



CCTP - Cahier des Clauses Techniques Particulières

Intitulé du marché :

Fourniture de systèmes actifs et passifs de mesure *in situ* de la fluorescence chlorophyllienne et de la réflectance des couverts végétaux, leur installation et leur mise en service sous forme d'un réseau multisites de mesure de proxy-détection

Table des matières

1. GENERALITES.....	6
1.1 OBJET DU DOCUMENT	6
1.2 TERMINOLOGIE.....	6
2. PRESENTATION DU PROJET	7
2.1 PRESENTATION DU CNRS ET DES LABORATOIRES.....	7
2.2 CONTEXTE.....	7
3. OBJET DU MARCHE	8
Modalités de prise en charge par les Laboratoires des équipements et consommables pour chacune des deux tranches (T1 et T2) :	11
4. DESCRIPTION DES EQUIPEMENTS ET / OU PRESTATIONS OBJET DU MARCHE.....	11
4.1 DESCRIPTION DES SYSTÈMES DE MESURE PASSIVE.....	11
4.1.1 Description de l'instrument SIF3	12
4.1.2 Améliorations de l'instrument de mesure passive demandées au Titulaire	12
4.2 DESCRIPTION DES SYSTÈMES DE MESURE ACTIVE	13
4.2.1 Description de l'instrument de mesure active (LIF)	13
4.2.2 Améliorations de l'instrument de mesure active demandées au Titulaire	13
4.3 DESCRIPTION DES OUTILS INFORMATIQUES	13
Langage de programmation et solutions informatiques	14
4.4 LISTE DES DONNEES ATTENDUES.....	15
4.5 PROTOCOLES DE MESURES.....	18
4.6 VALORISATION.....	18
5. DOCUMENTS APPLICABLES	18
5.1 LANGAGES INFORMATIQUES ET LOGICIELS.....	18
5.2 ANNEXES AU CCTP	19
5.2.1 Annexes A : Description de l'instrument SIF3	19
5.2.2 Annexe B : Description de l'instrument de mesure active de la fluorescence chlorophyllienne des couverts végétaux	19
5.2.3 Annexe C : Article scientifique Balde et al., 2024	19
5.2.4 Annexe D : Article scientifique Li et al., 2025	19
5.2.5 Annexe E : Sites expérimentaux ICOS partenaires.....	19

5.2.6 Annexe F : Liste des principaux équipements qui seront fournis au Titulaire	19
5.2.7 Annexe G : Exigences techniques pour les instruments SILI-Fluo	19
6. CONSISTANCE ET ETENDUE DES FOURNITURES.....	20
6.1 PERIMETRE PHYSIQUE	20
6.1.1 Les descriptions détaillées des instruments servant de modèle	20
6.1.2 Les documents livrables	20
6.2 PERIMETRE CONTRACTUEL DES SERVICES.....	20
6.3 COMPETENCES ET MOYENS ATTENDUS A L'EXECUTION DU MARCHE.....	21
6.4 LISTE DES DOCUMENTS ATTENDUS A LA LIVRAISON.....	22
6.5 EXIGENCES LIEES A LA QUALITE	23
6.5.1 Maîtrise des procédures	23
6.5.2 Audits / Vérifications	23
6.5.3 Documentation requise	23
6.5.4 Maîtrise des prestataires et fournisseurs travaillant avec le Titulaire	23
6.5.5 Gestion des anomalies et non-conformités détectées par le CNRS	24
6.5.6 Evolution et gestion des modifications	24
6.5.7 Approbation par le CNRS.....	24
6.6 ORGANISATION ET PILOTAGE.....	24
6.6.1 Organisation générale	24
6.6.2 Pilotage des activités.....	25
6.6.3 Communication entre le CNRS et le Titulaire	25
6.6.4 Calendrier d'exécution.....	25
6.6.5 Chemins critiques	25
6.6.6 Adresse de livraison	25
6.7 MATIERES ET APPROVISIONNEMENTS	26
7. SPECIFICATIONS TECHNIQUES DE REALISATION.....	26
7.1 DOCUMENTS REMIS AU TITULAIRE.....	26
7.2 TOLERANCES.....	27
7.3 TEST D'ETANCHEITE A LA PLUIE.....	27
7.4 TEST DES MOTEURS ET DES PIECES MECANIQUES EN MOUVEMENT	27
7.5 PROCEDURE DE REMPLACEMENT PREVENTIVE DES ELEMENTS SENSIBLES.....	27
7.6 MONTAGE AU LABORATOIRE ET CONTROLES	28

8. EMBALLAGE ET TRANSPORT.....	28
9. MONTAGE ET INSTALLATION DES INSTRUMENTS SUR LES SITES EXPÉRIMENTAUX ICOS.....	29
9.1 MISE EN PLACE.....	29
9.2 SITUATION ET ACCES.....	29
10. CYCLE DE VIE DU PROJET	29
10.1 TABLEAU SYNTHETIQUE.....	29
10.2 DESCRIPTION DES ETAPES.....	35
10.2.1 Etape 1 (Tranche T1) : Réunion de démarrage	35
10.2.2 Etape 2 (Tranche T1) : Validation des dossiers techniques du prototype SILI-Fluo 1.1	35
10.2.3 Etape 3 (Tranche T1) : Validation de la maquette de laboratoire du prototype SILI-Fluo 1.1.....	36
10.2.6 Etape 6 (Tranche T1) : Validation sur le site de Barbeau-Fontainebleau du prototype SILI-Fluo 1.1, de son fonctionnement, des données produites et de leur traitement par les outils informatiques durant la saison de végétation	37
10.2.7 Etape 7 (Tranche T1) : Réception du prototype SILI-Fluo 1.1 finalisé et des outils informatiques finalisés de traitements des données associés - Finalisation et remise des derniers livrables de T1.....	38
10.2.8 Etape 8 (Tranche T2) : Validation au laboratoire des instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3, et leur calibration au laboratoire	38
10.2.9 Etape 9 (Tranche T2) : Validation de l'installation sur les sites expérimentaux des instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3, de leur fonctionnement et des outils informatiques de traitement des données mesurées	38
10.2.10 Etape 10 (Tranche T2) : Validation sur les sites expérimentaux des instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3, de leur fonctionnement, des données produites et de leur traitement par les outils informatiques durant la saison de végétation.....	39
10.2.11 Etape 11 (Tranche T2) : Validation des outils informatiques de stockage centralisé et organisé de l'ensemble des données et de l'interface utilisateur adaptée	39
10.2.12 Etape 12 (Tranche T2) : Finalisation et remise des derniers livrables	40
11. DEVELOPPEMENT DURABLE.....	40
ANNEXE A : Description de l'instrument SIF3.....	41
1. Introduction	42
2. Description de l' instrument SIF3	42
2.1. Description de la tête optique	45

2.2.	Description du boîtier instrumental	48
2.3.	Description du boîtier alimentation.....	52
3.	Description du logiciel d' acquisition et de contrôle/commande	52
3.1.	Démarrage et continuité des mesures.....	52
3.2.	Interface du logiciel.....	53
3.3.	Sauvegarde et transfert des données.....	55
4.	Références	56
5.	Acronymes.....	57
ANNEXE B : Article scientifique Moya et al., 2019		58
ANNEXE C : Article scientifique Balde et al., 2024.....		58
ANNEXE D : Article scientifique Li et al., 2025		58
ANNEXE E : Sites expérimentaux ICOS partenaires		59
ANNEXE F : Liste des équipements, composants, consommables et fabrication à façon qui rentrent dans la composition des instruments SILI-Fluo et fournies par les Laboratoires		60
ANNEXE G : Exigences techniques pour les instruments SILI-Fluo		61

1. GENERALITES

1.1 OBJET DU DOCUMENT

Ce document décrit les prestations attendues du Titulaire pour :

- La fabrication, la calibration, la validation et l'installation sur sites d'instruments actifs et passifs de mesure *in situ* de la fluorescence chlorophyllienne et de la réflectance des couverts végétaux.
- La fourniture d'outils informatiques de traitement des mesures, de stockage et de partage en ligne des données brutes et élaborées

Le présent Cahier des Clauses Techniques Particulières (ci-après CCTP) constitue la pièce référence «CCTP spectroscopie ESE» du marché et a pour but de décrire l'étendue des prestations et toutes les exigences techniques contractuelles qui s'appliquent à la réalisation de ce projet. Ces exigences techniques contractuelles constituent pour le Titulaire du marché une obligation de résultat.

1.2 TERMINOLOGIE

CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulières

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

DN : Digital Number

ESA : Agence Spatiale Européenne

ESE : Laboratoire Écologie, Société et Évolution

FLEX : Fluorescence EXplorer

ICOS : Integrated Carbon Observation System

IPSL : Institut Pierre Simon Laplace

LED : Light Emitting Diode – Diode Electro-Luminescente

LIF : LED Induced chlorophyll Fluorescence - Fluorescence chlorophyllienne Induite par une source LED

LMD : Laboratoire de Météorologie Dynamique

PAR : Rayonnement Photo-synthétiquement Actif

SIF : Sun Induced chlorophyll Fluorescence - Fluorescence chlorophyllienne Induite par le Soleil

SILI-Fluo : Sun Induced and LED Induced Fluorescence

SIRTA : Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique

T1 : Tranche 1 – tranche ferme

T2 : Tranche 2 – tranche optionnelle

T_{surface} : température de surface du couvert végétal

UMR : Unité Mixte de Recherche

2. PRESENTATION DU PROJET

2.1 PRESENTATION DU CNRS ET DES LABORATOIRES

Le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) est le principal organisme public français de recherche. Il mène des recherches dans un très grand nombre de domaines au travers de différents Instituts.

Le présent appel d'offre est sous la responsabilité technique et scientifique conjointe des laboratoires ESE et LMD, ci-après dénommés les Laboratoires.

Le laboratoire ESE (Écologie, Société et Évolution, UMR 8079) mène des recherches qui couvrent de façon large les disciplines de l'écologie et de l'évolution, en s'intéressant à l'origine et la dynamique de la biodiversité, ainsi qu'à l'évolution et au fonctionnement des écosystèmes et des socio-écosystèmes. Les effets des changements globaux, notamment du changement climatique, sur les populations, les communautés et les écosystèmes, et la réponse à ces changements constituent des thèmes transversaux au sein de l'ESE. La laboratoire ESE est implanté sur le campus de l'Université Paris-Saclay et gère la station de recherches forestière de Barbeau-Fontainebleau (<https://barbeau.ese.cnrs.fr/>), qui fait partie du réseau européen ICOS (Integrated Carbon Observation System).

Le laboratoire LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique, UMR 8539) est membre de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL). Il joue un rôle central dans la modélisation du climat, la planétologie, l'observatoire SIRTa et la gestion de bases de données. Étroitement lié au CNES, il exploite des données spatiales, conçoit des instruments de télédétection, et développe des dispositifs pour ballons stratosphériques. Ses recherches associent théorie, observation et modélisation numérique pour étudier climat, environnement, pollution et atmosphères planétaires, en s'attachant aux processus dynamiques et physiques des phénomènes météorologiques. Le LMD est implanté sur trois sites à Sorbonne Université, l'Ecole Normale Supérieure et l'Ecole Polytechnique.

2.2 CONTEXTE

Le présent projet s'inscrit dans le cadre de la préparation de la mission spatiale FLEX (*Fluorescence Explorer*) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) dont l'objectif est de cartographier la photosynthèse à l'échelle globale en se basant sur la fluorescence chlorophyllienne de la végétation.

En effet, la fluorescence chlorophyllienne est un indicateur essentiel pour étudier le fonctionnement physiologique des écosystèmes terrestres par télédétection spatiale. Contrairement à la réflectance, utilisée pour calculer des indices spectraux de végétation, la fluorescence de la chlorophylle est directement liée au bilan d'énergie de la photosynthèse. La SIF (Fluorescence chlorophyllienne Induite par le Soleil) est généralement considérée comme résultant de composantes biochimiques et structurales liées à la composition pigmentaire et à l'architecture du couvert végétal, ainsi que de composantes physiologiques déterminées par

l'efficacité de la conversion photochimique et la dissipation thermique de l'excédent d'énergie absorbée par l'appareil photosynthétique. Les partenaires de cette proposition (LMD, ESE) ont développé un prototype d'instrument passif de télédétection *in situ* (mesure de la SIF) et un prototype de micro-lidar de fluorescence pour la télédétection active *in situ* (mesure de la Fluorescence chlorophyllienne Induite par une source LED ou LIF) qui ont été déployés sur un site ICOS, le site forestier de Barbeau-Fontainebleau. Le présent appel d'offre vise à dupliquer avec des améliorations les systèmes de mesure couplées active/passive déployés sur le site expérimental forestier de Barbeau-Fontainebleau de manière à équiper trois nouveaux sites français du réseau ICOS et échantillonner une plus grande variété de types de végétation.

3. OBJET DU MARCHE

Dans le cadre d'une collaboration entre l'ESE et le LMD, l'ESE s'équipe de quatre instruments de télédétection *in situ* pour la mesure active et passive de la fluorescence chlorophyllienne et de la réflectance du couvert végétal, dénommés SILI-Fluo (Sun Induced and LED Induced Fluorescence), qui seront exploitées par les deux laboratoires dans le cadre de leurs projets de collaboration scientifique. Ces instruments seront déployés sur quatre stations de mesure *in situ* représentatives de biomes différenciés et effectueront des mesures en continu. Les données récoltées seront transférées sur une plateforme informatique, traitées et mises à la disposition de la communauté scientifique, en particulier celles œuvrant dans le cadre de la calibration et validation des données de la mission FLEX.

Le présent marché se subdivise en deux tranches :

- Une première tranche ferme T1
- Une tranche conditionnelle T2, liée à l'obtention par les Laboratoires du financement de cette dernière.

La tranche T1 du présent marché concerne la fourniture des prestations suivantes :

1 - En se basant sur les instruments développés et construits par le LMD et l'ESE (maquettes) et utilisés actuellement sur la station forestière de Barbeau, construction et mise en service d'un premier prototype (SILI-Fluo 1.1) d'instrument de télédétection du couvert végétal *in situ* pour la mesure des variables suivantes :

- La fluorescence chlorophyllienne induite par le soleil (SIF) dans les bandes d'absorption telluriques O2-A et O2-B de l'oxygène atmosphérique par la mise en œuvre d'un spectromètre modèle HR1 ou HR1-T de la société ASEQ Instruments (<https://www.aseq-instruments.com/>, Vancouver, Canada).
- Le spectre de réflectance visible et proche infrarouge (400-800 nm) par la mise en œuvre d'un spectromètre modèle LR1 de la société ASEQ Instruments.
- La fluorescence chlorophyllienne induite par les impulsions lumineuses d'une LED.
- Le spectre de la lumière incidente (400-800 nm).
- Le rayonnement photo-synthétiquement actif (PAR) incident.
- Le PAR incident diffus et le PAR incident direct.

- Le PAR transmis sous couvert sur les sites non équipés.
- La mesure de la température de surface du couvert végétal par infra-rouge.

2 - Tests et calibration (et améliorations) du prototype SILI-Fluo 1.1 en laboratoire et évaluation des performances.

3 - Installation du prototype SILI-Fluo 1.1 *in situ* sur la station de mesure écosystémique de Barbeau-Fontainebleau, évaluation de ses performances *in situ* et améliorations. Suivi en continu et sauvegarde des données sur une plateforme centralisée. Mise en place d'outils de suivi des mesures.

4 - Fourniture d'outils informatiques de suivi en temps réel et de traitement des données brutes pour arriver à des données scientifiquement exploitables, comprenant :

- Le contrôle du fonctionnement des instruments, le filtrage des signaux mesurés, le contrôle qualité des mesures et le calcul d'indicateurs de qualité des mesures.
- L'extraction de la fluorescence induite par le soleil à partir des spectres de luminance du rayonnement incident et réfléchi selon différents algorithmes disponibles dans la littérature.
- Le spectre de réflectance visible et proche infrarouge (400-800 nm).
- La fluorescence induite par impulsion lumineuse et luminance de la zone visée.
- Le rayonnement photo-synthétiquement actif (PAR).
- Le spectre de la lumière incidente (400-800 nm).
- La mesure de la température de surface du couvert végétal (T_{surface}) et du rayonnement incident direct (PAR direct) et diffus (PAR diffus) au-dessus du couvert végétal et transmis sous couvert (végétal) dans le spectre visible (PAR transmis). Pour le PAR transmis sur les sites non équipés, le titulaire prendra en charge l'installation des capteurs et l'acquisition des données.

La tranche T2 du présent marché concerne la fourniture des prestations suivantes :

1 - Duplication du prototype SILI-Fluo 1.1 finalisé (incluant toutes les améliorations réalisées en T1) en trois exemplaires (SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3) et installation de ces instruments sur trois stations écosystémiques pour créer un réseau de mesure. Surveillance et maintenance de ce réseau pendant la durée du contrat

2 - Mise en place d'un traitement automatisé de l'ensemble des données du réseau de mesure sur la base des outils informatiques développés en T1 et d'un stockage centralisé et organisé des données brutes et traitées avec une interface utilisateurs adaptée selon un modèle d'architecture à définir. Ces outils incluent des scripts de traitement, des modules d'analyse et des routines de contrôle qualité des données listées en 3-1 (Tranche T1 du marché). Ces outils s'appuient sur une infrastructure matérielle dédiée, située à l'ESE, comprenant un espace de stockage centralisé et un serveur permettant d'organiser et d'archiver l'ensemble des données brutes et traitées. L'architecture retenue intègre également une interface utilisateur adaptée, conçue pour faciliter l'accès, la visualisation et l'exploitation des données issues du réseau de mesure.

