

MARCHE PUBLIC DE FOURNITURES

CENTRE INRAE DE NOUVELLE-AQUITAINE BORDEAUX

71, avenue Edouard Bourlaux
CS 20032
33 882 VILLENAVE D'ORNON Cedex

**Acquisition de deux dispositifs spatialisés de
mesure de la micrométéorologie**

**CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIERES
(CCTP)**

Objet : Acquisition de deux ensembles de mesure spatialisés pour la micrométéorologie

Dans le cadre du CPER BOOSTER+ (Contrat de Plan État-Région), INRAE souhaite acquérir 2 ensembles de mesure spatialisés pour caractériser la micrométéorologie pour nos deux sites expérimentaux de l'Hermitage (Cestas Pierroton) et Bilos (Salles). Ces sites sont rattachés ou en cours de rattachement à l'infrastructure ICOS et devront donc être conformes aux instructions ICOS détaillées à l'annexe 1 du CCTP.

Les 2 ensembles de mesure se caractérisent de la manière suivante :

Ensemble de mesure 1 : Fourniture et livraison d'un dispositif d'acquisition spatialisé composé de 5 stations micrométéorologiques interconnectées pour le site INRAE à Cestas Pierroton (site de l'Hermitage) :

1. **Une** station micrométéorologique pour la mesure d'un profil de vents, de la température de l'air et de l'hygrométrie de l'air, et de la pression atmosphérique.
2. **Une** station micrométéorologique pour la mesure de la température du sol et la teneur en eau du sol.
3. **Trois** stations micrométéorologiques mesurant la hauteur de nappe et le flux de chaleur du sol.
4. Les fixations et supports adaptés pour l'ensemble du matériel devront également être fourni pour une installation conforme aux instructions ICOS.

Voir détail pages 3 à 6

Ensemble de mesure 2 : Fourniture et livraison d'un dispositif d'acquisition spatialisé de 4 stations micrométéorologiques interconnectées pour l'évolution et le renouvellement de son instrumentation pour le site ICOS de Bilos à Salles :

1. **Une** station micrométéorologique pour la mesure d'un profil de vents, de la température de l'air et de l'hygrométrie, de la pression atmosphérique, hauteur de nappe et l'humidité volumique du sol.
2. **Deux** stations micrométéorologiques pour la mesure de la teneur en eau du sol, la température du sol et du rayonnement PAR
3. **Une** station micrométéorologique backup pour la mesure de l'humidité, la teneur en eau du sol, le rayonnement PAR, rayonnement RG, vent, température de l'air et humidité.
4. Les fixations et supports adaptés pour l'ensemble du matériel devront également être fourni pour une installation conforme aux instructions ICOS.

Voir détail pages 3 à 6

Descriptif de l'ensemble de mesure 1 :

Fourniture et livraison d'un dispositif d'acquisition spatialisé composé de 5 stations micrométéorologiques interconnectée pour le site INRAE à Cestas Pierroton (site de l'Hermitage).

1. Une station micrométéorologique pour la mesure d'un profil de vents, de la température de l'air et de l'hygrométrie, et de la pression atmosphérique.

Elle doit être composée de :

1.1. Une centrale d'acquisition de données modulable

- Interfaces RS232/USB/Ethernet
- Capacité mémoire extensible jusqu'à 16 GO
- Kit de fixation
- Bus SDI-12, bus CPI, RS 422 et RS 485
- Alimentation 12 ou 24 Volt DC
- Compatible avec un réseau de centrales d'acquisition déjà existant et interfaçable sur un réseau Packbus
- Capacité de mesure et d'enregistrement à une résolution temporelle de 20 s pour une centaine de variables
- 8 mesures analogiques différentielles avec un module de 8 autres mesures analogiques différentielles déportables à quelques mètres

1.2. Un profil de mesure du vent constitué de 3 capteurs

- Mesure de la vitesse et de la direction du vent par protocole SDI-12 basé sur la mesure de la vitesse du son dans l'air
- Câblage fourni pour des hauteurs de 15 m, 25 m, 35 m + un câble supplémentaire de 15 m

