuellement utilisés pour l'alimentation des projecteurs existants. Si ce raccordement nécessite une prolongation des câbles déjà présents, cette fourniture et ce complément sont à la charge du prestataire du présent marché.

Le titulaire est également en charge de vérifier la capacité électrique en amont des armoires électriques de la serre pour l'alimentation des futurs projecteurs. Cette vérification aura été faite en amont de la remise de son offre, lors de la visite obligatoire.

Le démontage, la dépose et l'évacuation des équipements existants (projecteurs et ballasts) sont à la charge du titulaire du marché.

Un calcul de la charge des nouveaux projecteurs est fourni par le titulaire qui doit s'assurer de la capacité de la structure actuelle à soutenir le nouveau système d'éclairage dans sa totalité.

A l'issue de l'installation, le titulaire sera en charge de faire contrôler l'installation électrique par un organisme certifié.

3.2. CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

Les serres sont soumises à des conditions environnementales variables, avec des températures comprises entre 5 et 40 °C et une humidité relative allant de 20 à 80 %. Dans ce contexte, les projecteurs doivent présenter un indice de protection d'au moins IP65 afin de garantir leur résistance et leur bon fonctionnement.

3.3. SYNTHESE DES CONTRAINTES PHYSIQUES DU DISPOSITIF

Contraintes Techniques	Précision
Type de LEDs	Les solutions « projecteur » et/ou « tubes » peuvent être proposées. L'homogénéité de l'intensité du rayonnement sur l' ensemble de chaque plateforme est déterminante.
Alimentation électrique et capacité structurelle	L'offre du titulaire intègre l'étude de capacité électrique ainsi que structurelle pour le support des nouveaux équipements.
Hauteur du couvert	PHENOARCH : distance min/max de 50/267 cm de la base des lampes PHENODYN : distance min/max de 50/205 cm de la base des lampes
Fixation des LEDs	Les projecteurs LEDs doivent pouvoir être démontés rapidement pour faciliter l'entretien, le remplacement, mais aussi leur ajustement pour assurer une bonne homogénéité d'éclairage (intensité et qualité) au niveau des plantes. Le positionnement sur les emplacements actuels est à privilégier pour ne pas générer d'ombre supplémentaire sur le couvert végétal.
Ambiance environnementale	Température : les LEDs doivent être capables de supporter une température allant de 5 à 45°C Humidité Relative : les LEDs doivent être capables de supporter une humidité Relative allant de 20 à 80% Les projecteurs doivent avoir un indice de protection au moins égal à IP65
Ombrage	Doit être Limité l'ombrage porté des projecteurs par la surface de chaque projecteur et le nombre.

Table 2. Synthèse des contraintes physiques du dispositif.

3.4. LES ESPECES CULTIVEES

Aujourd'hui, les espèces cultivées sur les plateformes PHENOARCH et PHENODYN comprennent notamment le maïs, le blé, la vigne, le pommier, le sorgho et la tomate. Le nouveau dispositif d'éclairage LED ne doit entraîner aucun effet pléiotropique sur le développement des plantes, que ce soit sur le nombre de tiges, la taille des feuilles ou encore la date de floraison. La hauteur des plantes cultivées ne dépasse pas 250 cm.

4. Caractéristiques techniques de l'équipement en LED

L'équipement en LED des serres PHENOARCH et PHENODYN poursuit quatre objectifs clés :

1. Amélioration de l'intensité lumineuse par l'intégration de LED à haute efficacité lumineuse et rendement énergétique élevé.
2. Amélioration de la qualité spectrale de la lumière grâce à l'utilisation de LED de type *SunLike*, enrichies en Far Red (bi-canaux), afin de mieux reproduire le spectre lumineux naturel
3. Réduction significative de l'hétérogénéité spatiale de l'éclairage actuel, offrant ainsi des conditions plus homogènes et permettant la mise en place de dispositifs expérimentaux plus flexibles, indépendants des gradients lumineux actuellement présents dans les installations.
4. Pilotage précis et modulation de l'intensité, de la qualité et de la durée de l'éclairage, rendant possible l'exploration de multiples combinaisons de scénarios lumineux. Par exemple la simulation de levers et couchers de soleil, ou encore le passage de nuages et l'interdépendance à la lumière naturelle extérieure sont inclus. Une interface conviviale, permettant de gérer ces scénarii, et accessible à tous est proposée. Cette interface de pilotage est évolutive dans le temps (nouvelles lampes, nouvelles recettes de spectre et d'intensité...).

4.1. INTENSITE DU RAYONNEMENT

L'intégration de cet équipement doit tenir compte des spécificités propres à chaque serre, notamment la hauteur sous plafond et la configuration des plateformes PHENOARCH (convoyeurs) et PHENODYN (balances). L'objectif est de garantir un rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) d'au moins $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ à la hauteur moyenne du couvert végétal (150 cm), située à 167 cm de la base des lampes actuelles sur la plateforme PHENOARCH, et à 105 cm sur la plateforme PHENODYN.