L'ensemble constitue une chaîne opérationnelle complète, depuis la collecte automatisée jusqu'à la mise à disposition des résultats aux utilisateurs extérieurs. La section 4.3 (Description des outils informatiques) explicite les objectifs, les fonctionnalités et le rôle des outils informatiques développés dans la chaîne de traitement.

Plan de développement :

L'exécution des travaux se déroulera suivant le plan de développement suivant :

Phase principale	Activité / Objectif	Période / Échéance prévisionnelle
Conception initiale	Développement SILI-Fluo 1.1 / Outils informatiques	Automne-hiver 2026
Préparation laboratoire maquette	Développement d'une maquette de l'instrument au laboratoire	Hiver 2026-2027
Préparation laboratoire prototype	Montage / Calibration SILI-Fluo 1.1	Mars-avril 2027
Déploiement terrain Tranche I	Installation hiver / Développement / Validation	Mai-juin 2027
Validation sur site Tranche I	Acquisition / Validation sur site Modifications et améliorations de SILI-Fluo 1.1	Été 2027
Finalisation Tranche I	SILI-Fluo 1.1 disponible pour duplication	Automne 2027
Préparation laboratoire Tranche II	Montage / Calibration Instruments 2 à 4 (SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3) à partir du SILI-Fluo 1.1 finalisé	5-6 mois après le début de T2
Déploiement terrain Tranche II	Installation hiver / printemps / début été sur sites expérimentaux partenaires	8-11 mois après le début de T2 En été
Acquisition Tranche II	Collecte des données sur sites	Jusqu'à la fin du 14 ^{ème} mois après le début de T2

Développement logiciel final	Finalisation outils informatiques / Plateforme web accessible aux utilisateurs	15 ^{ème} mois après le début de T2
-------------------------------------	--	---

Modalités de prise en charge par les Laboratoires des équipements et consommables pour chacune des deux tranches (T1 et T2) :

Tous les composants ainsi que les consommables courants nécessaires à la réalisation des prestations seront fournis directement par les Laboratoires.

Pour les équipements nécessitant une fabrication spécifique (par exemple : pièces mécaniques, impressions 3D, circuits imprimés, cartes électroniques et autres réalisations techniques) :

Le Titulaire s'engage à fournir toutes les informations nécessaires pour son approvisionnement en matière première, consommable, fabrication à façon strictement nécessaire à la réalisation des prestations du marché. Le titulaire formulera ses demandes dans un délai raisonnable permettant aux Laboratoires de l'approvisionner dans les délais voulus, sans compromettre les délais du marché.

Une liste des composants qui seront ainsi fournis au Titulaire pour la réalisation des prestations est présente en Annexe F. Cette liste couvre l'essentiel des besoins en équipements, consommables et fabrication à façon nécessaire à la réalisation des prestations.

Le titulaire reste responsable de l'exécution des prestations dans les délais impartis.

En cas d'oubli ou d'omission dans le CCTP (et/ou ses annexes) de dispositions ou de documents et de plans nécessaires à l'exécution du Marché, il appartient au Titulaire de se rapprocher, dans les plus brefs délais, du CNRS en vue de collecter les informations nécessaires.

4. DESCRIPTION DES EQUIPEMENTS ET / OU PRESTATIONS OBJET DU MARCHÉ

Par équipements, il est sous-entendu :

- Les systèmes de mesure passive de la fluorescence chlorophyllienne et de la réflectance des couverts végétaux.
- Les systèmes de mesure active (LED) de la fluorescence chlorophyllienne.
- Les outils informatiques de traitement des mesures, de stockage et de partage en ligne des données brutes et élaborées.

4.1 DESCRIPTION DES SYSTÈMES DE MESURE PASSIVE

En ce qui concerne les systèmes de mesure passive, la mission du Titulaire est de fabriquer, calibrer, valider et installer sur site quatre instruments de mesure passive de la fluorescence chlorophyllienne induite par le soleil (SIF) et de la réflectance des couverts végétaux (instruments

SIF de SILI-Fluo). La localisation et les caractéristiques des sites d'installation sont précisées en Annexe E. Ces instruments fonctionneront selon les principes de fonctionnement de l'instrument de mesure passive de SIF (nommé SIF3) installé sur le site ICOS de Barbeau-Fontainebleau (Fr-Fon) géré par l'ESE, et décrit dans les Annexes A, C et D. Les performances de ces instruments seront à minima celles de l'instrument SIF3 et sont décrites dans les annexes A et G. Les améliorations demandées au Titulaire sont détaillées au paragraphe 4.1.2.

4.1.1 Description de l'instrument SIF3

SIF3 se compose de trois modules :

- Une tête optique positionnée à une distance d'environ 10 mètres au-dessus de la cime des arbres (description détaillée Annexe A).
- Un boîtier instrumental qui contient les spectromètres et un mini-ordinateur pour l'acquisition, la sauvegarde des données et le contrôle-commande (description détaillée Annexe A).
- Un boîtier d'alimentation et de connexion au réseau informatique du site.

La tête optique est reliée au boîtier instrumental par deux fibres optiques et des câbles électriques de 15 m de long.

Une description détaillée de l'instrument SIF3 est fournie en Annexe A, complétée par les articles scientifiques de Balde et al. 2024 (Annexe C) et Li et al. 2025 (Annexe D).

Balde et al., 2024: Data-based investigation of the effects of canopy structure and shadows on chlorophyll fluorescence in a deciduous oak forest, Biogeosciences, 21, 1259–1276.

Li et al., 2025: Atmospheric dryness effects on canopy chlorophyll fluorescence and Gross Primary Production (GPP) in a deciduous forest during heat waves, Remote Sensing of Environment, 333,115148.

Les exigences techniques attendues pour les instruments SILI-Fluo pour les mesures passives de SIF sont basées sur les performances de l'instrument SIF3 et sont détaillées en Annexe G.

4.1.2 Améliorations de l'instrument de mesure passive demandées au Titulaire

Le titulaire devra proposer des solutions techniques permettant d'améliorer la représentativité spatiale de la surface visée lors des mesures passives de fluorescence chlorophyllienne du couvert. Ces solutions utilisant ou non un "cosine corrector" ou d'autres dispositifs optiques équivalents doivent être intégrées au SILI-Fluo 1.1 pour être évaluées en comparaison avec le système existant sur le site de Barbeau-Fontainebleau durant la Tranche 1 (T1). Ce qui suppose que le prototype SILI-Fluo 1.1 intègre la possibilité de revenir au design optique de l'instrument actuellement utilisé si ses performances ne sont pas concluantes.

Le titulaire devra proposer une procédure de re-calibration des instruments sur site en concertation avec les Laboratoires

4.2 DESCRIPTION DES SYSTÈMES DE MESURE ACTIVE

4.2.1 Description de l'instrument de mesure active (LIF)

Les candidats à cet appel d'offre devront se référer à l'article scientifique fourni en annexe B, qui constitue un document de référence pour l'élaboration des solutions proposées.

Moya, I., Loayza, H., López, M.L., Quiroz, R., Ounis, A., and Goulas, Y. (2019). Canopy chlorophyll fluorescence applied to stress detection using an easy-to-build micro-lidar. Photosynthesis Research 142, 1-15.

Dans cet article l'instrument de mesure de la LIF (ou instrument LIF) est appelé LEDFLEX.

Cette description détaillée en Annexe B est complétée par les articles scientifiques de Balde et al. 2024 (Annexe C) et Li et al. 2025 (Annexe D), cités ci-dessus.

Les exigences techniques attendues pour les instruments SILI-Fluo pour les mesures actives de LIF sont basées sur les performances de l'instrument LIF appelé LEDFLEX décrites en Annexe B et les améliorations demandées au Titulaire au paragraphe 4.2.2. Elles sont détaillées en Annexe G.

4.2.2 Améliorations de l'instrument de mesure active demandées au Titulaire

Le Titulaire étudiera les possibilités d'améliorer la portée de l'instrument de mesure active, notamment par la mise en œuvre de sources électroluminescentes (LED) de plus fortes puissances disponibles sur le marché, tout en respectant les conditions de sécurité oculaire pour l'utilisateur et les personnes environnantes.

Les autres améliorations attendues concernent :

- Fréquence des impulsions variables sur une gamme allant de 1Hz à 1 kHz au minimum. Cette fréquence sera contrôlable à distance par l'utilisateur, ou en fonction d'une séquence horaire prédéfinie ou du niveau d'éclairement solaire reçu par la végétation observée.
- Utilisation de circuits numériques pour la gestion des synchronisations (impulsions lumineuses, déclenchement de l'acquisition), afin d'apporter plus de souplesse et de fiabilité à l'instrument.
- Etude des possibilités d'amélioration du rapport signal à bruit, notamment par l'échantillonnage complet de l'impulsion de fluorescence détectée.
- Calibration radiométrique du rayonnement solaire réfléchi par la cible dans la bande de fluorescence (radiances LIF).

4.3 DESCRIPTION DES OUTILS INFORMATIQUES

La description ci-dessous vient en complément des outils informatiques de suivi en temps réel et de traitement des données brutes pour arriver à des données scientifiquement exploitables détaillées au paragraphe 3, Tranche T1, point 4.

Le Titulaire devra proposer et développer des outils informatiques intégrés permettant l'acquisition et la gestion complète des mesures de fluorescence chlorophyllienne à l'échelle du couvert végétal et de l'ensemble des autres données acquises par les instruments SILI-Fluo. Ces outils devront assurer :

- (i) l'enregistrement automatique et en continu des données issues des instruments SILI-Fluo,
- (ii) le stockage sécurisé en temps réel ou au plus dans les 24 heures de l'ensemble des mesures sur un serveur dédié installé à l'ESE,
- (iii) le traitement et l'élaboration des produits finis de fluorescence à partir des algorithmes existants,
- (iv) la mise en forme des données brutes et élaborées en vue de leur distribution dans des formats standards tels que CSV et netCDF
- et v) les interfaces de connexion par internet et les outils nécessaires permettant aux utilisateurs de télécharger les données.

Les solutions proposées devront couvrir aussi bien les mesures passives de fluorescence du couvert que les mesures actives ainsi que l'ensemble des autres mesures réalisées par SILI-Fluo, en garantissant la traçabilité, la fiabilité et la compatibilité des sorties avec les systèmes d'archivage et de diffusion scientifique.

En concertation avec les Laboratoires, le Titulaire aura également la charge de **recenser et documenter les différents algorithmes d'extraction de la fluorescence chlorophyllienne** à partir des mesures passives disponibles dans la littérature scientifique du domaine. Cette revue devra inclure, entre autres, les approches couramment utilisées telles que : **FLD (Fraunhofer Line Discrimination)** et ses variantes (**sFLD**, **3FLD**, **iFLD**), la **SFM (Spectral Fitting Method)**. Plus précisément, les algorithmes et les produits de fluorescence développés devront être **compatibles avec les produits qui seront élaborés dans le cadre de la mission FLEX de l'ESA**, afin d'assurer une cohérence scientifique et technique avec les standards internationaux en cours de définition.

Langage de programmation et solutions informatiques

Le Titulaire devra mettre en œuvre des solutions informatiques reposant sur des technologies ouvertes et pérennes.

L'environnement informatique de pilotage de SILI-Fluo et de gestion de l'acquisition des mesures brutes qu'il effectuera en continu devra être réalisé entièrement en C ou en C++. Cette interface informatique de pilotage et de gestion de l'acquisition des mesures de SILI-Fluo devra être accessible et modifiable à distance via une liaison internet de manière à pouvoir agir à distance sur le fonctionnement de SILI-Fluo et régler à distance les problèmes (pannes) dépendant directement ou indirectement de la partie informatique de SILI-Fluo.

Le développement des outils de traitement, de gestion et de distribution des données devra être réalisé en **Python**, afin de garantir la compatibilité avec les bibliothèques scientifiques existantes (numpy, pandas, xarray, netCDF4, etc.) et de faciliter l'intégration avec les chaînes de traitement internationales.

Pour le stockage et la gestion des données, les candidats devront privilégier l'utilisation d'**outils de base de données open source** (par exemple PostgreSQL/PostGIS, MySQL/MariaDB, ou équivalents), garantissant la robustesse, la scalabilité et l'interopérabilité avec les standards scientifiques. Les solutions proposées devront permettre une intégration transparente avec les formats de sortie exigés (CSV, netCDF) et assurer la traçabilité, la sécurité et la disponibilité des données.

4.4 LISTE DES DONNEES ATTENDUES

- Données mesurées (mesures spectrales brutes)

Variable	Description	Format attendu
Spectres de radiance mesurée	Données spectrales dans les bandes visible et NIR (O2-A, O2-B)	Spectres brut et corrigé radiométriquement (nm, DN et $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$)
Irradiance incidente	Spectre solaire mesuré	Spectres brut et corrigé radiométriquement (nm, DN et $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$)
Fluorescence LIF	Niveau de fluorescence F_s	Volts
Radiance LIF	Radiance de la surface observée dans l'intervalle spectral de la mesure de la LIF	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$

- Variables intermédiaires (issues d'un traitement des données mesurées)

Variable	Description	Format attendu
Fluorescence SIF brute estimée	Résultats des algorithmes (FLD, sFLD, 3FLD, iFLD, SFM, etc.)	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$
Indices spectraux dérivés	NDVI, mNDI, NIRv, etc.	Indices numériques

Fluorescence Fo issue du LIF	Fluorescence LIF à l'obscurité (la nuit)	Volts
---	--	-------

- Variables de sortie (produits finis)

Variable	Description	Format attendu
SIF O2-A	Fluorescence extraite autour de 760 nm	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$
SIF O2-B	Fluorescence extraite autour de 687 nm	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$
SIF intégrée	Fluorescence totale sur le spectre d'émission de la fluorescence	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$
LIF	F _s , F _o , radiance	(Volts, $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)
PAR	Rayonnement photo-synthétiquement actif	micro-Mol $photons \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
PAR direct	PAR incident direct	micro-Mol $photons \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
PAR diffus	PAR incident diffus	micro-Mol $photons \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
PAR transmis	PAR transmis sous couvert	micro-Mol $photons \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
T_surface	Température de surface du couvert végétal mesurée par infrarouge	°C ou °K

- Compatibilité FLEX

Variable	Description	Format attendu
-----------------	--------------------	-----------------------

Produits SIF harmonisés	Données compatibles avec FLEX (spectre complet de 670 nm à 780 nm comprenant les régions spectrales des bandes O2-A et O2-B)	netCDF, CSV
--------------------------------	--	-------------

- **Tableau – Données contextuelles / Métadonnées de mesure**

Type de données	Exemples	Format
Métadonnées instrumentales	Calibration, gain, bruit, températures des équipements de mesure.	Valeurs numériques / métadonnées techniques
Données de qualité (QA/QC)	Rapport signal/bruit, indicateurs d'incertitude, flags de validité	Numériques, texte
Données géométriques	Angle solaire (azimut, zénith), angle de vue du capteur	Degrés (°)
Données environnementales	Température, pression, humidité, rayonnement direct, rayonnement diffus (disponibles sur les sites de mesures)	°C, hPa, %, indices
Horodatage et localisation	Date/heure, coordonnées GPS du site	ISO 8601, Latitude/Longitude

Données contextuelles et métadonnées

Les données contextuelles devront être fournies systématiquement, aussi bien pour les données brutes que pour les données élaborées. Un travail de réflexion devra être mené par le Titulaire et les Laboratoires afin d'élaborer les solutions techniques permettant de garantir la disponibilité et la compatibilité de l'ensemble, ou d'une partie, de ces données pour toutes les variables. Ces variables devront être produites aux différentes résolutions temporelles requises, incluant la résolution instantanée, la résolution à la minute, la résolution semi-horaire, et en cohérence avec les données micrométéorologiques et de flux de CO₂ et d'H₂O disponibles sur les sites expérimentaux.

4.5 PROTOCOLES DE MESURES

Les protocoles détaillés seront fournis par les Laboratoires. Ces protocoles incluent notamment les procédures de prise de mesure (mesures actives, mesures passives avec les spectrophotomètres ASEQ, capteurs de PAR et de température infrarouge, etc.), de calibration, de validation et de maintenance des instruments, ainsi que les standards de collecte et de traitement des données. Seront également fournis les drivers et les sous-programmes **Labview** (VIs) utilisés actuellement pour les mesures. Les candidats devront démontrer la compatibilité de leurs outils avec ces équipements et protocoles, et garantir une interopérabilité complète avec les pratiques établies par les Laboratoires.

Le Titulaire devra s'assurer que les solutions proposées respectent strictement ces spécifications, tant au niveau matériel qu'au niveau méthodologique.

4.6 VALORISATION

Le Titulaire devra indiquer s'il souhaite être disponible pour participer à des publications scientifiques communes avec les Laboratoires et les équipes partenaires, sur les résultats scientifiques issus des mesures réalisées, au cours des étapes 6 et 10 (cf. paragraphe 10) notamment, par les instruments SILI-Fluo installés dans le cadre du marché.