Spécifications :

Vitesse du vent :

- Précision : $\pm 0,5 \text{ m s}^{-1}$ pour des valeurs $\leq 5 \text{ m s}^{-1}$; $\pm 10 \%$ pour des valeurs $> 5 \text{ m s}^{-1}$
- Résolution : $\pm 0,5 \text{ m s}^{-1}$
- Plage de mesure : $0 - 75 \text{ m s}^{-1}$
- Constante de distance : 5 m

Direction du vent :

- Précision : $\pm 5^\circ$
- Résolution : $\pm 3^\circ$
- Plage de mesure : 0 – 360°
- Temps de réponse : 1 s

1.3. Un capteur de pression atmosphérique 500 hPa – 1100 hPa

- Précision : $\pm 0,5$ hPa
- Résolution : $\pm 0,5$ hPa
- Temps de réponse : 30 s

1.4. Sept sondes de température et d'humidité de l'air

- Communication RS485
- Compatibles avec des abris ventilés à convection forcée
- 2 sondes avec câble de 10 m et 5 sondes avec câble de 30 m

Spécifications :

Température de l'air (thermomètres à résistance PT100 ou PT1000, classe 1/3 DIN) :

- Précision : $\pm 0,1$ K à 0 °C (hors erreurs dues à l'abri et à l'enregistrement)
- Temps de réponse : environ 20 s
- Plage de mesure : -50 °C à +55 °C

Hygromètres (capacitif) :

- Précision : ± 3 % HR
- Temps de réponse : environ 60 s
- Plage de mesure : 5 % – 100 % HR

2. Une station micrométéorologique pour la mesure de la température du sol et la teneur en eau du sol

Elle doit être composée de :

2.1. Une centrale d'acquisition

- Interfaces RS232/USB/Ethernet
- 6 entrées analogiques (mode différentiel ou simple), compatibles capteurs hydrologiques, météorologiques, industriels
- Prise en charge des thermocouples type T, E, K, J, B, R, S, N

- Signaux numériques : compteurs, PWM, interruptions, communication RS232, SDI-12, Modbus, DNP3, PakBus, SMTP sécurisé
- Contrôle embarqué : sortie 12 V commutée, deux voies d'excitation (0,15–5 V), deux ports numériques configurables
- Régulateur de charge intégré pour batterie et panneau solaire

2.2. Un profil constitué de 6 niveaux de température et de sondes de teneur en eau du sol

- 6 sondes TDR (Time Domain Reflectometry)
- Protocole SDI-12
- 15 m de câble par sonde

Spécifications :

- Mesure de la teneur en eau volumique du sol (θ_v)
- Conductivité électrique apparente (bulk EC)
- Température du sol
- Principe : TDR (temps de transit d'impulsion électromagnétique)
- Plage typique : 0 – 100 % volumique
- Précision : $\pm 0,025 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (après calibration spécifique au sol)
- Résolution : $0,001 \text{ m}^3/\text{m}^3$
- Faible sensibilité à la salinité

3. Trois stations micrométéorologiques mesurant la hauteur de nappe et le flux de chaleur du sol

Elles doivent être composées de :

3.1. Une centrale d'acquisition

- Caractéristiques identiques à la section 2.1 (page 4)

3.2. Une sonde de type piézomètre

- Mesure de la hauteur de nappe et de la température
- Protocole SDI-12
- 15 m de câble, dont une avec leste

Spécifications :

- Principe : pression absolue (non compensée en barométrie)
- Capteur piézorésistif intégré
- Plage typique : 0–5 m
- Précision pression/profondeur : $\pm 0,1 \%$ de l'échelle pleine

- Précision température : $\pm 0,2$ °C
- Température de fonctionnement : -10 °C à +80 °C

3.3. Un capteur de flux de chaleur du sol auto-calibrés

- Mesure de la différence de température à travers un disque mince pour déduire le flux de chaleur (W/m^2) via sa constante de calibration corrigée activement

Spécifications :

- Plage typique : $\pm 2000 \text{ W/m}^2$ (précision optimale dans $\pm 1000 \text{ W/m}^2$)
- Tension de sortie proportionnelle au flux ($\mu\text{V/W/m}^2$)
- Calibration individuelle fournie (constante en $\mu\text{V/W/m}^2$)
- Signal analogique
- Correction active par élément chauffant intégré → mesure de la conductivité thermique locale et correction des variations dues à l'humidité/température

4. Les fixations et supports adaptés pour l'ensemble du matériel devront également être fourni pour une installation conforme aux instructions ICOS.

