

Mise en œuvre d'un traqueur solaire et de son instrumentation sur un site forestier.

BORDENAVE Pierre

Unité expérimentale Forêt Pierroton. INRAE.
<https://doi.org/10.15454/1.5483264699193726E12>



Obtention du BTS TPIL (Mesures Physiques) en 2003. Je suis entré à l'Université de BORDEAUX 1 comme Adjoint Technique en instrumentation de Travaux Pratiques (concours externe). Reprise des études par le CNAM en 2006, puis en 2010 je suis passé Technicien en mesures et instrumentation CVI/CVD au LCTS Université de Bordeaux 1 par concours externe. En 2016, Obtention du Diplôme d'Ingénieur CNAM en Instrumentation et en Septembre 2016 entré par concours externe à l'INRA en tant qu'assistant ingénieur.

Résumé. Dans le cadre du projet XYLOSYLVE, pour réaliser un suivi continu de la composante diffuse de rayonnements naturels d'origine solaire, nous avons installé un traqueur solaire et des capteurs mesurant ces rayonnements dans différents domaines de longueurs d'onde. Dans cet article, nous allons décrire la mise en œuvre de ce traqueur solaire sur un site naturel forestier ainsi que présenter des premiers résultats de mesure. Cet équipement va s'intégrer dans l'instrumentation dédié à l'infrastructure de recherche européenne ICOS (Integrated Carbon Observation System).

Mots clés : XYLOSYLVE, ICOS, traqueur solaire, instrumentation, rayonnement solaire, rayonnement diffus, quantummètre, pyranomètre, pyréliomètre, forêt.

Abstract. In the scope of Xylosylve project and to set up a continuous traceability of the diffused component of natural solar radiance, we has implemented a solar tracker and some sensors to measure this radiance in various wave lengths. In the paper, we will describe the implementation of this solar tracker in a natural forest and we will present the very first measures. This type of equipment will be integrated in the instrumentation dedicated to the european research infrastructure ICOS (Integrated Carbon Observation System).

Keywords : XYLOSYLVE, ICOS, solar tracker, instrumenting, solar radiance, diffused radiance, quantum sensor, pyranometer, pyrhelimeter, forest.

Introduction

La plateforme XYLOSYLVE (Equipex Xyloforest) est dédiée à la mise au point et à l'évolution d'options sylvicoles destinées à la production de biomasse forestière. Les projets développés sur cette plateforme ont pour objectif de contribuer à définir des itinéraires sylvicoles dynamiques et innovants, adaptés au contexte régional des Landes de Gascogne. Il est en effet possible d'y suivre en continu et à long terme les cycles biogéochimiques de l'azote, du carbone, du phosphore et des gaz à effet de serre en forêt.

L'unité expérimentale forestière de Pierroton (UEFP) a en charge l'installation des infrastructures, la mise en place avec la conduite des peuplements expérimentaux et la prise en charge du suivi dendrométrique de ces derniers. En collaboration avec l'unité ISPA (Interactions Sol Plantes Atmosphères), l'unité expérimentale participe au suivi des mesures biophysiques et biogéochimiques. C'est donc dans ce contexte que l'unité expérimentale a procédé à l'installation d'un traqueur solaire. Grâce à cet équipement, nous pourrions mesurer en continu la composante diffuse de rayonnements naturels d'origine solaire.

Le développement de cette technologie a été pensé pour répondre aux contraintes du projet XYLOSYLVE imposées par l'environnement de travail (site naturel) d'une part et aux recommandations de l'infrastructure de recherche européenne ICOS d'autre part. L'acquisition de cet équipement mis en œuvre sur site naturel (et particulièrement en forêt) pourra être partagée et valorisée au sein de la communauté technique ICOS. Cette technologie est un équipement asservi permettant de suivre la course du soleil. L'intérêt de la mise en œuvre de cet équipement répond donc à la volonté d'acquiescer des mesures de rayonnement diffus de grande qualité.