5. DOCUMENTS APPLICABLES

5.1 LANGAGES INFORMATIQUES ET LOGICIELS

Dans le cadre de cet appel d'offre, les développements informatiques seront réalisés en utilisant des langages robustes et largement éprouvés tels que **Python**, **C++** et **C**. L'ensemble des outils informatiques employés devra s'appuyer sur des **logiciels Open Source**, incluant notamment les solutions de **CAO** (mécanique et électronique), les **logiciels de gestion de bases de données**, ainsi que des outils de visualisation tels que **Grafana**. Les suites bureautiques utilisées seront au format **OpenOffice ou LibreOffice**, tout en garantissant la compatibilité avec les formats Microsoft (**Word**, **Excel**, **PowerPoint**) pour la production des rapports d'étapes, livrables et documents contractuels. Les données seront fournies et échangées sous forme de **fichiers CSV** et de métadonnées au format **NetCDF**, assurant une interopérabilité optimale. Les plans 2D et 3D seront transmis dans des **formats standards de CAO**, lisibles par des logiciels libres, et systématiquement accompagnés d'un **export PDF** pour consultation.

5.2 ANNEXES AU CCTP

5.2.1 Annexes A : Description de l'instrument SIF3

L'instrument de mesures passives de la fluorescence chlorophyllienne des couverts végétaux installé sur le site expérimental de Barbeau-Fontainebleau, SIF3, et qui sert de modèle pour la réalisation de SILI-Fluo est décrit en détail en Annexe A.

5.2.2 Annexe B : Description de l'instrument de mesure active de la fluorescence chlorophyllienne des couverts végétaux

L'instrument de mesures actives de la fluorescence chlorophyllienne des couverts végétaux installé sur le site expérimental de Barbeau-Fontainebleau, LIF, et qui sert de modèle pour la réalisation de SILI-Fluo est décrit en détail en Annexe B dans :

Moya, I., Loayza, H., López, M.L., Quiroz, R., Ounis, A., and Goulas, Y. (2019). Canopy chlorophyll fluorescence applied to stress detection using an easy-to-build micro-lidar. Photosynthesis Research 142, 1-15.

Dans cet article l'instrument LIF est appelé LEDFLEX.

5.2.3 Annexe C : Article scientifique Balde et al., 2024

Balde et al., 2024 : Data-based investigation of the effects of canopy structure and shadows on chlorophyll fluorescence in a deciduous oak forest, Biogeosciences, 21, 1259 – 1276.

5.2.4 Annexe D : Article scientifique Li et al., 2025

Li et al., 2025: Atmospheric dryness effects on canopy chlorophyll fluorescence and Gross Primary Production (GPP) in a deciduous forest during heat waves, Remote Sensing of Environment, 333,115148.

5.2.5 Annexe E : Sites expérimentaux ICOS partenaires

Liste des stations écosystémiques expérimentales du réseau ICOS partenaires et liens vers ICOS

5.2.6 Annexe F : Liste des principaux équipements qui seront fournis au Titulaire

Liste des principaux équipements qui seront fournis au Titulaire pour la réalisation des prestations. Cette liste couvre l'essentiel des besoins en équipements du commerce, consommables et fabrication à façon nécessaire à la réalisation des prestations.

5.2.7 Annexe G : Exigences techniques pour les instruments SILI-Fluo

Liste des exigences techniques attendues pour les instruments SILI-Fluo.

6. CONSISTANCE ET ETENDUE DES FOURNITURES

Toutes les fournitures et services citées ci-dessous devront correspondre aux spécifications, procédures, règles et normes définies dans les présentes spécifications techniques et en vigueur à la date de base des conditions économiques du contrat.

Le périmètre des fournitures et des services à fournir par le Titulaire est décrit dans les paragraphes ci-après :

- Toutes les études complémentaires, activités, expertises, conceptions, plans, mises au point et qualification de procédés, assemblages, installations, contrôles et tests listés ci-après sont à réaliser sous la responsabilité du Titulaire.
- L'équipement spécifique nécessaire au transport des instruments SILI-Fluo et à leur montage et installation complète sur les sites expérimentaux des stations écosystémiques ICOS partenaires.

6.1 PERIMETRE PHYSIQUE

La fourniture du Titulaire comprend le matériel suivant :

6.1.1 Les descriptions détaillées des instruments servant de modèle
Présent au document en annexe A et B, complétées par les annexes C et D.

6.1.2 Les documents livrables
Détail dans le paragraphe 6.4 de ce document.

6.2 PERIMETRE CONTRACTUEL DES SERVICES

Les actions du Titulaire contiennent l'ensemble des tâches nécessaires à l'expertise du dossier et la fabrication, l'adaptation éventuelle, à la mise en place et à la mise en service des équipements.

La prestation du Titulaire inclut les activités suivantes (liste non-exhaustive) :

- Le chargé d'affaires (ou chef de projet), le correspondant technique et le responsable assurance qualité du Titulaire sont ceux cités dans son offre technique.
- Assurer le suivi du projet et proposer les sous-traitants.
- Concevoir et réaliser le matériel nécessaire au transport, au montage/démontage et la mise en place des instruments.

- Procéder à des contrôles préliminaires au laboratoire à chaque étape de la fabrication.
- Assurer le suivi des exigences techniques pour tous les éléments sensibles à une utilisation en continue sur le long terme des Instruments
- Réaliser des contrôles aux différents stades de la production, des montages d'essais et de l'installation.
- Fournir le matériel annexe nécessaire à la mise en place et rendre le matériel opérationnel.
- Assurer l'emballage et le déchargement sur les sites
- Effectuer le montage, la mise en place et le positionnement des Instruments sur les sites

Après la mise en place du matériel, et en présence des représentants des Laboratoires, le Titulaire doit :

- Procéder à la validation du fonctionnement optimal des Instruments
- Procéder à la validation du fonctionnement optimal des outils informatiques de suivi en temps réel et de traitement des données brutes pour arriver à des données scientifiquement exploitables
- Fournir les documents, certificats, comptes rendus de mesures, comptes rendus de réunion, dossiers de fabrications et de calcul, fichiers informatiques de conception (3D et 2D).
- Fournir tous les éléments nécessaires à l'installation et à l'utilisation de tous les outils informatiques développés : logiciels avec leur code source informatique commenté, modes d'emploi détaillés pour l'installation et l'utilisation, etc.

6.3 COMPETENCES ET MOYENS ATTENDUS A L'EXECUTION DU MARCHE

Les compétences techniques exigées pour la réalisation des prestations sont les suivantes (liste non-exhaustive) :

- **Maîtrise de la gestion de projet** : planification, suivi, reporting, coordination multi-acteurs (laboratoires partenaires, responsables de sites, fournisseurs, etc.).
- **Maîtrise de l'optique instrumentale** : conception, assemblage et calibration de systèmes optiques et spectroradiométriques.
- **Capacité à assurer le pilotage complet et l'intégration de spectromètres ASEQ**
- **Maîtrise de l'électronique et de l'intégration de capteurs** : conception de cartes électroniques, intégration de modules de mesure et interfaces de communication.

- **Capacité à réaliser des installations scientifiques en milieu naturel** : déploiement et maintenance d'instruments de mesure en milieu naturel (observatoires naturels, observatoires climatiques, sites ateliers de recherche, etc.).
- **Capacité à mobiliser et intégrer un large éventail de métiers** : mécanique de précision, optique, électronique, informatique, traitement du signal.
- **Maîtrise des processus de fabrication mécanique** : usinage, impression 3D, assemblage, contrôle qualité, respect des tolérances.
- **Maîtrise des techniques de calibration et validation d'instruments d'optique, notamment spectrométriques** : en laboratoire et en conditions *in situ*, selon les protocoles scientifiques en vigueur.
- **Capacité à valider et finaliser les dossiers de fabrication** : utilisation de logiciels de CAO/FAO et fourniture des fichiers informatiques « bon pour exécution ».
- **Compétences en métrologie d'instruments optiques en milieu naturel** : mesures de fluorescence, réflectance et paramètres radiométriques, avec gestion des contraintes environnementales (température, humidité, stabilité mécanique).
- **Maîtrise des outils informatiques de traitement de données scientifiques** : programmation python, filtrage, contrôle qualité, extraction de signaux spectraux, mise en place de bases de données et interfaces utilisateurs.
- **Connaissance des normes et certifications applicables** : ISO, CE, normes de sécurité électrique et optique, ainsi que les standards scientifiques (formats de fichiers d'échanges, horodatage, etc.) cités au §5 du CCTP.

Les moyens et méthodes employés par le Titulaire seront conformes à ceux proposés dans son offre technique.

Les prestations devront être réalisées par un personnel qualifié utilisant des méthodes et procédures conformes aux attentes formulées dans le présent CCTP.

6.4 LISTE DES DOCUMENTS ATTENDUS A LA LIVRAISON

Pour chaque pièce fabriquée, le Titulaire devra fournir au minimum les documents suivants :

- Plans 2D et/ou 3D en format CAO standard et copies en PDF.

Les livrables suivants seront à fournir sous forme informatique pour l'ensemble :

- Le dossier de fabrication complet comprenant : les plans de fabrication validés, plans d'implantations des différents composants.
- Schémas des circuits électriques et électroniques, plans des cartes électroniques (circuits imprimés, implantation des composants, etc.).
- Les codes sources des logiciels fournis avec leur documentation complète.
- Procédures d'intégration des différents éléments de SILI-Fluo.
- Les rapports de contrôles.
- Les rapports de test (tests de fonctionnement, d'incertitude de mesures, de validation des logiciels, etc.).
- Les rapports de calibration radiométrique

- La documentation associée (modes opératoires de fabrication et de contrôle, de montage et de démontage, procédure de mise en place, dossier d'installation sur site, etc...).
- Les comptes rendus de réunion (à rédiger par le Titulaire et validés par les Laboratoires).
- Les fichiers informatiques devront être lisibles et exploitables par les logiciels libres (LibreOffice, OpenOffice ...), tout en garantissant la compatibilité avec les formats Microsoft (**Word, Excel, PowerPoint**) et pdf.
- Tout autre format devra faire l'objet d'une autorisation écrite des Laboratoires

6.5 EXIGENCES LIEES A LA QUALITE

Le responsable du suivi de projet du Titulaire informera les Laboratoires de l'évolution qualité du projet, ainsi que de tous les incidents ou difficultés rencontrées.

Un planning détaillé des différentes étapes de fabrication est également à fournir par le Titulaire du marché.

6.5.1 Maîtrise des procédures

Les Laboratoires se réservent la possibilité d'effectuer à tout moment des vérifications durant toutes les opérations de fabrication, de mesures ou de tests des éléments.

Ces opérations pourront, en outre, porter sur le respect des exigences en matière de qualité. Le Titulaire devra assurer le même respect de la qualité de la part de sa sous-traitance.

6.5.2 Audits / Vérifications

Le Titulaire facilitera les tâches de vérification faites par les Laboratoires ou par son mandataire pour les audits qualité, les inspections ou les visites de surveillance.

Il donnera libre accès aux emplacements et à la documentation nécessaire, et fera en sorte qu'il en soit de même chez ses prestataires éventuels.

6.5.3 Documentation requise

Le plan particulier de management qualité du projet, rédigé par le Titulaire et fourni dans le cadre de son offre technique, décrit les dispositions prises en matière de qualité pour :

- La vérification des plans ou documents édités dans le cadre du projet (procédures, etc.).
- La fabrication et les contrôles associés.
- La relation client (organisation, communication).
- Le système de traitement des anomalies ou non conformités.

6.5.4 Maîtrise des prestataires et fournisseurs travaillant avec le Titulaire

Le Titulaire reste responsable devant la personne publique de l'exécution du marché.

6.5.5 Gestion des anomalies et non-conformités détectées par le CNRS

Dans le cadre de la garantie constructeur, à compter de la réception définitive des prestations et pendant **12 mois**, toute anomalie détectée sera déclarée par une fiche de non-conformité dont le Titulaire sera destinataire par courrier électronique pour traitement.

Le Titulaire s'engage à remettre en service les non-conformités rencontrées sur le matériel et/ou sur les documents requis concernés par les anomalies. Les tâches correctives devront être réalisées *in situ* dans un délai fixé à **1 mois** à compter de la date de réception de la fiche de non-conformité. Le Titulaire proposera et réalisera, avec l'accord du CNRS, les tests qui valideront la correction.

Ces tests feront l'objet d'un document établi par le Titulaire attestant de la bonne réalisation des tests.

Les modifications des documents concernés devront être livrées au CNRS deux semaines au plus tard après la validation des corrections. Toutes les modifications portées sur lesdits documents seront faites en référence à la fiche d'anomalie concernée.

6.5.6 Evolution et gestion des modifications

Le Titulaire du contrat veillera à identifier les paramètres de fabrication et contrôles (matériaux, traitements, processus, gammes opératoires...) susceptibles d'influer sur la qualité et la longévité des produits fournis et informera au préalable les Laboratoires de toute modification de l'un de ces paramètres.

Toute modification ou dérogation doit faire l'objet d'une demande préalable et doit être approuvée par les Laboratoires. Si cette approbation n'intervient pas dans un délai maximum de 8 jours à compter de la réception de la demande, la modification ou la dérogation est rejetée.

Ces approbations ne dégagent pas la responsabilité du Titulaire du marché.

6.5.7 Approbation par le CNRS

L'approbation par le CNRS d'un document, d'une phase, d'un procédé, d'une solution technique signifie que le CNRS a pris connaissance du fait nécessitant cette approbation. Cela n'engage pas le CNRS quant au fond de ce fait et n'enlève donc rien de la responsabilité du Titulaire quant au résultat final puisqu'il est seul à avoir la compétence nécessaire pour y arriver.

6.6 ORGANISATION ET PILOTAGE

6.6.1 Organisation générale

Les représentants des Laboratoires sont chargés du suivi des prestations.

Le chargé d'affaires (ou chef de projet), le correspondant technique et le responsable assurance qualité du Titulaire sont ceux cités dans son offre technique.

6.6.2 Pilotage des activités

Le Titulaire est responsable de la coordination et de la maîtrise des résultats de ses activités pour fournir les équipements demandés.

6.6.3 Communication entre le CNRS et le Titulaire

Tous les échanges de nature administrative ou financière devront s'effectuer entre le Titulaire et la Délégation Île-de-France Gif-sur-Yvette (DR04 du CNRS) et seront formalisés par écrit.

Tous les échanges de nature technique entre le Titulaire et les Laboratoires devront être formalisés par écrit (courrier ou email). Une copie des échanges (courrier ou email) devra être envoyée à la Déléguée au cas où cela impliquerait une décision de modification des conditions du marché.

Tous les comptes rendus de réunion devront être formalisés par écrit (courrier ou email), rédigés par le Titulaire et validés par les Laboratoires.

6.6.4 Calendrier d'exécution

Le calendrier d'exécution du Titulaire devra impérativement suivre le plan de développement défini paragraphe 3 (Objet du marché) et s'inscrire dans le Cycle de Vie du Projet (paragraphe 10), il sera fourni dans l'offre technique du candidat. La première tranche T1 du contrat s'achèvera au plus tard le 30 novembre 2027, et la tranche T2 s'achèvera au plus tard à la fin du 17ème mois après l'affermissement de la Tranche II.

Il sera complété et optimisé en fonction des jalons liés aux activités du Titulaire. Le chemin critique sera identifié.

Il sera demandé au Titulaire de communiquer aux Laboratoires l'état d'avancement du projet lors de réunions sur une base mensuelle. Ces réunions donneront systématiquement lieu à un rapport écrit qui sera réalisé par le Titulaire et validé par les Laboratoires.

6.6.5 Chemins critiques

Le Titulaire a un devoir d'alerte.

Si le Titulaire rencontre des problèmes liés à l'exécution des marchés et si ceux-ci remettent en cause le bon fonctionnement de l'objet final ou les délais prévus initialement, le Titulaire devra en avvertir les Laboratoires et le Pôle achat de la DR4 sous 48 heures à compter de la constatation de la situation.

Les Laboratoires doivent être informés de toute déviation pouvant retarder le planning ou la qualité attendue du produit.

6.6.6 Adresse de livraison

L'adresse de livraison au laboratoire ESE est :

Laboratoire Ecologie, Société et Evolution
Université Paris-Saclay
IDEEV, Bât. 680, 12 route 128
91190 GIF sur YVETTE
France

Les localisations des sites expérimentaux ICOS pour l'installation des instruments sont données en Annexe E.

6.7 MATIERES ET APPROVISIONNEMENTS

Pour chaque pièce demandée en fabrication de l'ensemble du produit, la matière dans laquelle elle doit être réalisée est spécifiée dans les plans de fabrications détaillés proposés par le Titulaire et validés par les Laboratoires avant exécution.

Les Laboratoires sont responsables de l'approvisionnement de toutes les matières, composants, sous-systèmes sur proposition, validé par les Laboratoires, du Titulaire.

Les composants des instruments qui seront exposés directement à l'environnement extérieur (mécanique, optiques, câbles...) devront être choisis ou réalisés dans des matériaux compatibles à une exposition de très longue durée (minimum 5 ans) en extérieur (pluie, vents, poussière, rayonnement UV...) en toute saison.

7. SPECIFICATIONS TECHNIQUES DE REALISATION

Le Titulaire du contrat sera invité à intervenir dans les locaux des Laboratoires chaque fois que la situation l'exige ou qu'il en fait la demande, afin d'accéder à l'ensemble des équipements existants dans les Laboratoires nécessaires aux tests préalables, à la construction des instruments, à la validation de leur fonctionnement et aux opérations de calibration, notamment. Cette autorisation s'applique durant toutes les phases du projet de manière à garantir la disponibilité des moyens techniques indispensables au bon déroulement des travaux.

7.1 DOCUMENTS REMIS AU TITULAIRE

Toute incohérence détectée dans les éléments fournis doit impérativement faire l'objet d'une notification au CNRS.