- 3 bras de 180 cm avec leurs 3 bras de contreventement
- 10 supports de fixation de type bride

Descriptif de l'ensemble de mesure 2 :

Fourniture et livraison d'un dispositif d'acquisition spatialisé de 4 stations micrométéorologiques interconnectées pour l'évolution et le renouvellement de son instrumentation pour le site ICOS de Bilos à Salles :

1. Une station micrométéorologique pour la mesure d'un profil de vents, de la température de l'air et de l'hygrométrie, de la pression atmosphérique, hauteur de nappe et l'humidité volumique du sol.

Elle doit être composée de :

1.1. Une centrale d'acquisition

- Identique à la section 1.1 de l'ensemble de mesure 1 (page 3)
- Livrée avec coffret extérieur et son support

1.2. Un profil de mesure du vent avec 8 capteurs

- Protocole SDI-12
- Basé sur la mesure de la vitesse du son dans l'air
- Câblage fourni pour des hauteurs : 10 m (x2), 20 m (x3), 30 m (x3)
- Bras de montage inclus

Spécifications :

- Vitesse du vent : précision $\pm 0,5 \text{ m s}^{-1}$ ($\leq 5 \text{ m s}^{-1}$), $\pm 10 \%$ ($> 5 \text{ m s}^{-1}$), plage 0–75 m s^{-1}
- Direction du vent : précision $\pm 5^\circ$, résolution $\pm 3^\circ$, plage 0–360°, temps de réponse 1 s

1.3. Un capteur de pression atmosphérique

- Plage : 500 hPa – 1100 hPa
- Précision : $\pm 0,5 \text{ hPa}$
- Résolution : $\pm 0,5 \text{ hPa}$
- Temps de réponse : 30 s

1.4. Un profil d'humidité volumique du sol et température sur 1 m

- 9 profondeurs
- 10 m de câbles
- Kit d'installation inclus
- Sondes TDR multi segmentées à enterrer verticalement

Spécifications :

- Humidité volumique (θ_v), conductivité électrique apparente (bulk EC), température du sol
- Principe TDR → haute précision, faible sensibilité à la salinité/température
- Plage : 0–100 % volumique
- Précision $\pm 0,025 \text{ m}^3/\text{m}^3$ après calibration
- Plage température : -40°C à $+60^\circ\text{C}$
- Communication SDI-12
- Alimentation 9–18 V DC
- Consommation faible ($\sim 12 \text{ mA}$ en mesure)

1.5. Huit abris à ventilation forcée

- Pour sondes profil T et HR déjà en notre possession (modèle HMP155 Vaisala)
- Câblage : 10 m (x2), 20 m (x3), 35 m (x3)

Spécifications :

- Ventilateur intégré 12 V DC
- Débit ~ 3 à $5 \text{ m}^3/\text{min}$
- Très basse consommation (~ 2 – 4 W)

- Aspiration forcée pour limiter l'erreur de radiation ($<\pm 0,3$ °C)
- Protection contre inversion de polarité

2. Deux stations micrométéorologiques pour la mesure de la teneur en eau du sol, la température du sol et du rayonnement PAR

Elles doivent être composées de :

2.1. Une centrale d'acquisition

- Identique à la section 1.1 de l'ensemble de mesure 1 (page 3)
- Livrée avec coffret extérieur et support

2.2. Un profil d'humidité volumique du sol et température sur 1 m

- 9 profondeurs
- 10 m de câbles
- Sondes TDR multi-segmentées
- Protocole SDI-12
- Kit d'installation inclus