La modulation de l'intensité de chacun des projecteurs doit être possible entre 0 et 100% par le biais d'un logiciel, accessible via une interface adaptée, et d'un variateur manuel de secours facile d'accès.

4.2. LA QUALITE SPECTRALE

Plusieurs dispositifs de la plateforme M3P sont déjà équipés de LED du type Sunlike. Le spectre des nouvelles LEDs des serres doit être parfaitement compatible avec le spectre des LEDs existantes sur les autres installations (Fig. 7).

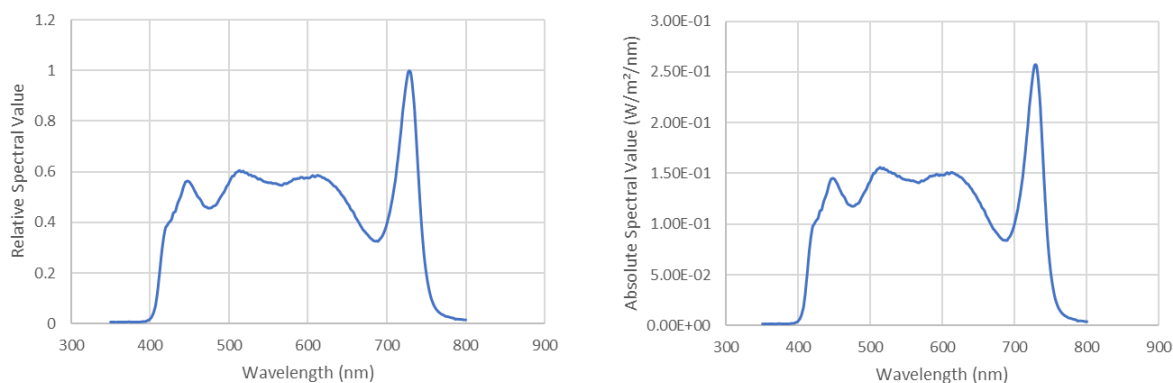


Figure 7. Spectre en valeurs relatives et absolues des projecteurs LED de type SunLike enrichis en FR (bi-canaux modulables indépendamment).

- ✓ La modulation de l'intensité ainsi que la distance par rapport aux projecteurs ne doivent pas altérer la qualité spectrale.
- ✓ Le spectre doit se rapprocher le plus possible du spectre solaire (Led type Sunlike).
- ✓ Au moins 2 canaux doivent être disponibles pour adapter le spectre à des demandes particulières. Le rouge lointain (725 à 735 nm) est un des 2 canaux ; Le ratio RC/RS doit pouvoir se rapprocher de celui du spectre solaire (1.3) mais rester modulable.
- ✓ L'Indice de Rendu des Couleurs (IRC) doit être compris entre 95 et 100, la lumière doit apparaître blanche à l'œil humain pour le modèle bi canaux.

- ✓ La lumière est du type blanc neutre (5000K)
- ✓ La diminution de l'intensité et l'altération de la qualité spectrale doivent être inférieures à 10% après 50 000 heures d'utilisation. La possibilité d'une compensation peut être possible.
- ✓ Une correction par la température doit être proposée pour limiter les variations d'intensité dues aux températures.
- ✓ Un lien avec le PAR extérieur doit être proposé afin d'adapter de façon automatique l'intensité de chaque lampe à une quantité totale de photon, incluant l'apport extérieur (adaptation incluse dans l'interface).
- ✓ L'intensité de chacun des 2 canaux de chacune des lampes pourra être réglée entre 0 et 100%.
- ✓ Des zones ou des groupes de lampes pour permettre une homogénéité maximale sont possibles. L'intensité de ces groupes ainsi que leur ratio doivent pouvoir être gérés via l'interface.

4.3. HOMOGENEITE DU RAYONNEMENT

Une importance particulière est attachée à l'**homogénéité de l'éclairage** sur toute la surface de la serre en intensité et qualité. Un écart d'environ **5 à 8 %** est toléré entre la valeur de PAR la plus haute et la plus basse sur la surface totale de la serre, à un instant t.

L'optimisation peut être réalisée par variation d'intensité des LEDs une à une, ou par groupe (zone à zone), ou bien en modifiant la position des LEDs sur leur support par coulissage. Cela suppose une accroche simple pour faciliter le déplacement manuel des projecteurs. Cette dernière possibilité doit rester exceptionnelle. Le nombre de zones envisagées (+/- 1) est précisé. Il en sera tenu compte par le titulaire dans le dimensionnement du matériel électrique proposé dans son offre.

Les projecteurs peuvent être disposés en X et/ou en Y ou alternés.

Un ou plusieurs schémas d'implantation doivent être proposés dans l'offre du titulaire.

Le compromis entre homogénéité et intensité sera évalué par les ingénieurs d'INRAE. Il doit rester limité, l'homogénéité restant privilégiée.

Trois **intensités de rayonnement** (Photosynthetic Active Radiation, PAR) sont souhaitées.