En compléments des documents et éléments présents dans ce document et ses Annexes, les Laboratoires fourniront au Titulaire les documents ou éléments suivants :

- les drivers des spectromètres ASEQ
- les codes source en Labview des logiciels d'acquisition et de contrôle/commande des instruments SIF3 et LIF
- code source Arduino des micro-contrôleurs utilisés

- code source des procédures de traitements des données
- les protocoles de mesures avec les spectromètres ASEQ

7.2 TOLERANCES

Les instruments étant destinés à être installés sur les sites expérimentaux de stations écosystémiques, ils doivent présenter des tolérances compatibles avec des conditions environnementales variables. Ils doivent garantir la stabilité de la mesure malgré des fluctuations de température comprises entre -15°C et $+45^{\circ}\text{C}$, ainsi qu'un taux d'humidité ambiant situé entre 40 % et 100 %, notamment en forêt tropicale humide. Les instruments devront maintenir leurs performances métrologiques dans ces plages, notamment en termes de précision spectrale, de répétabilité et de dérive maximale admissible. **Ils devront impérativement être entièrement étanches, avec un niveau de protection minimal équivalent à IP65**, assurant une protection totale contre les infiltrations de poussières et contre les projections d'eau à forte pression, **sans toutefois nécessiter une résistance à l'immersion**. Ce niveau d'étanchéité garantit la protection complète des composants optiques et électroniques dans des environnements extérieurs exposés.

Toutes remarques et demandes de modification ou dérogation les concernant devront être signalées aux Laboratoires.

7.3 TEST D'ETANCHEITE A LA PLUIE

Une méthode de détection et de quantification de l'étanchéité des instruments sous une pluie de très forte intensité (projections d'eau à fort débit et forte pression) sera proposée par le Titulaire et validée par les Laboratoires.

Un test d'étanchéité à la pluie sera réalisé systématiquement pour chaque instrument lors du montage au laboratoire et dans tous les cas avant sa mise en service sur site.

7.4 TEST DES MOTEURS ET DES PIECES MECANIQUES EN MOUVEMENT

Les instruments SILI-Fluo sont des instruments qui ont pour finalité d'être installés à l'extérieur sur les sites expérimentaux pour réaliser des mesures sur les couverts végétaux en continu sur la durée, potentiellement pendant plusieurs années. La robustesse des instruments fournis par le Titulaire devra être testée et validée pour pouvoir fonctionner en extérieur sur la durée.

Les moteurs et toutes les pièces mécaniques en mouvement qui sont soumis à des contraintes plus importantes et sont susceptibles de s'user plus rapidement devront faire l'objet d'une attention particulière et potentiellement de tests spécifiques établis en concertation entre le Titulaire et les Laboratoires pour démontrer leur résistance dans un fonctionnement sur la durée.

7.5 PROCEDURE DE REMPLACEMENT PREVENTIVE DES ELEMENTS SENSIBLES

Les tests ci-dessus serviront de base au Titulaire pour fournir des procédures simples de remplacement **préventif planifié** (avant qu'elle ne tombe en panne) des pièces mécaniques

sensibles ou de remplacements des éléments d'optiques qui seraient salis ou usés par leur fonctionnement en extérieur.

Ces procédures permettront de réaliser des maintenances planifiées des instruments pour éviter qu'ils ne tombent en panne ou que la qualité des mesures qu'ils fournissent ne soit affectée par l'usure ou la salissure des éléments d'optiques.

Ces maintenances planifiées ne devraient pas excéder une à deux fois par an. Les instruments devront donc être conçus par le Titulaire avec cette contrainte et leur robustesse compatible avec cette contrainte démontrée par des tests lors de la Tranche 1.

7.6 MONTAGE AU LABORATOIRE ET CONTROLES

Le Titulaire, afin de vérifier la conformité de tous les éléments et du montage de chaque Instrument, effectuera un premier montage de chaque Instrument au laboratoire ESE.

Les contrôles du fonctionnement conforme de chaque Instrument seront réalisés sur les ensembles fabriqués et assemblés.

Ils seront effectués par le Titulaire au laboratoire ESE sous la supervision des Laboratoire sur la base des processus proposés par le Titulaire et validés par les Laboratoires.

Les contrôles donneront lieu à l'émission d'un rapport de contrôle qui sera fourni aux Laboratoires, au plus tard 15 jours après la réalisation des contrôles.

Ces contrôles porteront à minima sur :

- un test de fonctionnement conforme en continu pendant au moins 7 jours en intérieur
- un test de fonctionnement en continu de 2 semaines en extérieur (jardin expérimental du laboratoire)

8. EMBALLAGE ET TRANSPORT

L'emballage devra être conçu de manière à ce que les pièces ne subissent pas de dommage et que les éléments d'optique ne voient pas leur état de propreté dégradé pendant le stockage et le transport.

Le Titulaire joindra dans son offre technique une procédure de transport et de manutention sur site, précisant les conditions de colisage de l'équipement en vue de garantir son intégrité, qui sera validé par les Laboratoires. Il devra assurer une protection contre la poussière, l'humidité et tous chocs éventuels inhérents à la manutention et au transport.

Cette procédure indiquera les inspections à réaliser à la réception de l'équipement sur site avant le montage et l'installation de l'instrument.

Le chargement, le transport et le déchargement sur les sites expérimentaux de mesures sont de la responsabilité des Laboratoires. Le coût du chargement, du transport et du déchargement reste à la charge des Laboratoires.

Les Laboratoires prennent à leur charge les assurances nécessaires pour garantir le matériel pendant le transfert entre le laboratoire ESE et les sites expérimentaux.

Avant toute expédition, le Titulaire doit prendre contact avec les Laboratoires pour régler les aspects techniques.

9. MONTAGE ET INSTALLATION DES INSTRUMENTS SUR LES SITES EXPÉRIMENTAUX ICOS

9.1 MISE EN PLACE

Le Titulaire mettra en place pour le site expérimental forestier de Barbeau-Fontainebleau le prototype SILI-Fluo 1.1 (Tranche 1, **T1**). Puis pour la Tranche 2 (**T2**) le Titulaire mettra en place les instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3 sur les 3 autres sites expérimentaux partenaires. A chaque fois le Titulaire installera sur chaque site tout l'environnement nécessaire au fonctionnement optimal des instruments. L'installation sur site expérimental des instruments se fera en concertation avec les Laboratoires et le responsable de chacun des sites expérimentaux et avec leur l'appui. A l'issue de l'installation sur site, le Titulaire vérifiera et validera le bon fonctionnement des instruments. Un rapport d'installation sera fourni aux Laboratoires par le Titulaire.

9.2 SITUATION ET ACCES

La localisation des stations écosystémiques ICOS partenaires est précisée dans l'Annexe E. L'accès à chacun de ces sites se fera en concertation avec les Laboratoires et le responsable de chacun des sites expérimentaux et avec leur l'appui. L'installation des instruments nécessite pour certains de ces sites expérimentaux de travailler en haut de tour de grande hauteur. **L'installation des instruments nécessite la présence du Titulaire en haut de ces tours une Habilitation au Travail en Hauteur lui sera nécessaire au moment de l'installation de l'équipement sur site.**

10. CYCLE DE VIE DU PROJET

10.1 TABLEAU SYNTHETIQUE

Etapas		Phase plan développement (§ 3.) correspondante	Période / Echéance prévisionnelle	Livrables	Temps de validation pour l'ESE
N°	Titre				
1	Réunion de démarrage	Conception initiale	Automne 2026	- présentation détaillée de l'offre technique - calendrier d'exécution détaillé de la Tranche T1	Une semaine après la tenue de la réunion
2	Validation des dossiers techniques du prototype SILI-Fluo 1.1	Conception initiale	Automne-hiver 2026	- dossiers techniques complets (plan détaillés) pour l'ensemble du prototype SILI-Fluo 1.1	15 jours à compter de la réception de tous les livrables associés
3	Validation de la maquette de laboratoire du prototype SILI-Fluo 1.1	Préparation laboratoire maquette	Hiver 2026-2027 (février)	- maquette de laboratoire de SILI-Fluo 1.1 et démonstration de son bon fonctionnement en continu sur une période d'au moins 3 jours - rapports sur les tests et contrôles prévus sur cette maquette	15 jours à compter de la réception de tous les livrables associés
4	Validation au laboratoire du prototype SILI-Fluo 1.1 et sa calibration au laboratoire	Préparation laboratoire prototype	Mars-avril 2027	- montage complet (livraison , installation , mise en service) de SILI-Fluo 1.1 au laboratoire ESE et démonstration de son bon fonctionnement en continu sur une période d'au moins 7 jours - mise en fonctionnement (déplacement de l'équipement installation et mise en service) en continu de SILI-Fluo 1.1 en extérieur (jardin expérimental du laboratoire ESE) pendant au moins 2 semaines et démonstration de son bon fonctionnement sur cette période - outils informatiques pour : a) l'enregistrement automatique et en continu des données ; b) de suivi en temps réel des mesures à distance via une liaison internet et c) l'extraction de la fluorescence induite par le soleil à partir des spectres de luminance du rayonnement incident et réfléchi - rapports sur la calibration, les tests et contrôles au laboratoire et au jardin expérimental prévus sur SILI-Fluo 1.1	15 jours à compter de la réception de tous les livrables associés

5	Validation de l' installation sur le site de Barbeau-Fontainebleau du prototype SILI-Fluo 1.1, de son fonctionnement et des outils informatiques de traitement des données mesurées avant le début de la saison de végétation	Déploiement terrain Tranche I	Mai-juin 2027 <u>Date butoir de l'installation :</u> <u>31 juillet 2027</u>	- installation complète (installation mise en service) de SILI-Fluo 1.1 sur le site de Barbeau-Fontainebleau, mise en place l'ensemble des outils informatiques de suivi en temps réel et de traitements des données mesurées et démonstration du bon fonctionnement en continu sur une période d'au moins 7 jours de SILI-Fluo 1.1 et de ces outils informatiques - interface informatique de pilotage et de gestion de l'acquisition des mesures de SILI-Fluo 1.1 accessible et modifiable à distance via une liaison internet - outils informatiques pour le filtrage des signaux mesurés, le contrôle qualité des mesures et le calcul d'indicateurs de qualité des mesures - rapports sur la calibration sur site, les tests et contrôles prévus à cette étape d'installation sur site dans le calendrier d'exécution	15 jours à compter de la réception de tous les livrables associés
6	Validation sur le site de Barbeau-Fontainebleau du prototype SILI-Fluo 1.1, de son fonctionnement, des données produites et de leur traitement par les outils informatiques durant la saison de végétation	Validation sur site Tranche I	Eté 2027	- rapport sur le fonctionnement de SILI-Fluo 1.1 et des outils informatiques de suivi en temps réel et de traitements des données mesurées au cours de la saison de végétation, sur les modifications éventuelles apportées à l'Instrument et/ou aux outils informatiques et sur l'ensemble des données brutes et des produits finis (données analysées) obtenues durant la saison de végétation - fourniture aux Laboratoires, tout au long de la saison de végétation de l'ensemble des données brutes (mesure) et des produits finis (données analysées) - outils informatiques de traitement des données brutes pour arriver à des données scientifiquement exploitables, en particulier l'extraction de la fluorescence induite par le soleil à partir des spectres de luminance du rayonnement incident et réfléchi selon différents algorithmes explicités à l'article 4.3 du présent document. - outils informatiques pour le stockage sécurisé en temps réel ou au plus dans les 24 heures de l'ensemble des mesures sur un serveur dédié	Un mois à compter de la réception de tous les livrables associés

				installé à l'ESE, et pour la mise en forme des données brutes et élaborées en vue de leur distribution dans des formats standards tels que CSV et netCDF	
7	Réception du prototype SILI-Fluo 1.1 finalisé et des outils informatiques finalisés de traitements des données associés - Finalisation et remise des derniers livrables de T1	Finalisation Tranche I	Automne 2027 <u>Date butoir : 30 novembre 2027</u>	- instrument SILI-Fluo 1.1 totalement finalisé et validé avec sa documentation finale complète (dossiers techniques, mode d'emploi, etc.) - tous les outils informatiques de la tranche T1 totalement finalisés et validés avec leur documentation finale complète (code informatique, mode d'emploi, etc.) - réunion spécifique de formation et de prise en main de l'instrument SILI-Fluo 1.1 et de tous les outils informatiques de la tranche T1. - rapport final (relatif aux instruments, aux outils informatiques et aux documents de formation par le prestataire)	Deux mois à compter de la fin de l'étape 7
8	Validation au laboratoire des instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3, et leur calibration au laboratoire	Préparation Tranche II	5-6 mois après l'affermissement de la Tranche II	- montage complet de SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3 au laboratoire ESE et démonstration de leur bon fonctionnement en continu sur une période d'au moins 7 jours - mise en fonctionnement en continu de SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3 en extérieur (jardin expérimental du laboratoire ESE) pendant au moins 2 semaines et démonstration de leur bon fonctionnement sur cette période - rapports sur la calibration, les tests et contrôles au laboratoire et au jardin expérimental prévus sur SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3	15 jours à compter de la réception de tous les livrables associés
9	Validation de l'installation sur les sites expérimentaux des instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3, de leur fonctionnement et des outils informatiques de	Déploiement terrain Tranche II	Du 8 ^{ème} au 11 ^{ème} mois après l'affermissement de la Tranche II, durant l'été <u>Date butoir des</u>	- installation complète de SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3 sur les sites expérimentaux, mise en place l'ensemble des outils informatiques de suivi en temps réel et de traitements des données mesurées et démonstration du bon fonctionnement en continu sur une période d'au moins 7 jours de SILI-Fluo 1.1 et de ces outils informatiques - rapports sur la calibration sur site, les tests et contrôles prévus à cette étape dans le calendrier d'exécution	15 jours à compter de la réception de tous les livrables associés

	traitement des données mesurées		<u>installations sur sites :</u> fin du 11 ^{ème} mois après l'affermissement de la Tranche II		
10	Validation sur les sites expérimentaux des instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3, de leur fonctionnement, des données produites et de leur traitement par les outils informatiques durant la saison de végétation	Acquisition Tranche II	Jusqu'à la fin du 14 ^{ème} mois après l'affermissement de la Tranche II	- rapport sur le fonctionnement de SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3, et des outils informatiques de suivi en temps réel et de traitements des données mesurées au cours de la saison de végétation, sur les modifications éventuelles apportées aux instrument et/ou aux outils informatiques et sur l'ensemble des données brutes et des produits fini (données analysées) obtenues durant la saison de végétation - fourniture aux Laboratoires, tout au long de la saison de végétation de l'ensemble des données brutes (mesure) et des produits finis (données analysées) - mise en place d'outils informatiques pour le traitement automatisé de l'ensemble des données du réseau de mesure sur la base des outils informatiques développés en T1 et d'un stockage centralisé sur un serveur dédié installé à l'ESE des données brutes et traitées avec une interface utilisateurs adaptée	Un mois à compter de la réception de tous les livrables associés
11	Validation des outils informatiques de stockage centralisé et organisé de l'ensemble des données et de l'interface utilisateur adaptée	Développement logiciel final	15 ^{ème} mois après l'affermissement de la Tranche II	- interface de connexion par internet et les outils informatiques nécessaires permettant aux utilisateurs de télécharger les données brutes et élaborées.	Un mois à compter de la réception de tous les livrables associés
			16 ^{ème} mois après l'affermissement	- instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3 totalement finalisé et validé avec leur documentation finale	

12	Finalisation et remise des derniers livrables		ment de la Tranche II <u>Date butoir :</u> <u>fin du</u> 17^{ème} mois après l'affectation de la Tranche II	complète (dossier de fabrication, mode d'emploi, etc.) - tous les outils informatiques de la tranche T2 totalement finalisés et validés avec leur documentation finale complète (code informatique, mode d'emploi, etc.) - réunion spécifique de formation et de prise en main de tous les outils informatiques de la tranche T2. - rapport final (relatif aux instruments, aux outils informatiques et aux documents de formation par le prestataire)	Deux mois à compter de la fin de l'étape 12
----	---	--	--	---	--

10.2 DESCRIPTION DES ETAPES

10.2.1 Etape 1 (Tranche T1) : Réunion de démarrage

Il est demandé au Titulaire de produire à la réunion de démarrage :

- Une présentation détaillée de son offre technique.
- Son calendrier d'exécution détaillé de la Tranche T1.
- De présenter tous ces collaborateurs qui seront impliqués dans le projet et leur rôle et implication respective.

Ces documents seront discutés et soumis à l'approbation des Laboratoires

Toute incohérence détectée dans les éléments fournis au Titulaire doit impérativement faire l'objet d'une notification au CNRS

La date de réunion de démarrage sera fixée d'un commun accord entre les deux parties, dans la limite de quinze jours à compter de la notification du marché.

10.2.2 Etape 2 (Tranche T1) : Validation des dossiers techniques du prototype SILI-Fluo 1.1

- Sur la base de l'ensemble des documents fournis par les Laboratoires et des échanges qu'il aura eu avec les Laboratoires durant la réunion de démarrage, le Titulaire propose des dossiers techniques complets pour l'ensemble du prototype SILI-Fluo 1.1. Ces dossiers techniques contiennent notamment :
- Le calendrier d'exécution détaillé pour l'instrument complet et pour chacun de ses composants.
- L'architecture générale détaillée proposée par le Titulaire pour le prototype SILI-Fluo 1.1.
- Les solutions techniques proposées par le Titulaire sur tous les aspects pour lequel une évolution par rapport aux instruments décrits en Annexe A, B, C et D est demandée dans le présent document par les Laboratoires ou est souhaitée par le Titulaire.
- Les tests (au laboratoire ou en extérieur) prévus par le Titulaire pour valider ces solutions techniques ou pour choisir entre plusieurs options (si le cas se présente).