Spécifications : identiques à la section 1.4 de l'ensemble de mesure 2 (page 7)

2.3. Un capteur PPFD en SDI-12

Il s'agit d'une sonde quantique pour la mesure du flux de photons photosynthétiques (PPFD) en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Spécifications :

- Spectre sensible : $\sim 410\text{--}655$ nm
- Angle de vue : 180° ; erreur $\pm 5\%$ à 75° zénith
- Effet température $< 0,5\%$
- Interface : SDI-12
- Alimentation : $5,5\text{--}24$ V DC
- Consommation : $\sim 1,4$ mA en veille ; $\sim 1,8$ mA en mesure
- Incertitude de calibration : $\pm 5\%$ (référence COFRAC ou équivalent)
- Répétabilité $< 1\%$
- Dérive $< 2\%$ par an
- Non-linéarité $< 1\%$ jusqu'à $\sim 2500\text{--}4000$ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
- Temps de réponse $\sim 0,6$ s (95 % du signal)
- Plage de fonctionnement : $-20 \rightarrow +60$ °C ; 0–100 % HR ; submersible jusqu'à 30 m

3. Une station micrométéorologique backup pour la mesure de l'humidité, la teneur en eau du sol, le rayonnement PAR, rayonnement RG, vent, température de l'air et humidité.

Elle doit être composée de :

3.1. Une centrale d'acquisition de données modulable

- Interfaces : RS232 / USB / Ethernet
- Capacité mémoire extensible jusqu'à 16 Go
- Mesure et enregistrement à une résolution temporelle de 20 secondes
- Capacité : environ 100 variables
- Kit de fixation fourni
- Bus SDI-12, bus CPI, RS422 et RS485
- Alimentation : 12 ou 24 V DC
- Intégration possible à un réseau de centrales d'acquisition existant, interfaçable sur un réseau Packbus
- 8 mesures analogiques différentielles, avec un module additionnel de 8 mesures analogiques différentielles déportables à quelques mètres
- Livrée avec coffret extérieur et support

3.2. Un profil d'humidité volumique du sol et température sur 1 mètre

- 9 profondeurs avec 10 m de câble
- Kit d'installation fourni
- Sondes de profil TDR (Time Domain Reflectometry), multi segmentées, fonctionnement avec protocole SDI-12
- Conçues pour être enterrées verticalement afin de suivre la profondeur sans perturber la structure du sol

Caractéristiques principales

Mesure	Détail
Humidité volumique (θ_v)	Principe TDR (impulsion EM) – haute précision, faible sensibilité à la salinité/température
Plage	0 à 100 % volumique
Précision typique	$\pm 0.025 \text{ m}^3/\text{m}^3$ après calibration spécifique au sol
Conductivité électrique (bulk EC)	Plage : 0–10 dS/m, résolution fine ($\sim 0.001 \text{ dS/m}$)
Température du sol	Plage : -40 °C à +60 °C, précision $\pm 0.5 \text{ °C}$

Interface et communication

- SDI-12
- Alimentation : 9 à 18 V DC
- Consommation : faible au repos ($\sim 12 \text{ mA}$ en mesure typique)

Environnement et robustesse

- Température de fonctionnement : -40 °C à +60 °C
- Étanche et conçu pour enfouissement permanent
- Boîtier robuste en matériaux anticorrosion

3.3. Capteur PPFD en SDI-12

Il s'agit d'une sonde quantique destinée à la mesure du PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density), flux photosynthétiquement actif (énergie lumineuse utile aux plantes, en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), compatible avec divers environnements.