Voici les différentes étapes que nous avons dû suivre pour déployer ce dispositif et obtenir les premiers résultats : choix du site et du type d'énergie, liaison réseau informatique, montage de l'échafaudage et installation du traqueur solaire.

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (100)

Choix de l'Environnement et de l'instrumentation du Dispositif

Le site

Pour déterminer l'emplacement du traqueur solaire, nous devons tenir compte de trois contraintes principales :

- la nécessité d'un horizon dégagé,
- la pérennité du site, à savoir aucune évolution sur les 20 prochaines années,
- un accès à internet proche, qui devra supporter un pont wifi.



Figure 1. Plan d'implantation



Photo 1. Installation du traqueur solaire

Type d'énergie

Sans réseau électrique à proximité sur lequel raccorder le traqueur solaire, nous avons opté pour des panneaux solaires connectés à des batteries qui permettent de stocker l'énergie captée par les panneaux.

Un bilan énergétique a été réalisé afin de déterminer la capacité de stockage de l'énergie dans le but de supporter six jours consécutifs de mauvais temps (Bilan énergétique de 120 W).

Câblage électrique

Afin d'optimiser le stockage d'énergie et d'obtenir le plus de puissance possible, le montage de batteries (batteries utilisées VARTA 150 Ah et 12 V) a été conçu comme représenté sur la figure 3. Le branchement des batteries se fait en étoile (série et parallèle) pour les raisons suivantes : doublement de la tension et de la capacité pour un plus grand stockage d'énergie et une plus grande stabilité. Ce montage fournit du 24 V et du 300 Ah.

Pour le régulateur de charge nous utilisons un module VICTRON de référence MPPT 150.

La distance entre les alimentations et les appareils est d'environ 16 m. Afin d'éviter une perte de charge due à cette distance, les câbles électriques utilisés sont du H07RNF en 3G 2.5 mm².