Ces dossiers sont étudiés par les Laboratoires puis après concertation avec le Titulaire, des modifications, s'il y a lieu, sont apportées par le Titulaire. La version finalisée de ces dossiers est validée par les Laboratoires avant l'étape 3.

10.2.3 Etape 3 (Tranche T1) : Validation de la maquette de laboratoire du prototype SILI-Fluo 1.1

Le Titulaire réalise un montage complet de la maquette de laboratoire du prototype SILI-Fluo 1.1 au laboratoire ESE et démontre son bon fonctionnement en continue sur une période d'au moins 3 jours. Il réalise tous les tests et contrôles prévus sur cette maquette dans son calendrier d'exécution validé à l'étape 2.

Lorsque tous les tests et contrôles sont conformes et satisfaisants, les Laboratoires valident la maquette de laboratoire du prototype SILI-Fluo 1.1.

10.2.4 Etape 4 (Tranche T1) : Validation au laboratoire du prototype SILI-Fluo 1.1 et sa calibration au laboratoire

Le Titulaire réalise un montage complet du prototype SILI-Fluo 1.1 au laboratoire ESE et démontre son bon fonctionnement en continue sur une période d'au moins 7 jours. Il réalise tous les tests et contrôles prévus à cette étape dans son calendrier d'exécution validé à l'étape 2.

Pour pouvoir faire fonctionner et tester le prototype SILI-Fluo 1.1, le Titulaire fournit les outils informatiques pour : a) l'enregistrement automatique et en continu des données ; b) de suivi en temps réel des mesures à distance via une liaison internet et c) l'extraction de la fluorescence chlorophyllienne induite par le soleil à partir des spectres de luminance du rayonnement incident et réfléchi.

Lorsque tous les tests et contrôles, qui incluent notamment la validation de la fluorescence chlorophyllienne induite par le soleil après son extraction à partir des spectres de luminance du rayonnement incident et réfléchi, sont conformes et satisfaisants, le Titulaire procède aux calibrations en laboratoire de SILI-Fluo 1.1.

Le prototype SILI-Fluo 1.1 est alors mis en fonctionnement en continu en extérieur (jardin expérimental du laboratoire ESE) pendant au moins 2 semaines par le Titulaire qui en démontre le bon fonctionnement sur cette période.

Lorsque tous les tests et contrôles au laboratoire et en extérieur, qui incluent notamment la validation de la fluorescence chlorophyllienne induite par le soleil après son extraction à partir des spectres de luminance du rayonnement incident et réfléchi, ainsi que les calibrations décrits ci-dessus sont conformes et satisfaisants, les Laboratoires valident le prototype SILI-Fluo 1.1 et son fonctionnement au laboratoire.

10.2.5 Etape 5 (Tranche T1) : Validation de l'installation sur le site de Barbeau-Fontainebleau du prototype SILI-Fluo 1.1, de son fonctionnement et des outils informatiques de traitement des données mesurées avant le début de la saison de végétation

Le Titulaire réalise l'installation complète du prototype SILI-Fluo 1.1 sur le site de Barbeau-Fontainebleau, il met en place l'ensemble des outils informatiques de suivi en temps réel et de traitements des données mesurées et démontre le bon fonctionnement en continu sur une période d'au moins 7 jours du prototype et des outils informatiques associés.

Le Titulaire fournit :

- une interface informatique de pilotage et de gestion de l'acquisition des mesures de SILI-Fluo 1.1 accessible et modifiable à distance via une liaison internet
- les outils informatiques pour le filtrage des signaux mesurés, le contrôle qualité des mesures et le calcul d'indicateurs de qualité des mesures

Le Titulaire réalise la calibration sur site de SILI-Fluo 1.1, tous les tests et contrôles prévus à cette étape dans son calendrier d'exécution validé à l'étape 2.

Lorsque tous les tests et contrôles ainsi que les calibrations sont conformes et satisfaisantes, les Laboratoires valident l'installation du prototype SILI-Fluo 1.1 sur le site de Barbeau-Fontainebleau et la mise en place des outils informatiques de suivi en temps réel et de traitements des données mesurées.

10.2.6 Etape 6 (Tranche T1) : Validation sur le site de Barbeau-Fontainebleau du prototype SILI-Fluo 1.1, de son fonctionnement, des données produites et de leur traitement par les outils informatiques durant la saison de végétation

A l'issue de la saison de végétation le Titulaire rédige un rapport sur le fonctionnement du prototype SILI-Fluo 1.1 et des outils informatiques de suivi en temps réel et de traitements des données mesurées au cours de la saison, sur les modifications éventuelles apportées à l'Instrument et/ou aux outils informatiques et sur l'ensemble des données brutes et des produits fini (données analysées) obtenues durant la saison.

Le Titulaire fournit :

- les outils informatiques de traitement des données brutes pour arriver à des données scientifiquement exploitables, en particulier l'extraction de la fluorescence induite par le soleil à partir des spectres de luminance du rayonnement incident et réfléchi **selon différents algorithmes disponibles dans la littérature**
- les outils informatiques pour le stockage sécurisé en temps réel ou au plus dans les 24 heures de l'ensemble des mesures sur un serveur dédié installé à l'ESE, et pour la mise en forme des données brutes et élaborées en vue de leur distribution dans des formats standards tels que CSV et netCDF

Sur la base du rapport, des analyses des mesures et des données qu'ils réalisent de leur côté au cours et à la fin de la saison de végétation et de leur utilisation des outils informatiques fournis à cette étape, les Laboratoires valident, lorsque tout est conforme, 1) le prototype SILI-Fluo 1.1, son comportement et son fonctionnement tout au long de la saison de végétation sur le site de Barbeau-Fontainebleau ; et 2) les différents outils informatiques.

10.2.7 Etape 7 (Tranche T1) : Réception du prototype SILI-Fluo 1.1 finalisé et des outils informatiques finalisés de traitements des données associés - Finalisation et remise des derniers livrables de T1

Avant la remise du rapport final, le Titulaire organisera une réunion spécifique de formation et de prise en main de l'instrument SILI-Fluo 1.1 (fonctionnement et pilotage) et de tous les outils informatiques de la tranche T1 à destination des personnels des Laboratoires impliqués dans ce projet.

Après la validation de **tous** les éléments, le prototype SILI-Fluo 1.1 totalement finalisé et validé avec sa documentation finale complète (dossiers techniques, mode d'emploi, etc.), son comportement et son fonctionnement tout au long de la saison de végétation, tous les outils informatiques de la tranche T1 totalement finalisés et validés avec leur documentation finale complète (code informatique, mode d'emploi, etc.), et le rapport final, les Laboratoires réceptionnent le prototype SILI-Fluo 1.1 et les différents outils informatiques.

10.2.8 Etape 8 (Tranche T2) : Validation au laboratoire des instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3, et leur calibration au laboratoire

Pour chacun des instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3 :

- Le Titulaire réalise un montage complet de l'instrument au laboratoire ESE et démontre son bon fonctionnement en continue sur une période d'au moins 7 jours. Il réalise tous les tests et contrôles prévus à cette étape dans son calendrier d'exécution validé à l'étape 2.
- Lorsque tous les tests et contrôles sont conformes et satisfaisants, le Titulaire procède aux calibrations de cet instrument.
- L'instrument est alors mis en fonctionnement en continue en extérieur (jardin expérimental du laboratoire ESE) pendant au moins 2 semaines par le Titulaire qui en démontre le bon fonctionnement sur cette période.
- Lorsque tous les tests et contrôles ainsi que les calibrations décrits ci-dessus sont conformes et satisfaisants, les Laboratoires valident l'instrument et son fonctionnement au laboratoire.

10.2.9 Etape 9 (Tranche T2) : Validation de l'installation sur les sites expérimentaux des instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3, de leur fonctionnement et des outils informatiques de traitement des données mesurées

Pour chacun des instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3 :

- Le Titulaire réalise l'installation complète de l'instrument sur le site expérimental qui lui a été attribué, il met en place l'ensemble des outils informatiques de suivi en temps réel et de traitements des données mesurées et démontre le bon fonctionnement en continue sur une période d'au moins 7 jours de l'instrument et des outils informatiques. Il réalise tous les tests et contrôles prévus à cette étape dans son calendrier d'exécution validé à l'étape 2.

- Le Titulaire procède aux tests de calibrations sur site de l'instrument.
- Lorsque tous les tests et contrôles ainsi que les calibrations sont conformes et satisfaisantes, les Laboratoires valident l'installation de l'instrument sur le site expérimental qui lui a été attribué et la mise en place des outils informatiques de suivi en temps réel et de traitements des données mesurées pour cet instrument et pour ce site.

10.2.10 Etape 10 (Tranche T2) : Validation sur les sites expérimentaux des instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3, de leur fonctionnement, des données produites et de leur traitement par les outils informatiques durant la saison de végétation

Le Titulaire fournit et met en place les outils informatiques pour le traitement automatisé de l'ensemble des données du réseau de mesure sur la base des outils informatiques développés en T1 et pour le stockage centralisé sur un serveur dédié installé à l'ESE et organisé des données brutes et traitées avec une interface utilisateurs adaptée

Pour chacun des instruments SILI-Fluo 2.1, 2.2 et 2.3 installé chacun sur le site expérimental ICOS qui lui a été attribué :

- A l'issue de la saison de végétation le Titulaire rédige un rapport sur le fonctionnement de l'instrument et des outils informatiques de suivi en temps réel et de traitements des données mesurées au cours de la saison, sur les modifications éventuelles apportées à l'Instrument et/ou aux outils informatiques et sur l'ensemble des données brutes et des produits fini (données analysées) obtenues durant la saison.
- Sur la base de ce rapport, des analyses des mesures et des données qu'ils réalisent de leur côté au cours et à la fin de la saison de végétation et de leur utilisation des outils informatiques fournis à cette étape, les Laboratoires valident, lorsque tout est conforme, 1) l'instrument, son comportement et son fonctionnement tout au long de la saison de végétation sur site expérimental ICOS ; et 2) les différents outils informatiques pour le site expérimental ICOS correspondant.

10.2.11 Etape 11 (Tranche T2) : Validation des outils informatiques de stockage centralisé et organisé de l'ensemble des données et de l'interface utilisateur adaptée

Le Titulaire fournit et met en place l'interface de connexion par internet et les outils informatiques nécessaires permettant aux utilisateurs de télécharger les données.

Après les avoir testés pendant et/ou après la saison de végétation de la Tranche T2 et avoir constaté qu'ils étaient totalement conformes aux attendus, les Laboratoires valident les outils informatiques de stockage centralisé et organisé de l'ensemble des données, l'interface utilisateur adaptée et l'interface de connexion par internet de téléchargement des données.

10.2.12 Etape 12 (Tranche T2) : Finalisation et remise des derniers livrables

Avant la remise du rapport final, le Titulaire organisera une réunion spécifique de formation et de prise en main de tous les outils informatiques de la tranche T2 à destination des personnels des Laboratoires impliqués dans ce projet.

Après la validation de **tous** les éléments objet de ce marché, tous les instruments totalement finalisés et validés avec leur documentation finale complète (dossier de fabrication, mode d'emploi, etc.), tous les outils informatiques totalement finalisés et validés avec leur documentation finale complète (code informatique, mode d'emploi, etc.) et le rapport final, les Laboratoires procèdent à la réception finale.

11. DEVELOPPEMENT DURABLE

Les procédés de fabrication et de traitement sont optimisés pour limiter les dépenses énergétiques et en particulier qu'ils limitent la génération de gaz à effet de serre.

Les procédés sont contrôlés en termes de rejets de produits nuisibles pour l'environnement. Le Titulaire aura décrit dans son offre la procédure qu'il utilise pour le traitement des déchets liés à la fabrication mécanique et électronique visant à réduire les impacts écologiques négatifs.

L'offre décrit la nature des emballages et du conditionnement des matériels au regard des principes de développement durable.

Le Titulaire utilisera de préférence des produits biodégradables. Il limitera l'utilisation de produits phytosanitaires en privilégiant des produits de substitution lorsque leur efficacité est comparable et leur mise en œuvre aisée.

Restrictions :

Le Titulaire n'utilisera les produits qu'en quantité strictement nécessaire.

ANNEXE A : Description de l'instrument SIF3

Annexe A

Description de l'instrument SIF3

de télédétection *in situ* de la fluorescence induite par le soleil et de la réflectance du couvert végétal

Yves Goulas¹, Abderrahmane Ounis¹, Gwendal Latouche², Hamza El Idrissi¹, Gabriel Hmimina¹, Daniel Berveiller², Kamel Soudani²

¹ Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD, UMR8539), CNRS, ENS, Ecole polytechnique, Sorbonne-Université, 91128 Palaiseau, France

² Laboratoire Écologie Société et Évolution (ESE, UMR8079), Université Paris-Saclay, CNRS, AgroParisTech, 91190 Gif-sur-Yvette, France

Table des matières de l'annexe A

1. Introduction	42
2. Description de l'instrument SIF3	42
2.1. Description de la tête optique	45
2.2. Description du boîtier instrumental	48
2.3. Description du boîtier alimentation	52
3. Description du logiciel d'acquisition et de contrôle/commande	52
3.1. Démarrage et continuité des mesures	52
3.2. Interface du logiciel	53
3.3. Sauvegarde et transfert des données	55
4. Références	56
5. Acronymes	57

1. Introduction

La fluorescence chlorophyllienne est devenue un indicateur essentiel pour étudier le fonctionnement physiologique des écosystèmes terrestres par télédétection spatiale. Contrairement à la réflectance, utilisée pour calculer des indices de végétation tels que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ou l'EVI (Enhanced Vegetation Index), la fluorescence de la chlorophylle est directement liée au bilan d'énergie de la photosynthèse. L'énergie lumineuse absorbée par les plantes est soit utilisée pour la photosynthèse, soit dissipée sous forme de chaleur via des mécanismes complexes de photoprotection, soit réémise sous forme de fluorescence dans la partie rouge et proche infrarouge du spectre (Baker et al., 2008).

Les études récentes ont révélé une corrélation significative entre fluorescence chlorophyllienne induite par le soleil (SIF, Sun-Induced Fluorescence) et production primaire brute (GPP, Gross Primary Production) des écosystèmes terrestres (Frankenberg et al., 2011), et ont mis en évidence le potentiel de la SIF pour le suivi de la réponse physiologique des plantes à des stress abiotiques tels que la sécheresse (Sun et al., 2015 ; Yoshida et al., 2015 ; Qian et al., 2019) ou l'excès de chaleur (Song et al., 2018 ; Wang et al., 2019). À l'échelle globale, la SIF est utilisée pour contraindre les modèles de prédiction de la GPP, comme le modèle ORCHIDEE (Mac Bean et al., 2018 ; Bacour et al., 2019), ou pour prédire la GPP de manière empirique (Li et al. 2019, Balde et al. 2023).

Cependant, la connaissance de la force et la forme de la relation entre SIF et GPP reste encore incertaine. La mesure de SIF par télédétection *in situ* permet de mieux expliciter ses relations avec les variables du fonctionnement végétal, comme la fraction de rayonnement absorbé, la production primaire brute et nette ou l'évapotranspiration, et les conditions micro-météorologiques (rayonnement incident, température, déficit de pression de vapeur d'eau, etc) ou édaphiques.

Dans le cadre du projet ECOFLUO financé par le CNES, un instrument automatisé de mesure *in situ* de la SIF (nommé SIF3) a été développé grâce à une collaboration entre le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) à l'École polytechnique et le Laboratoire d'Écologie, Société et Évolution (ESE) de l'Université Paris-Saclay. SIF3 réalise des mesures à haute résolution spectrale et en continu du rayonnement incident et réfléchi au-dessus de la canopée. Il a été installé en 2022 au sommet de la tour de 35 m de haut du site forestier de Fontainebleau-Barbeau, en association avec l'instrument LIF de mesures actives de la fluorescence.

2. Description de l'instrument SIF3

SIF3 est un instrument passif de télédétection *in situ* pour la mesure de la fluorescence de la chlorophylle induite par le soleil (SIF) et de la réflectance des couverts végétaux. La SIF et la réflectance sont obtenues à partir des luminances spectrales des rayonnements incident et réfléchi, mesurées à l'aide de deux spectromètres miniatures de la société ASEQ Instruments (Victoria, BC, Canada, voir <https://aseq-instruments.com/index.html>) :

- le HR1-T pour la mesure à haute résolution spectrale dans la partie rouge et rouge lointain du spectre (645-800 nm)
- le LR1-T pour la mesure sur la totalité de la gamme spectrale visible (400 – 800 nm).

Les mesures faites avec le HR1-T sont exploitées pour la quantification de la SIF, notamment dans les bandes de l'oxygène O2-A à 760 nm et O2-B à 687 nm, tandis que celles du LR1-T servent à déterminer la réflectance du couvert sur l'ensemble du spectre visible entre 400 nm et 800 nm.

Des versions non refroidies de ces spectromètres sont également commercialisées

Ces spectromètres possèdent une entrée optique fibrée, la mesure se fait à travers une fibre optique de grande longueur (15 m) dont l'extrémité libre vise le couvert végétal (Fig 1).