Spécifications physiques

- Spectre sensible : environ 410–655 nm
- Angle de vue (cosinus) : 180° ; erreur $\pm 5\%$ à 75° zénith
- Effet température : $<0,5\%$ (-20 → 50 °C)

Interface & compatibilité

- Protocole SDI-12 adressable, compatible dataloggers standards
- Alimentation : 5,5–24 V DC
- Consommation : veille $\approx 1,4 \text{ mA}$; mesure $\approx 1,8 \text{ mA}$

Performance & précision

- Incertitude de calibration : $\pm 5\%$ (références raccordées Cofrac ou équivalent)
- Répétabilité $<1\%$; dérive $<2\%$ par an
- Non-linéarité $<1\%$ jusqu'à $\sim 2\,500$ à $4\,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
- Réponse temporelle : $\sim 0,6 \text{ s}$ pour atteindre 95 % du signal ; rafraîchissement SDI-12 1
- Plage de fonctionnement : -20 → +60 °C ; 0–100 % HR ; submersible jusqu'à 30 m

3.4. Capteur RG thermopile

- Type : Pyranomètre à thermopile numérique
- Câble : 5 mètres
- Sortie : SDI-12 (communication numérique)

3.5. Capteur humidité et température de l'air, vent (direction et vitesse), rayonnement combiné avec kit anti-oiseau

- Mesure multi-paramètre : température de l'air, humidité, pression, vitesse et direction du vent, rayonnement solaire, précipitations
- Conçu pour un déploiement facile sur le terrain
- Faible consommation d'énergie pour station solaire
- Sortie SDI-12

4. Les fixations et supports adaptés pour l'ensemble du matériel devront également être fourni pour une installation conforme aux instructions ICOS.

Le kit de fixation devra être constitué de :

- 5 bras de 180 cm avec 5 bras de contreventement
- 5 bras de 120 cm
- 1 support pour bilanmètre
- 1 support de fixation pour radiomètre

Référentiel et conformité

Les appareils devront être conformes aux exigences du référentiel de labellisation de l'infrastructure de recherche européenne **ICOS** ([ICOS website](#)), à laquelle est rattaché depuis 2020 le site expérimental de Bilos à Salles ([instructions ICOS](#)). Vous trouverez ces informations en annexe 1 du présent CCTP.

Prestations attendues

Le titulaire devra fournir :

- L'ensemble du matériel conforme aux spécifications techniques décrites au présent CCTP
- Les accessoires nécessaires au fonctionnement (alimentation, câblage, module de configuration...)
- La documentation complète en français ou en anglais (manuel utilisateur, guide d'entretien)
- Certificat d'étalonnage ou équivalent en version papier à la livraison

Garantie et SAV

Garantie et SAV pour chaque dispositif :

- Garantie constructeur minimale : 2 ans.
- Service après-vente (SAV) : Le candidat expliquera le fonctionnement de son service après-vente (durée du SAV, délai de réponse, délai de prise en charge, durée des disponibilités des pièces détachées...)

Compatibilité des produits

- Compatible avec un logiciel de suivi en temps réel
- Compatible pour l'envoi de fichier journalier au format ICOS

Livraison

Livraison s'effectuera sur le site ci-dessous :

INRAE

UNITÉ EXPÉRIMENTALE FORET PIERROTON

A l'attention de Pierre BORDENAVE

Site de Recherches Forêt Bois de Pierroton

69 route d'Arcachon

33612 CESTAS Cedex - FRANCE

Téléphone : +33(0)5 35 38 54 00

La livraison s'effectuera sur RDV pris au minimum 8 jours avant la date de livraison auprès du contact ci-dessous :

Pierre BORDENAVE

Mail : pierre.bordenave@inrae.fr

Tel : 06 65 22 45 31

La livraison devra s'effectuer dans un maximum de 8 mois à partir l'accusé de réception de la notification. A la livraison, un procès-verbal (PV) de livraison valant admission du matériel sera établi. Ce PV déclenchera la facturation des dispositifs.

L'installation des matériels ne sera pas envisageable à la livraison, de ce fait, en cas de dysfonctionnement, INRAE demandera au Titulaire du marché de s'engager à réparer ou remplacer les dispositifs défectueux.

5. Documentation attendue dans l'offre

Le candidat fournira dans son offre la documentation complète en français ou en anglais sur les spécifications des dispositifs.

6. Développement durable

Le candidat détaillera dans son offre ses modalités de maintenance et de fournitures de pièces de remplacement. Il précisera la durée de vie moyenne des dispositifs, ainsi que la durée de mise à disposition des pièces d'échange.