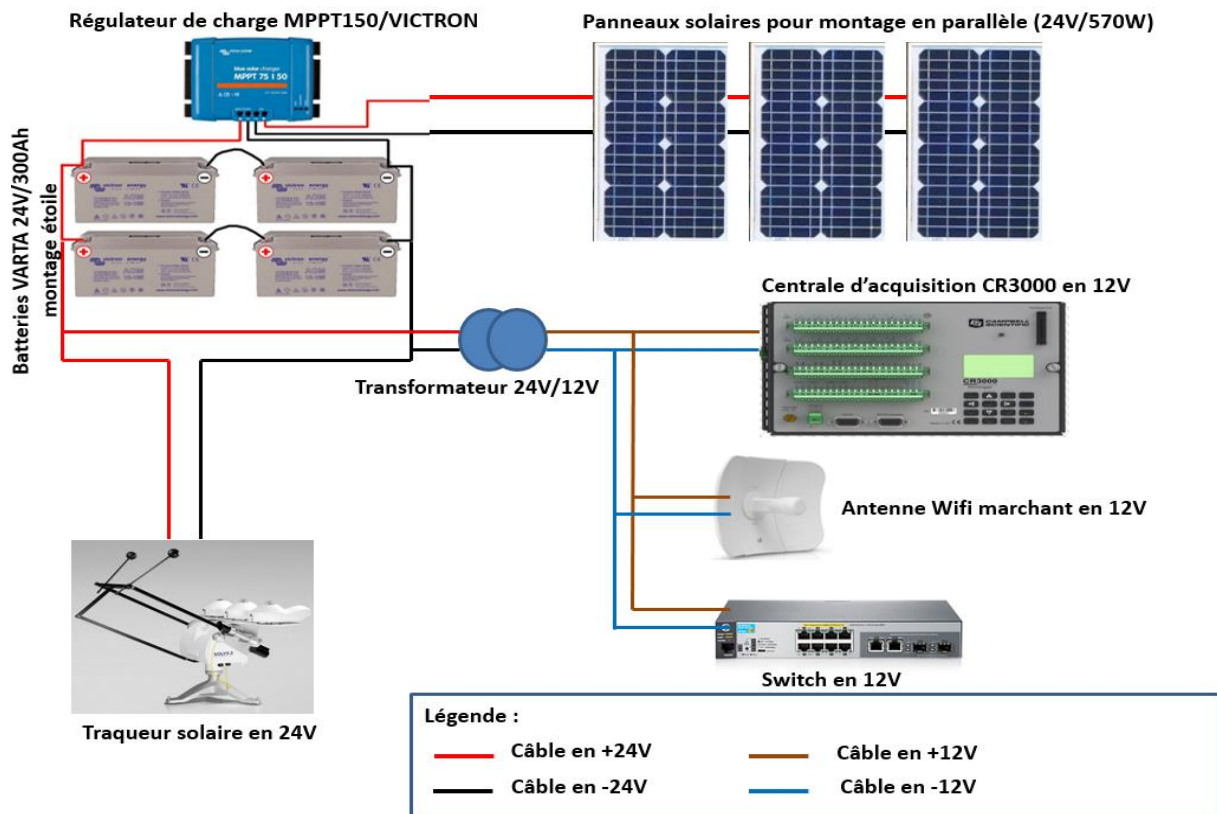


Figure 2. Câblage électrique

Montage échafaudage

Le montage de l'échafaudage doit répondre aux normes en vigueur et comprendre plusieurs étapes.

- Une analyse de sol, réalisé par la société GEOTECH pour valider l'emplacement choisi ;
- Le choix du type d'échafaudage en fonction de la zone de vent, du besoin ou non d'un haubanage, des notes de calculs. Ici, l'infrastructure type « tour industrie autostable » de la société LAYER a été choisi (zone de vent n°1, pas besoin d'haubanage, pas de calculs car les plans de la société sont respectés).
- La réception de chantier.

La hauteur choisie pour l'échafaudage est de 8 m. Le choix a été fait en fonction du matériel en notre possession et pour avoir un horizon le plus dégagé possible (Recommandation ICOS : libre de toute obstruction liée à l'infrastructure (autres instruments, dispositif de montage, structure de la tour, végétation, etc.). Si cela est inévitable, aucun obstacle lié à l'infrastructure ne peut présenter une taille angulaire supérieure à 5° et ne doit projeter aucune ombre sur les capteurs à aucun moment de l'année).

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (100)

Liaison réseau INRA

Le point réseau informatique INRAE le plus proche est celui de la baie informatique qui se situe à la pépinière soit à 430 m. Pour des raisons de sécurité réseau et afin d'assurer la connexion internet sans coupure réseau, des antennes Wifi unidirectionnelle ont été parfaitement fixées et orientées, une au niveau du bâtiment de la pépinière et une sur l'échafaudage. Les antennes ont été installées sur des mâts d'antennes et réglées grâce à une nacelle. Les câbles Ethernet utilisés pour réaliser les liaisons filaires entre le switch et les appareils sont des câbles résistants aux intempéries.