Les caractéristiques et performances de l'instrument SIF3 sont les suivantes :

Voie haute résolution (SIF)	
Spectromètre	HR1-T (ASEQ Instruments, Canada)
Gamme spectrale	645 nm – 800 nm
Nombre de pixels	3648
Résolution spectrale	0.2 – 0.3 nm
Dynamique	16 bits
Champ de vue	25°
Sensibilité (DN $\mu\text{W}^{-1} \text{ m}^2 \text{ sr nm}$)	0.35 @760 nm
Rapport Signal à Bruit (SNR)	300
Voie large bande (Réflectance visible)	
Spectromètre	LR1-T (ASEQ Instruments, Canada)
Gamme spectrale	400 nm – 1000 nm
Nombre de pixels	3648
Dynamique	16 bits
Champ de vue	25°
Sensibilité (DN $\mu\text{J}^{-1} \text{ m}^2 \text{ sr nm}$)	20 @500 nm
Rapport Signal à Bruit (SNR)	300

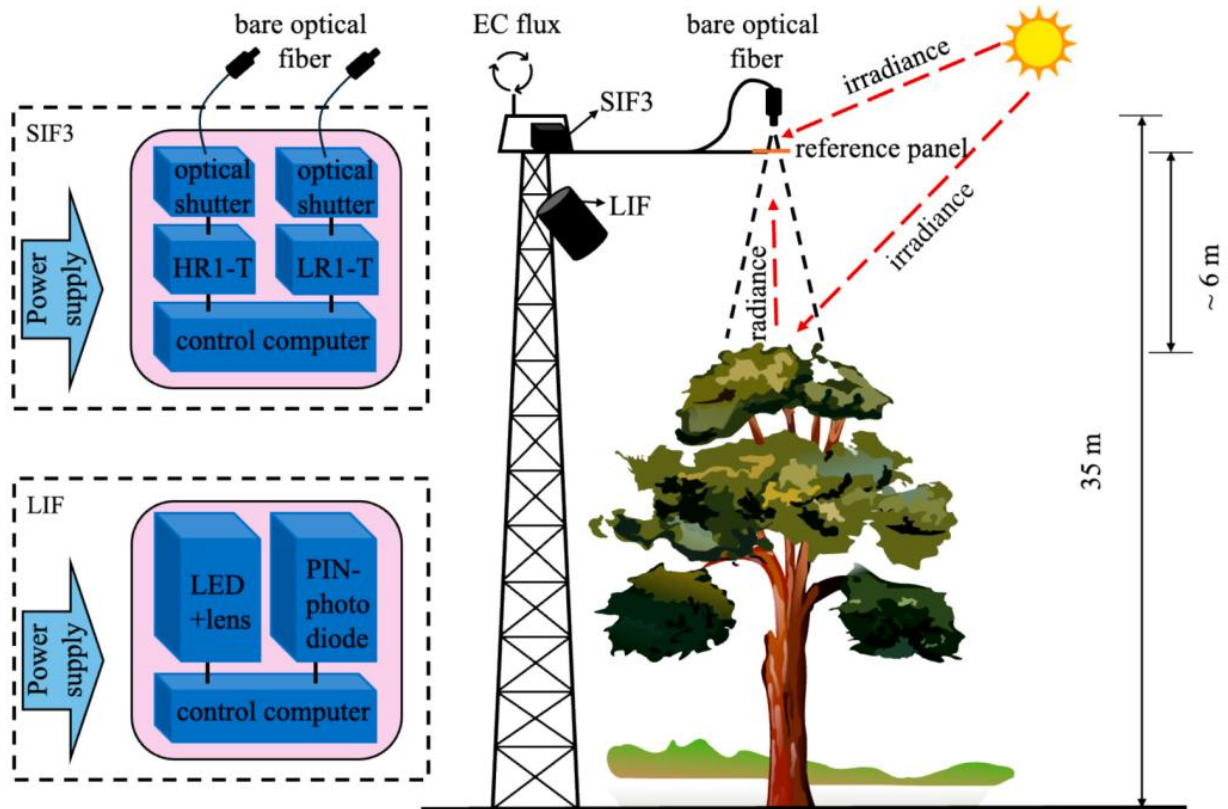


Fig. 1. Diagramme schématique de l'installation des deux instruments SIF3 et LIF sur le site forestier de Barbeau-Fontainebleau (D'après Li et al, 2026).

SIF3 se compose de trois modules (Fig. 2):

- Une tête optique positionnée à une distance d'environ 10 mètres au-dessus de la cime des arbres
- Un boîtier instrumental qui contient les spectromètres et un mini-ordinateur pour l'acquisition, la sauvegarde des données et le contrôle-commande
- Un boîtier d'alimentation et de connexion au réseau informatique du site

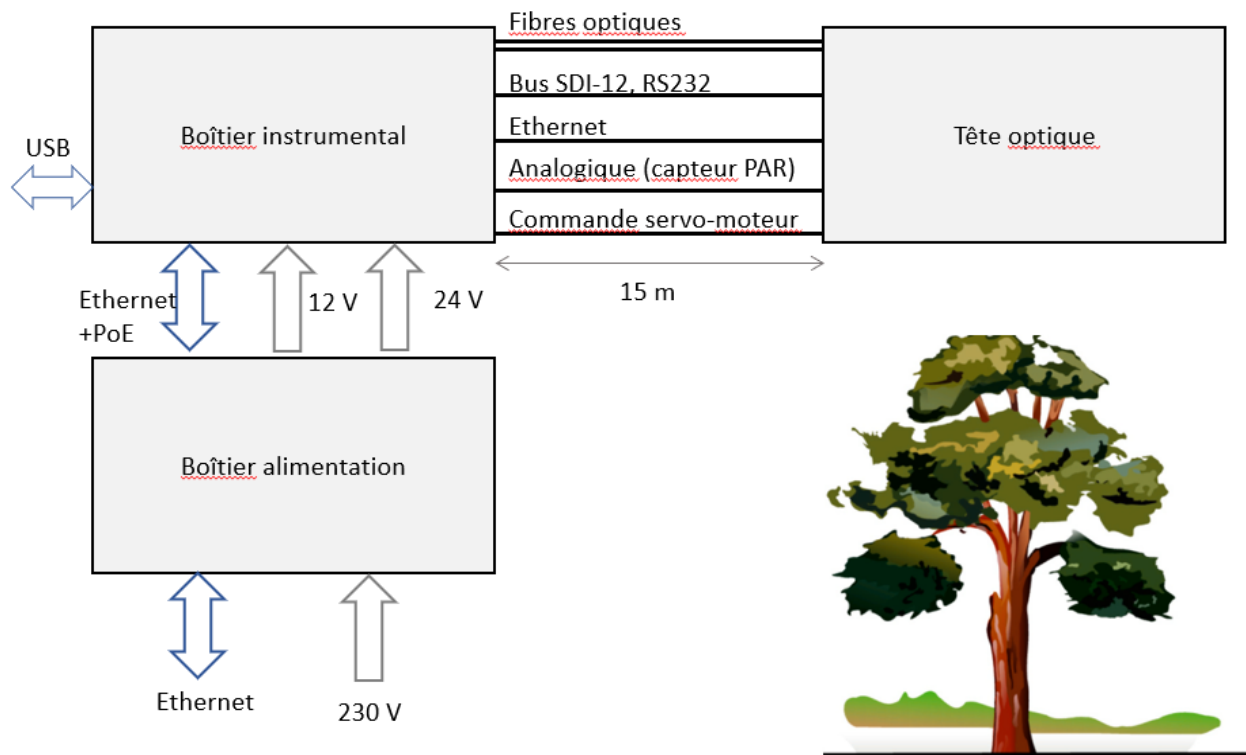


Fig. 2. Diagramme schématique de l'instrument SIF3 de mesure passive de la fluorescence induite par le soleil.

2.1. Description de la tête optique

La tête optique de SIF3 est fixée sur la structure de la tour par l'intermédiaire d'une poutre coulissante. Sa structure se compose d'une poutre en profilé 30 mm x 30 mm sur laquelle se rattache les composants (Fig. 3). Elle est reliée au boîtier instrumental par deux fibres optiques et des câbles électriques de 15 m de long.

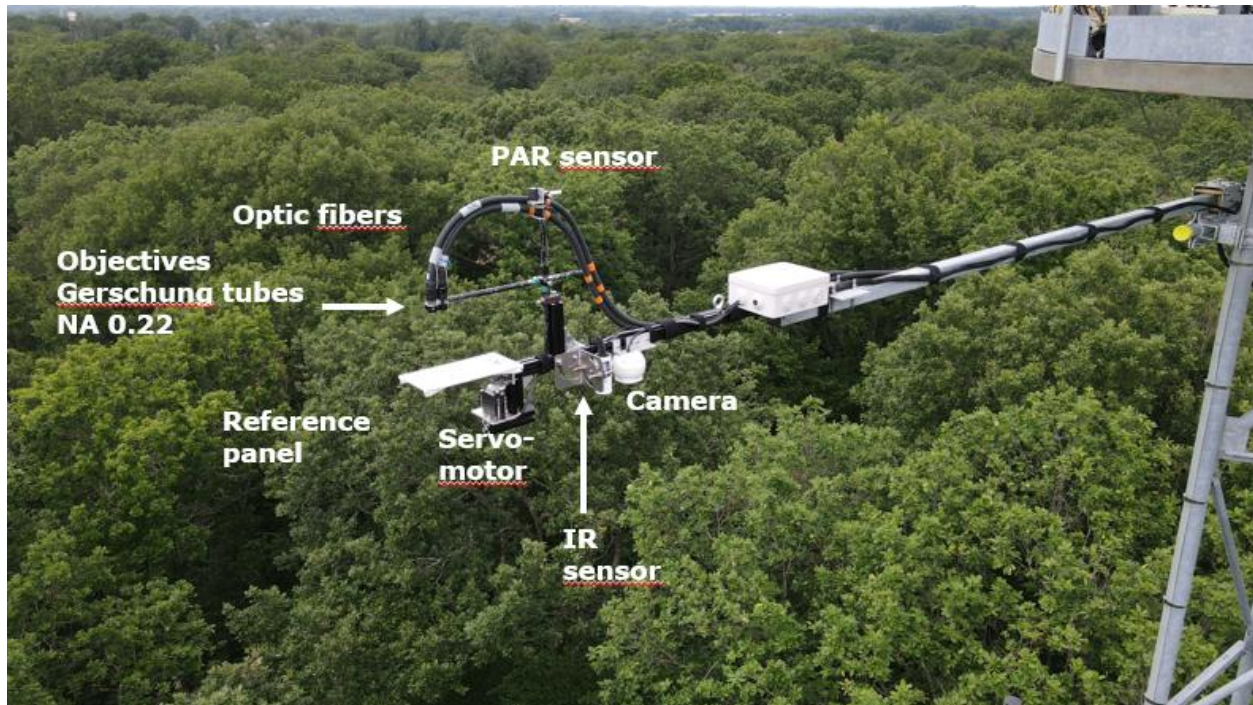


Fig. 3. Vue de la tête optique de SIF3 installée sur la tour du site forestier de Barbeau-Fontainebleau (crédit D. Berveiller)

Les extrémités des fibres optiques issues des spectromètres visent vers le bas et sont maintenues dans des tubes dits de « Gerschung » (Thorlabs, Maison-Laffite, France), dont le rôle est de limiter le champ de vue ($N.A. = 0.22$), par rapport au champ de vue des fibres optiques ($N.A. = 0.39$). Ceci permet d'occulter le champ de vue périphérique des fibres, et d'avoir une réponse spatiale plus plate dans le champ de vue effectif. Les deux tubes de Gerschung sont placés côte à côte en surplomb de la végétation. Leur alignement est réglé au laboratoire en injectant de la lumière dans les fibres et en projetant les faisceaux issus des tubes sur un panneau distant. Les tubes de Gerschung sont réalisés par un assemblage d'éléments disponibles chez Thorlabs. Ceux-ci sont équipés à leur extrémité de filtres optiques dans le but : (i) d'éliminer la diffraction d'ordre 2 dans le spectromètre HR1-T, (ii) protéger les extrémités des fibres et l'espace intérieur des tubes des perturbations de l'environnement (poussières, araignées, guêpes ou abeilles solitaires, etc). Les fibres optiques sont reliées aux spectromètres par l'intermédiaire d'obturateurs fibrés (Ocean Optics, Orlando, FL, USA) utilisés pour la mesure du courant d'obscurité.

Les mesures des rayonnements incident et réfléchi s'effectuent en échantillonnant alternativement la lumière réfléchie par un panneau de référence mobile et par la végétation, respectivement. La procédure de mesure spectrale consiste alors à la répétition de la séquence suivante :

- 1 - Mise en place du panneau de référence dans le champ de vue des spectromètres. Le panneau est fixé sur un axe mobile monté sur roulement à billes, qui est directement entraîné par un servo-moteur.

2 - Optimisation du temps d'intégration, de façon à obtenir une valeur de sortie (D.N., Digital Number) dans la gamme haute pour maximiser le rapport signal à bruit (SNR, Signal to Noise Ratio).

3 - Mesure du signal réfléchi par le panneau de référence.

4 - Fermeture des obturateurs et mesure des courants d'obscurité (D.C, Dark Current)

5 - Ouverture des obturateurs.

5 – Rotation de 90° du panneau de référence. Les spectromètres visent alors le couvert végétal.

6 – Exécution des étapes 2 à 4, mais en visant la végétation.

7 – Retour à l'étape 1.

D'autre part, la tête optique intègre :

- un capteur du Rayonnement Photosynthétiquement Actif (PAR),

- un capteur infrarouge pour la mesure de la température de surface du couvert végétal,

- une caméra connectée sur le réseau Ethernet pour la surveillance de la zone étudiée et l'évaluation de la phénologie. Celle-ci est directement connectée au réseau Ethernet, et sauvegarde de manière autonome et périodique les images de la zone visée.

Le tableau suivant précise les fournisseurs et références fabricant des principaux composants de la tête optique.

Composant	Référence, Fabricant	Fonction, description
Fibres optiques de liaison (15 m)	FT1000EMT, FT1000UMT Thorlabs, France	Collecte la lumière réfléchie par la végétation ou le panneau de référence. Transmet l'information optique vers les spectromètres
Tube de Gershung	Assemblage d'éléments de la série SM05, Thorlabs, France	Homogénéise le champ de vue par réduction de celui-ci
Filtre optique Voie HR (haute-résolution)	5CGA-550, diamètre 1/2 pouce, passe-haut @550 nm Newport/Micro Contrôle Spectra Physics S.A., Beaune la Rolande, France	Élimine la partie non mesurée du spectre (longueurs d'onde courtes) dans la diffraction d'ordre deux. Protège l'entrée du tube de Gershung
Filtre optique voie LB (large bande)	5CGA-375, diamètre 1/2 pouce, passe-haut @375 nm Newport/Micro Contrôle Spectra Physics S.A., Beaune la Rolande,	Élimine le rayonnement ultraviolet et sa potentiel contamination d'ordre deux Protège l'entrée du tube de

	France	Gershung
Panneau réfléchissant de référence	PMR10P1 Thorlabs, France, monté sur plaque en fibre de carbone	Réfléchit le rayonnement incident vers la tête optique
Servomoteur	FS6530M, HITEC	Actionne le panneau de référence
Caméra	RLC-520A Reolink Innovation Limited, Hong Kong	Description de l'hétérogénéité de la zone mesurée
Capteur de PAR	PAR JYP-1000 SDEC, France	Mesure à haute fréquence du Rayonnement Photosynthétique Actif (PAR)
Capteur infrarouge	SI-131, Apogee Instruments	Mesure de la température de surface du couvert végétal

Table 1. Principaux composants de la tête optique de SIF3.

2.2. Description du boîtier instrumental

Le boîtier instrumental contient l'ensemble des composants nécessaires à la mesure, qui sont soit trop lourds, soit trop volumineux pour être placés au niveau de la tête optique. L'ensemble du boîtier est thermostaté (20°C) grâce à un thermorégulateur à effet Peltier de 200 W environ, ce qui assure un fonctionnement stable des systèmes de mesures. Les alimentations continues (12V et 24V) sont déportées dans un boîtier spécifique (Boîtier alimentation, voir §2.3) afin de limiter les apports thermiques à l'intérieur du boîtier instrumental. L'intérieur du boîtier est recouvert d'un isolant thermique en mousse expansé rigide.

Le boîtier instrumental contient les deux spectromètres miniatures de chez ASEQ Instruments qui constituent le cœur instrumental de SIF3, à savoir le HR1-T dédié à la mesure de SIF, et le LR1-T pour la mesure de la réflectance du couvert sur l'ensemble du visible. Ces spectromètres sont chacun équipés d'un refroidisseur Peltier.

Un micro-ordinateur (Modèle Lattepanda V1) gère l'ensemble du système à travers le bus USB, et communique avec l'extérieur par le port Ethernet (c.f. schéma du boîtier Fig. 5). Un logiciel écrit en Labview assure les tâches suivantes :

- configurer les spectromètres (temps d'intégration, nombre de mesures, etc),
- transférer et sauvegarder les spectres mesurés. Le format de fichier utilisé est le tdms (Technical Data Management Stream), Ce format, développé par National Instruments, stocke en binaire les données de mesure ainsi que des métadonnées dans une structure hiérarchique,
- orienter le panneau de référence suivant la mesure à réaliser (rayonnement réfléchi ou incident),

- fermer et ouvrir les obturateurs fibrés (shutter) à l'entrée des spectromètres pour la mesure du courant d'obscurité,
- gérer l'acquisition, transférer et stocker les données métadonnées d'environnement : Rayonnement Photosynthétiquement Actif (PAR), température de surface du couvert fourni par le capteur Apogee SI-131, courants injectés dans les Peltier des spectromètres, température et humidité à l'intérieur du boîtier, PAR total et diffus fournis par le capteur BF5 (Delta-T Devices),
- réinitialiser périodiquement le compteur du chien de garde (watchdog) implémenté sur l'Arduino 1 (Fig. 5),
- afficher les spectres mesurés et les métadonnées à l'écran, et gérer l'interface homme machine (IHM),
- acquérir l'heure fourni par le GPS,

Le contrôle-commande de SIF3 par le micro-ordinateur fait appel à deux micro-contrôleurs Arduino Uno:

- un premier Arduino supportant LINUX mesure le courant des refroidisseurs Peltier des spectromètres, la température des radiateurs de ceux-ci, le PAR, la température et l'humidité interne du boîtier, et gère le chien de garde,
- le deuxième Arduino supporte LIFA (Labview Interface For Arduino) et gère le servo-moteur et les obturateurs fibrés (shutters).