Pour les 2 plateformes, l'équipement LEDs doit pouvoir délivrer :

	Référence simulation	Distance lampes /sommet du couvert (cm)	Apport minimum souhaité (μmoles photons/m ² /s)	Type de projecteurs
PHENODYN	D1	100	350	Bi-canaux
	D2	150	250	Bi-canaux
	D3	200	300	Bi-canaux
PHENOARCH	A1	100	≥ 360	Bi-canaux
	A2	250	190	Bi-canaux
	A3	250	≥ 340	Bi-canaux

Table 3. Intensité minimale à atteindre dans les différentes serres

La consommation électrique est estimée pour chacun des scénarii ci-dessus dans l'offre du titulaire.

4.4. PILOTAGE ET GESTION DES PROJECTEURS

À ce jour, la régulation climatique des serres est assurée par le système Aria (<http://www.ariahorti.fr/>). Le contrôle des projecteurs LED doit être intégré au système existant afin d'en gérer l'allumage et l'extinction.

Une interface spécifique doit être proposée dans le logiciel de pilotage des lampes pour assurer les fonctionnalités suivantes pour les deux Serres, Phenodyn et Phenoarch :

- La programmation du spectre lumineux (recettes types enregistrables).
- L'allumage/extinction progressive des lampes ou la simulation de nuages.
- La régulation de l'intensité lumineuse par lampe ou par groupes de lampes en fonction d'une consigne fixe ou du rayonnement extérieur : le système de régulation doit être dynamique et permettre d'adapter l'intensité lumineuse en fonction de l'éclairement extérieur, de manière à compenser la lumière manquante pour atteindre l'intensité cible. Pour assurer cette fonction, les capteurs PAR déjà présents dans l'enceinte peuvent être raccordés au système de gestion de l'éclairage si nécessaire, sinon, d'autres, sont à rajouter à la charge du prestataire.
- Des recettes d'intensité différentes sont enregistrables.
- Une correction automatique de l'intensité des LEDs doit également être appliquée en fonction de la température mesurée à proximité des projecteurs
- Cette ou ces interface(s) seront utilisées par un opérateur expérimenté.
- L'interface est adaptée à chacun des schémas d'implantation et est évolutive.
- Le positionnement de chaque lampe est repéré, ses paramètres également (allumage, intensité...).
- La programmation est également évolutive, les codes accessibles sous logiciel libre.

4.5. MATERIEL

- ✓ Les alimentations doivent être déportées proches des projecteurs.
- ✓ Pas de ventilateur sur les projecteurs (refroidissement passif).
- ✓ Chaque projecteur doit pouvoir être descendu de 50 cm grâce à un système simple.

5. *Éléments majeurs*

Rappel des points majeurs :

- **Caractéristiques techniques des projecteurs** (puissance, intensité, efficacité, indice IP, IRC, K...)
- **Homogénéité du rayonnement** sur l'ensemble de la surface de la serre, démontrée par des simulations de cartographies pour chaque configuration technique.
- **Qualité spectrale modulable** pour les projecteurs bi-canaux.
- **Intensité lumineuse dimmable** pour chaque canal.
- **Pas de dommage sur les plantes (brûlures) et sur la santé humaine (normes santé) : des normes de santé et de sécurité sont appréciées.**
- **Souplesse d'installation, d'utilisation et d'évolution**, incluant la possibilité d'ajouter des projecteurs dans le cadre de futurs marchés.
- **Interface conviviale, évolutive.**

6. *Mise en service*

- ✓ La mise en service complète (électrique et logiciel) doit avoir lieu dans un délai maximum de trois mois suivant la livraison et l'installation de la partie matérielle. Le montage des nouveaux luminaires aura lieu en fonction de la fin des expérimentations sur les plateformes, après concertation et accord des responsables INRAE.

Avant cette mise en service, le titulaire doit vérifier la compatibilité et le bon fonctionnement de l'ensemble du dispositif afin d'optimiser la phase d'essais réalisée après la mise en service, en présence du titulaire et de l'INRAE (voir point 8).

Le transport du matériel jusqu'au site (selon les modalités mentionnées à l'article 5.2 du CCAP), ainsi que les frais d'hébergement liés à la mise en service, sont intégralement à la charge du titulaire.

7. PERIODE D'ESSAIS, Vérification et Admission

Les opérations de vérifications (conduites de tests en conditions réelles d'expérimentation) sont réalisées en octobre 2026 selon les modalités indiquées à l'article 13 du CCAP.

8. Formation

Le Titulaire doit assurer une formation sur site d'au moins trois (3) personnes de l'INRAE 15 jours avant la mise en service.

La formation doit concerner :

- La description technique du matériel
- L'utilisation du matériel et les règles de sécurité
- Contrôle et pilotage des projecteurs
- La maintenance

Tous ces supports de formation seront récapitulés dans un manuel utilisateur livré au moment de la mise en service du dispositif.

Fait à Montpellier, le 06/02/2026