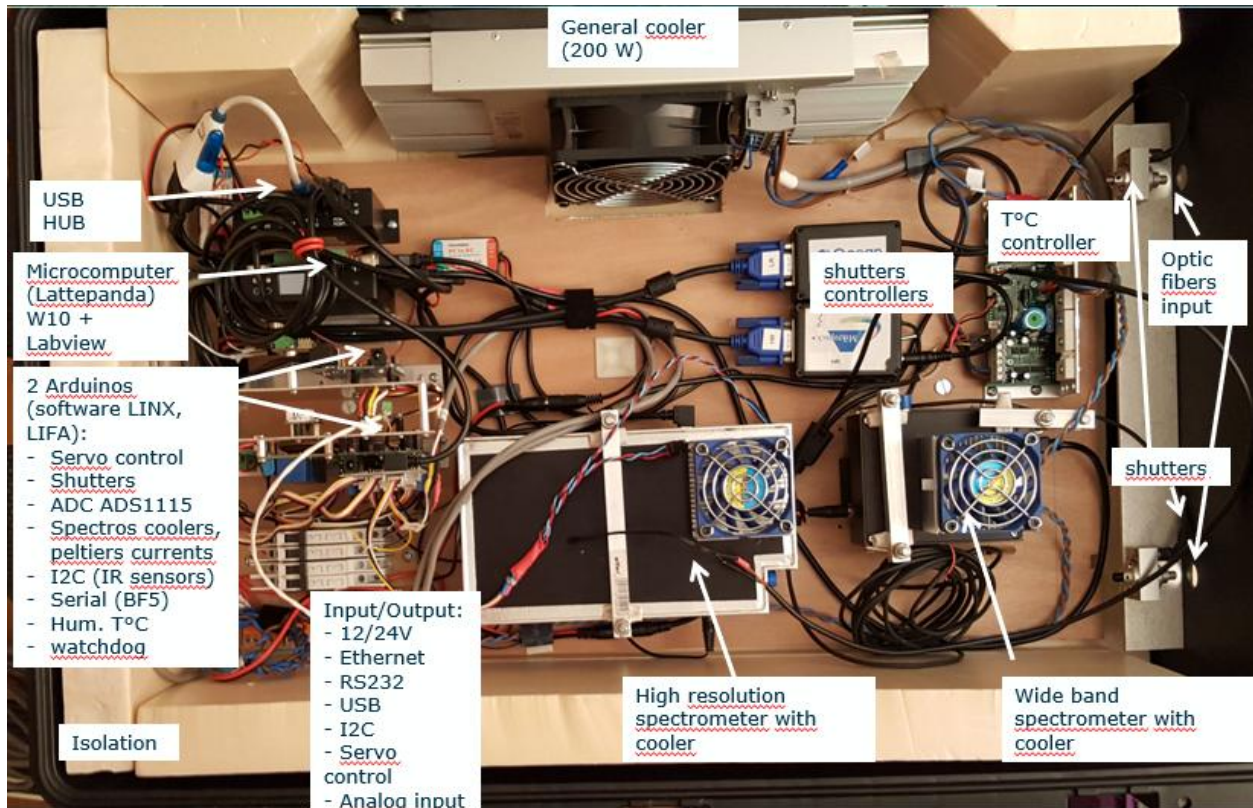


Fig. 4. Vue de l'intérieur du boîtier instrumental.

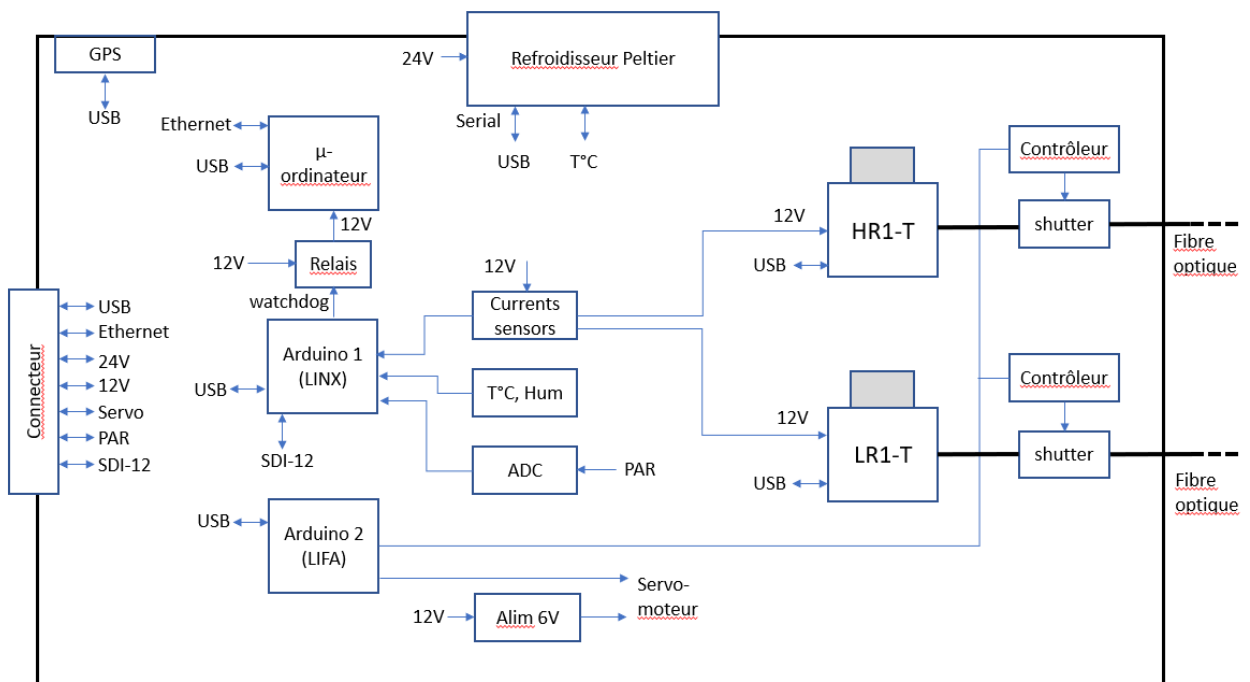


Fig. 5. Diagramme schématique du boîtier instrumental.

Composant	Référence	Fonction
Spectromètre haute résolution	HR1-T, ASEQ Instruments, Victoria, BC, Canada	Mesure du spectre de luminance de la végétation et du spectre incident dans la partie rouge du spectre visible pour la détermination de la fluorescence induite par le soleil
Spectromètre large bande	LR1-T, ASEQ Instruments, Victoria, BC, Canada	Mesure du spectre de luminance de la végétation et du spectre incident dans tout le spectre visible (400-800 nm) pour obtenir le spectre de réflectance du couvert végétal
Thermorégulateur 244 W	Cooler AA-250-24-44-00 Contrôleur PR-59 Tark Thermal Solutions, Shenzhen, China	Maintient une température constante à l'intérieur du boîtier instrumental
Convertisseur RS232-USB	Startech	Connecte la carte de contrôle du thermorégulateur au micro-ordinateur
Micro-ordinateur	LattePanda V1 LattePanda, Shanghai, Chine	Microordinateur pour la gestion et le contrôle-commande des sous modules, le transfert et la sauvegarde des données
Microcontrôleurs	Arduino Uno / Software Labview LIFA et/ou LINX	Assure l'interface entre le micro-ordinateur et les périphériques physique (convertisseur, capteurs, actionneurs, etc)
Platine relais	DFR0251, DFRobot	Commute le courant envoyé dans les refroidisseurs des spectromètres
Capteurs de courant	Grove - 10A DC Current Sensor (ACS725)	Mesure le courant envoyé dans les refroidisseurs des spectromètres
Convertisseur analogique-digital	ADS1115	Convertit la tension analogique du capteur de PAR
Capteur de température et humidité	DHT22	Mesure la température et l'humidité relative interne du boîtier instrumental
Capteurs de température des spectromètres	LM35, boîtier T092 Texas Instruments	Mesure la température des radiateurs des refroidisseurs des spectromètres

Obturbateurs fibrés	INLINE-TTL-S Ocean Optics, Orlando, FL, USA	Définit le niveau d'obscurité à l'entrée des spectromètres
Fibres optiques	FG910UEC, L=0.2 m Thorlabs, France	Connecte les obturbateurs fibrés aux spectromètres
Boîtier valise	iM2950, PELI Products, Barcelone, Espagne, www.peli.com	Contient et protège les composants et éléments du boîtier instrumental
Hub USB	Startech	Connecte les périphériques USB à l'ordinateur de contrôle
Module GPS	GPS 1040, Phidgets	Fournit l'heure et la position à l'ordinateur de contrôle

Table 2. Principaux composants du boîtier instrumental de SIF3.

2.3. Description du boîtier alimentation

Le boîtier alimentation contient :

- une alimentation 230V/24V pour alimenter le thermorégulateur du boîtier instrumental
- une alimentation 230V/12V pour alimenter le micro-ordinateur, les refroidisseurs Peltiers des spectromètres, les contrôleurs des obturbateurs
- un injecteur PoE pour alimenter la caméra de la tête optique.

3. Description du logiciel d'acquisition et de contrôle/commande

Les données de l'instrument SIF3 sont acquises et sauvegardées par l'intermédiaire d'un logiciel écrit en Labview implanté sur un mini-ordinateur Lattepanda V1 fonctionnant sous Windows 10. Ce logiciel assure aussi le contrôle-commande des spectromètres et des autres périphériques (servomoteur du panneau de référence, obturbateurs, refroidisseurs Peltier des spectromètres, etc).

3.1. Démarrage et continuité des mesures

Le logiciel de SIF3 est un exécutable Labview, qui s'exécute au démarrage de Windows, configuré pour s'exécuter à la mise sous tension de l'instrument. A chaque acquisition d'une série de spectres sur un spectromètre, le logiciel réinitialise un compteur décrémental implémenté sur l'Arduino1 qui sert de chien de garde. Quand ce compteur atteint la valeur 0 (au bout de 15 min environ), l'Arduino coupe temporairement l'alimentation du Lattepanda, qui redémarre. Ainsi, l'instrument

est protégé contre les plantages du logiciel et les coupures d'alimentation, assurant ainsi une continuité des mesures.

3.2. Interface du logiciel

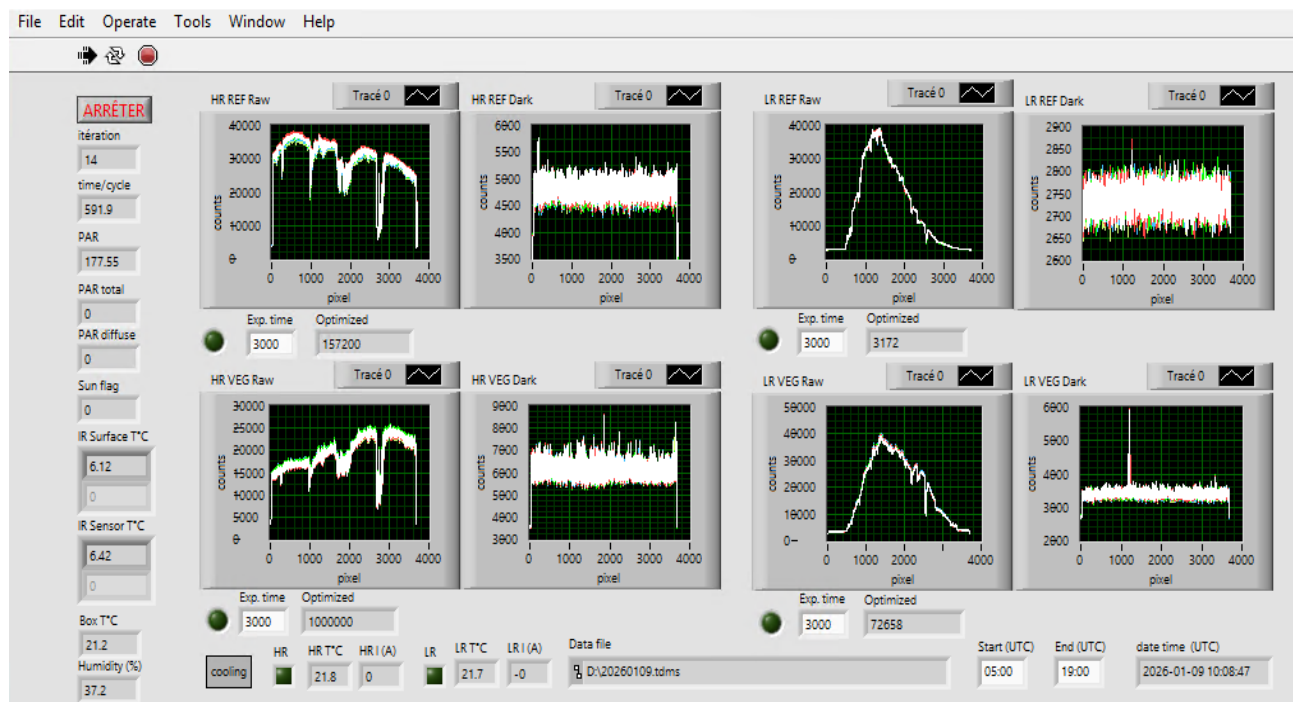


Fig. 6. Interface de l'instrument SIF3 installé sur le site de Barbeau-Fontainebleau.

La Fig. 6 présente l'interface de l'application SIF3. Celle-ci est accessible à distance à travers le réseau.

Cette interface présente les derniers spectres acquis au cours d'un cycle de mesure. Pour chaque combinaison [spectromètre, état de l'obturateur, position du panneau de référence], on fait l'acquisition de 5 spectres consécutifs. Les spectres présentés sont dans l'ordre :

Spectres	Spectromètre	Panneau de référence	Obturbateur	Mesure
HR REF Raw	HR1-T	0°	ouvert	Luminance du panneau de référence mesurée par le spectromètre haute-résolution HR1-T
HR REF Dark	HR1-T	0°	fermé	Courant d'obscurité du HR1-T
LR REF Raw	LR1-T	0°	ouvert	Luminance du panneau de référence mesurée par le spectromètre large gamme spectrale LR1-T
LR REF Dark	LR1-T	0°	fermé	Courant d'obscurité du LR1-T
HR VEG Raw	HR1-T	90°	ouvert	Luminance de la végétation mesurée par le spectromètre haute-résolution HR1-T
HR VEG Dark	HR1-T	90°	fermé	Courant d'obscurité du HR1-T
LR VEG Raw	LR1-T	90°	ouvert	Luminance de la végétation mesurée par le spectromètre large gamme spectrale LR1-T
LR VEG Dark	LR1-T	90°	fermé	Courant d'obscurité du LR1-T

Les abscisses des graphes sont indiqués en pixels, les ordonnées en nombres de coups (counts, ou digital number, DN) qui correspondent aux données brutes directement fournies par le convertisseur analogique-digital des spectromètres. Les 5 spectres d'une même série sont affichés en différentes couleurs sur un même graphe, ce qui permet à l'utilisateur de s'assurer visuellement du bon fonctionnement de l'instrument, en particulier des obturbateurs et du panneau de référence mobile, et de la stabilité des conditions de mesure.

Les commandes accessibles à l'utilisateur sont :

- le bouton « ARRÊTER » : finit le cycle de mesure en cours, libère les ressources comme les spectromètres, et arrête le programme. L'arrêt du cycle de mesure en cours peut prendre plusieurs minutes, suivant les valeurs des temps d'intégration optimisés.
- les données « Exp time » ou temps d'exposition : définit les temps d'intégration initiaux (en multiple de 10 μ s) avant la procédure d'optimisation. Les temps d'intégration après optimisation (Optimized, en multiple de 10 μ s) sont affichés à droite de chaque « Exp time » initial.
- Start (UTC) et End (UTC) : définit les heures de début et de fin de la prise de mesures.
- cooling : met en route et arrête les refroidisseurs Peltier des spectromètres.

Les indicateurs de la face avant du programme principal sont :

- itération : indique le nombre de cycles de mesures effectués depuis le démarrage du programme,
- time/cycle : durée du dernier cycle de mesures en secondes,
- PAR : Rayonnement Photosynthétiquement Actif (PAR) mesuré par le capteur JYP-1000 (SDEC, France),
- PAR total, PAR diffus : PAR total et diffus mesurés par le capteur BF5 (Delta-T Devices Ltd, Royaume-Uni). Ce capteur n'est pas installé sur SIF3 sur le site de Barbeau-Fontainebleau.
- Sun flag : indicateur d'ensoleillement (0 ou 1) fourni par le capteur BF5,
- IR surface T°C : température de surface du couvert végétal (en °C) mesurée par les capteurs infrarouge SI-131 (Apogee Instruments Inc., USA). SIF3 peut gérer jusqu'à deux capteurs. Un seul est installé sur le site de Barbeau-Fontainebleau.
- IR Sensor T°C : température interne des capteurs SI-131 (Apogee Instruments Inc., USA). SIF3 peut gérer jusqu'à deux capteurs. Un seul est installé sur le site de Barbeau-Fontainebleau.
- Box T°C : température interne du boîtier instrumental de SIF3 (en °C) mesurée par le capteur DHT22,
- Humidity (%) : humidité relative à l'intérieur du boîtier instrumenta mesuré par le capteur DHT22
- section « cooling » : comporte pour chaque spectromètre (HR1-T et LR1-T) : un indicateur de mise en route des refroidisseurs Peltier (HR, LR, respectivement) ; la température des radiateurs externes des refroidisseurs mesurée par les capteurs LM35 (Texas Instruments) (HR T°C, LR T°C) ; le courant circulant dans les refroidisseurs en ampère (HR I(A), LR I(A)).
- Data file : chemin et nom du fichier de sauvegarde en cours,
- date time (UTC) : date et heure en temps UTC fournies par le capteur GPS et réactualisées à chaque cycle de mesure.

3.3. Sauvegarde et transfert des données

A chaque cycle de mesure, les données spectrales brutes et les méta-données sont sauvegardées au format TDMS sur un disque SSD local situé dans le boîtier instrumental. Le format TDMS est un format binaire hiérarchique à 3 niveaux :

- le niveau du fichier, où sont rattachés les méta-données : date, identifiants des spectromètres
- le niveau groupe, qui comprend les données pour un spectromètre (HR ou LR) et une position du panneau de référence (VEG, végétation ou REF, référence). Seuls les groupes correspondant à la mesure sur la végétation avec le spectromètre haute-résolution (HR) possèdent des méta-données rattachées, qui sont :

- les horodatages de début et fin de mesure pour ce groupe
- le temps d'intégration utilisé
- le PAR total fourni par le capteur JYP-1000
- le PAR total et diffus fournis par le capteur BF5
- les températures de surface et de capteur fournis par les capteurs infrarouge SI-131
- la température et l'humidité à l'intérieur du boîtier instrumental
- les courants circulant dans les refroidisseurs Peltier des spectromètres et les températures de leurs radiateurs

- le niveau des données : il n'y a pas de méta-données rattachées à ce niveau.

Les données stockées en local sont transférées quotidiennement sur un micro-ordinateur local installé sur le site d'une part, et sur un serveur distant d'autre part.

4. Références

Bacour, C., Maignan, F., MacBean, N., Porcar-Castell, A., Flexas, J., Frankenberg, C., Peylin, P., Chevallier, F., Vuichard, N., and Bastrikov, V. (2019). Improving Estimates of Gross Primary Productivity by Assimilating Solar-Induced Fluorescence Satellite Retrievals in a Terrestrial Biosphere Model Using a Process-Based SIF Model. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*.

Baker, N.R. (2008). Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. In *Annual Review of Plant Biology*, pp. 89-113.

Balde, H., Hmimina, G., Goulas, Y., Latouche, G., and Soudani, K. (2023). Synergy between TROPOMI sun-induced chlorophyll fluorescence and MODIS spectral reflectance for understanding the dynamics of gross primary productivity at Integrated Carbon Observatory System (ICOS) ecosystem flux sites. *Biogeosciences* 20, 1473-1490.

Frankenberg, C., Fisher, J.B., Worden, J., Badgley, G., Saatchi, S.S., Lee, J.-E., Toon, G.C., Butz, A., Jung, M., Kuze, A., et al. (2011). New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. *Geophys Res Lett* 38, L17706.

Li, X., and Xiao, J. (2019). Mapping Photosynthesis Solely from Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence: A Global, Fine-Resolution Dataset of Gross Primary Production Derived from OCO-2. *Remote Sensing* 11, 2563.

Qian, X., Qiu, B., and Zhang, Y. (2019). Widespread Decline in Vegetation Photosynthesis in Southeast Asia Due to the Prolonged Drought During the 2015/2016 El Niño. *Remote Sensing* 11, 910.

MacBean, N., Maignan, F., Bacour, C., Lewis, P., Peylin, P., Guanter, L., Köhler, P., Gómez-Dans, J., and Disney, M. (2018). Strong constraint on modelled global carbon uptake using solar-induced chlorophyll fluorescence data. *Scientific Reports* 8, 1973.

Song, L., Guanter, L., Guan, K.Y., You, L.Z., Huete, A., Ju, W.M., and Zhang, Y.G. (2018). Satellite sun-induced chlorophyll fluorescence detects early response of winter wheat to heat stress in the Indian Indo-Gangetic Plains. *Global Change Biology* 24, 4023-4037.

Sun, Y., Fu, R., Dickinson, R., Joiner, J., Frankenberg, C., Gu, L.H., Xia, Y.L., and Fernando, N. (2015). Drought onset mechanisms revealed by satellite solar-induced chlorophyll fluorescence: Insights from two contrasting extreme events. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 120, 2427-2440.

Wang, X., Qiu, B., Li, W., and Zhang, Q. (2019). Impacts of drought and heatwave on the terrestrial ecosystem in China as revealed by satellite solar-induced chlorophyll fluorescence. *Science of the Total Environment* 693, 133627.

Yoshida, Y., Joiner, J., Tucker, C., Berry, J., Lee, J.E., Walker, G., Reichle, R., Koster, R., Lyapustin, A., and Wang, Y. (2015). The 2010 Russian drought impact on satellite measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence: Insights from modeling and comparisons with parameters derived from satellite reflectances. *Remote Sensing Environ* 166, 163-177.

5. Acronymes

DC : Dark Current

DN : Digital Number

EVI : Enhanced Vegetation Index

GPP : Gross Primary Production

LIF : Laser-Induced Fluorescence ou LED-Induced Fluorescence

PAR : Photosynthetically Active Radiation

PoE : Power over Ethernet

SIF : Sun-Induced Fluorescence

SNR : Signal to Noise Ratio

TDMS : Technical Data Management System

ANNEXE B : Description de l'instrument de mesure active de la fluorescence chlorophyllienne des couverts végétaux

Document joint

Article scientifique Moya et al., 2019

Description de l'instrument de mesure active de la fluorescence chlorophyllienne des couverts végétaux (LIF), appelé **LED FLEX** dans cet article

ANNEXE C : Article scientifique Balde et al., 2024

Document joint

ANNEXE D : Article scientifique Li et al., 2025

Document joint

ANNEXE E : Sites expérimentaux ICOS partenaires

Liste des stations écosystémiques expérimentales du réseau ICOS partenaires et liens vers ICOS

Site	Localisation (Lat, Long)	Type de végétation	Lien ICOS
Puéchabon	43.7413, 3.5957	Chêne vert	https://meta.icos-cp.eu/resources/stations/ES_F_R-Pue
Barbeau-Fontainebleau	48.4764, 2.7801	Chêne sessile/Charme	https://meta.icos-cp.eu/resources/stations/ES_F_R-Fon
Paracou	5.2788, -52.9249	Forêt tropicale humide	https://fluxnet.org/sites/siteinfo/GF-Guy
Auradé	43.54965, 1.10610	Culture	https://meta.icos-cp.eu/resources/stations/ES_F_R-Au

ANNEXE F : Liste des équipements, composants, consommables et fabrication à façon qui rentrent dans la composition des instruments SILI-Fluo et fournies par les Laboratoires

- spectromètre modèle HR1 ou HR1-T, ASEQ Instruments, Vancouver, Canada
- spectromètre modèle LR1 ou LR1-T, ASEQ Instruments, Vancouver, Canada
- fibres optiques et leurs gaines de protection
- obturateurs fibrés
- caméras
- capteurs de Rayonnement Photosynthétiquement Actif (PAR) total et diffus
- capteurs infrarouges
- modules électroniques ou cartes électroniques pré-cablées (ex. carte micro-ordinateur ou micro-contrôleur, pilote des LEDs de puissance, convertisseur analogique-digital, carte réseau, alimentation, GPS, éléments de connectivité réseau (ethernet, USB, SDI-12, etc)
- sources lumineuses d'excitation de la fluorescence (diodes électroluminescentes de puissance (LEDs))
- module de thermo-régulation
- dessicant
- éléments de stockage des données (carte mémoire, disque dur SSD)
- fabrication à façon de circuits imprimés
- câblage à façon de cartes électroniques (ex. amplificateur, mise en forme des signaux, conversion analogique-digital ou digital-analogique)
- composants électroniques actifs et passifs (ex. circuits intégrés, transistors, condensateurs, résistances, potentiomètres, inductances, transformateurs)
- sondes et capteurs (température, humidité, tension, courant)
- composants électro-mécaniques et accessoires de câblage (ex. connecteurs, borniers, fils et câbles, ventilateurs, dissipateurs, moteurs, relais, électro-aimants, interrupteurs, gaines)
- composants optiques, optoélectroniques et optomécaniques (ex. lentilles, filtres, miroirs, supports, correcteurs cosinus, réflecteurs, photodiodes, diodes électroluminescentes)
- fabrication à façon d'éléments mécaniques (supports, pièces de fixation, capots de protection) par usinage, impression 3D, découpe mécanique, jet d'eau, laser
- éléments de fixation mécaniques internes (vis, boulons, écrous, colliers)
- matériaux et dispositifs d'isolation thermique, d'étanchéité et de compatibilité électro-magnétique
- éléments de fixation mécanique des instruments et des capteurs sur les sites de mesures
- boîtiers de protection

ANNEXE G : Exigences techniques pour les instruments SILI-Fluo

Cette Annexe décrit les exigences techniques applicables à l'instrument SILI-Fluo objet du présent marché. Ses principes de fonctionnement, ses caractéristiques se basent sur celles des instruments SIF3 pour la mesure passive de la fluorescence induite par le soleil (SIF, Sun-Induced Fluorescence) et LEDFLEX pour la mesure active de la fluorescence induite par LED (Light-Emitting Diodes) (LIF, LED-Induced Fluorescence) développés par les laboratoires ESE et LMD.

Ces exigences complètent celles décrites ailleurs dans le Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP). En cas de contradiction entre cette annexe et le reste du CCTP, le Titulaire est tenu de se rapprocher des Laboratoires pour clarification.

Exigences générales

ID	Nom	Valeur
G01	Mesure de la fluorescence	SILI-Fluo doit mesurer la fluorescence de la végétation induite par le soleil (méthode passive) <u>et</u> la fluorescence induite par une source lumineuse artificielle contrôlée (méthode active).

ID	Nom	Valeur
G02	Mesure de la réflectance	SILI-FLUO doit mesurer la réflectance du couvert végétal sur l'ensemble du spectre visible de 400 nm à 800 nm.

ID	Nom	Valeur
G03	Distance de mesure	SILI-Fluo doit mesurer la fluorescence de manière active et passive à une distance d'au moins 10 mètres au-dessus de l'extrémité sommitale de la végétation

ID	Nom	Valeur
G04	Mesures des variables additionnelles	SILI-Fluo doit mesurer les variables additionnelles : - Le rayonnement photo-synthétiquement actif (PAR) incident. - Le PAR incident diffus et le PAR incident direct. - Le PAR transmis sous couvert sur les sites non équipés. - La mesure de la température de surface du couvert végétal par infra-rouge.

ID	Nom	Valeur
G05-1	Paramètres d'environnement et de fonctionnement	SILI-Fluo fournira les paramètres de micro-environnement et de fonctionnement suivants : - température interne du boîtier - humidité interne du boîtier - température du détecteur de la voie active - température de la source lumineuse (LED) de la voie active
G05-2	Période de mesure	≤ 1 min

ID	Nom	Valeur
G06	Température de fonctionnement	-20°C à +45°C

ID	Nom	Valeur
G07	Unités des spectres de luminance	Les spectres de luminance spectrale mesurés par SILI-Fluo seront donnés en unité de luminance énergétique, soit en $W m^{-2} sr^{-1} nm^{-1}$

ID	Nom	Valeur
G08-1	Etanchéité	Le boîtier de SILI-Fluo sera étanche à la poussière et aux projections d'eau de forte intensité
G08-2	Thermo-régulation	La température à l'intérieur du boîtier de SILI-Fluo sera maintenue constante à $\pm 1^{\circ}C$ et ne dépassera pas $21^{\circ}C$
G08-3	Humidité	L'humidité relative à l'intérieur du boîtier de SILI-Fluo ne dépassera pas 35 %

ID	Nom	Valeur
G09	Protection contre la condensation	Les optiques de SILI-Fluo seront protégées contre la condensation. Les techniques de protection incluent le chauffage des optiques et le soufflage d'air sec.

ID	Nom	Valeur
G10	Horodatage	Toutes les données fournies par SILI-Fluo (spectres de luminances, PAR, images, paramètres de fonctionnement)

seront horodatées en temps UTC avec une précision d'au moins une seconde.

Mesure de la fluorescence induite par le soleil (SIF)

ID	Nom	Valeur
SIF01	Spectromètre SIF	Pour la mesure de SIF, SILI-Fluo utilisera un spectromètre miniature de la société ASEQ Instrument (Vancouver, Canada), modèle HR1 ou HR1-T. - La fluorescence chlorophyllienne induite par le soleil (SIF) dans les bandes d'absorption telluriques O2-A et O2-B de l'oxygène atmosphérique par la mise en œuvre d'un spectromètre modèle HR1 ou HR1-T de la société ASEQ Instruments (https://www.aseq-instruments.com/, Vancouver, Canada).

ID	Nom	Valeur
SIF02	Continuité des mesures	SILI-Fluo doit mesurer la SIF en continu du lever au coucher du soleil.

Exigences spectro-radiométriques pour la mesure de la SIF :

ID	Description	Valeur
SIF03-1	Gamme spectrale	650 - 780 nm
SIF03-2	Résolution spectrale	≤ 0.4 nm
SIF03-3	Dynamique	16 bits
SIF03-4	Champ de vue	Le champ de vue doit être maximisé pour être représentatif du couvert végétal observé. Il sera dans tous les cas supérieur à 25°.
SIF03-5	Sensibilité	≥ 0.35 (DN $\mu\text{J}^{-1} \text{m}^2 \text{sr nm}$) @760 nm
SIF03-6	Rapport signal à bruit	≥ 300 @750 nm pour la luminance spectrale

DN : Digital Number

Mesure de la réflectance visible

ID	Nom	Valeur
R01	Spectromètre de réflectance	Pour la mesure de la réflectance, SILI-Fluo utilisera un spectromètre miniature de la société ASEQ Instrument (Vancouver, Canada) modèle LR1 ou LR1-T.

ID	Nom	Valeur
R02	Continuité des mesures	SILI-Fluo doit mesurer la réflectance en continu du lever au coucher du soleil

Exigences spectro-radiométriques pour la mesure de la réflectance :

ID	Description	Valeur
R03-1	Gamme spectrale	400 nm – 800 nm
R03-2	Résolution spectrale	≤ 5 nm
R03-3	Dynamique	16 bits
R03-4	Champ de vue	$> 25^\circ$
R03-5	Sensibilité	≥ 20 (DN $\mu\text{J}^{-1} \text{m}^2 \text{sr nm}$) @500 nm
R03-6	Rapport signal à bruit	≥ 300 @500 nm pour la luminance

DN : Digital Number

Mesure active de la fluorescence (LIF)

ID	Nom	Valeur
LIF01	Continuité des mesures	SILI-Fluo doit mesurer la LIF et la luminance de la cible dans la bande spectrale de fluorescence, en continu, de jour comme de nuit.

ID	Nom	Valeur
LIF02-1	Fréquence des impulsions lumineuses	La fréquence des impulsions lumineuses pour l'excitation de la fluorescence sera variable et couvrira une gamme allant de F0=1 Hz à F1=1 kHz pour permettre un fonctionnement non actinique en dessous d'une fréquence Fa comprise entre F0 et F1
LIF02-1	Fonctionnement actinique	A l'obscurité, SILI-Fluo pourra fonctionner en mode actinique pour une fréquence inférieure ou égale à 1 kHz

ID	Nom	Valeur
LIF03	Variation de la fréquence des impulsions lumineuses	La fréquence des impulsions lumineuses pour l'excitation de la fluorescence sera, au choix de l'utilisateur : (i) contrôlable à distance par l'utilisateur, (ii) fonction d'une séquence horaire prédéfinie, (ii) fonction du niveau d'éclairement solaire reçu par la végétation observée

ID	Nom	Valeur
----	-----	--------

LIF04-1	Forme de la surface mesurée	Carrée ou circulaire
LIF04-2	Dimensions de la surface mesurée	≥ 0.5 m (côté ou diamètre) @ 4 m de distance
LIF04-3	Période de mesure	≤ 1 s
LIF04-4	Rapport signal/bruit	≥ 30 @ 8 m de distance

Caméra de surveillance

ID	Nom	Valeur
CAM01	Caméra	SILI-Fluo est équipée d'une caméra de surveillance du couvert végétal
CAM02	Champ de vue	Le champ de vue de la caméra de surveillance englobe les champs de vue des voies active et passive de SILI-Fluo, pour les mesures de fluorescence et de réflectance
CAM03	Fréquence des prises de vue	SILI-Fluo effectue une prise de vue avec la caméra de surveillance à une fréquence d'au moins 30 min
CAM04	Transmission et stockage des images	Les images sont transmises et stockées sur un serveur distant au plus tard 24 heures après la prise de vue.

Transfert des données

ID	Nom	Valeur
TD01	Stockage des données	Les données brutes mesurées par SILI-Fluo seront transférées sur un serveur distant au plus tard 24 heures après la prise de mesure

ID	Nom	Valeur
TD02	Format des fichiers de données	Les fichiers de données brutes et élaborées seront au format CSV et netCDF