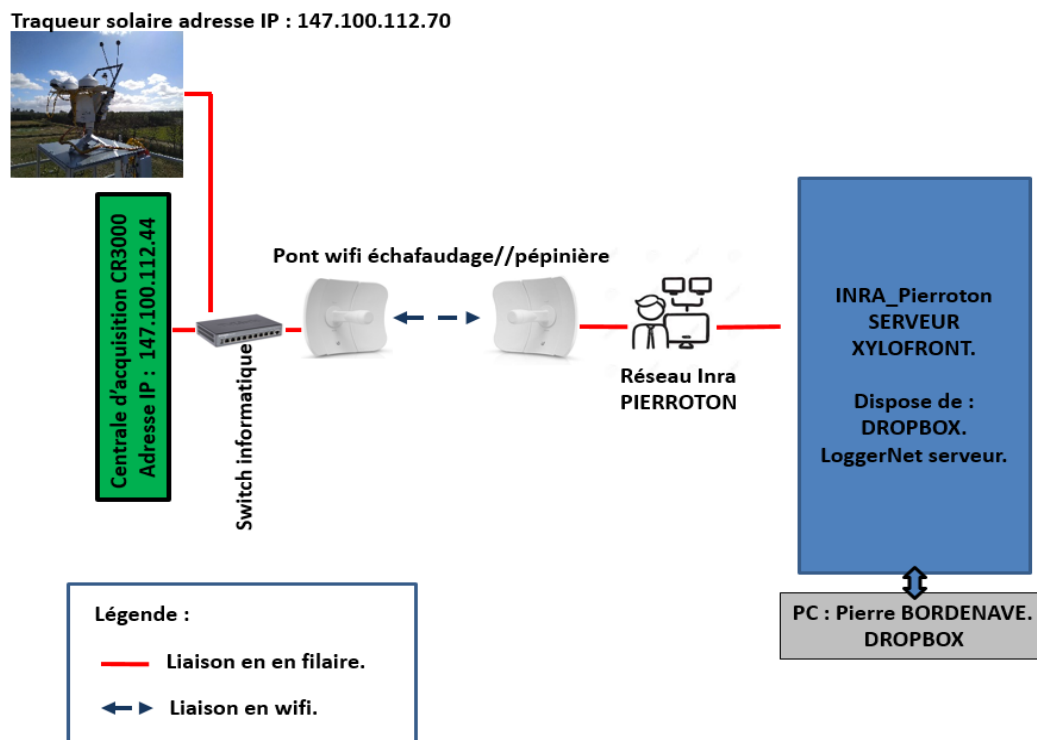


Figure 3. Représentation du réseau informatique mis en place

L'instrumentation

Le traqueur solaire est un équipement asservi permettant la rotation d'un bras synchronisé avec le mouvement apparent du soleil (mesure de l'azimut β et de l'élévation α) dans sa course journalière (voir figure 4) et annuelle.

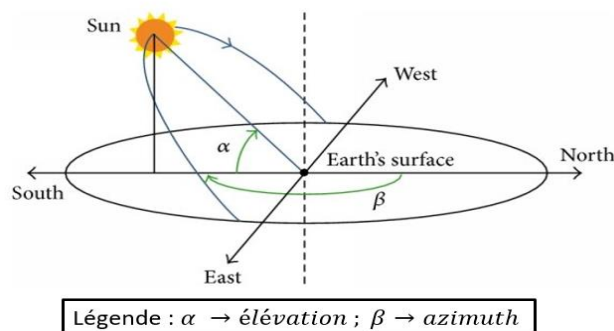


Figure 4. Représentation de l'azimut et de l'élévation pour la course journalière du soleil

Le traqueur permet la mesure de la composante diffuse du rayonnement solaire. Il est équipé d'un kit d'ombrage. Ce dispositif d'ombrage (petite boule en métal noir) fixé sur le bras assure la fonction d'occultation du ou des capteurs afin que celui-ci ne reçoive pas la partie provenant directement et exclusivement du disque solaire. Aujourd'hui, les traqueurs disponibles sur le marché intègrent un GPS permettant le réglage automatique de l'équipement en fonction des coordonnées géographiques du lieu et une interface Ethernet permettant de le connecter à un réseau afin de pouvoir suivre en temps réel le fonctionnement de l'équipement.

Le choix des capteurs a été réalisé dans l'optique d'acquérir des mesures de grandes qualités (association d'un traqueur solaire et de capteurs performants de haute qualité).



Photo 2. CMP22

Deux pyranomètres (modèle CMP22 – classe A, photo 2) sont installés. Les pyranomètres permettent de mesurer le rayonnement dans le domaine solaire en watt par mètre carré (W/m^2). Ils sont associés à un système de ventilation et de chauffage (respectivement nommé unité de ventilation : CVF3 ou CVF4). L'un mesure le rayonnement global et l'autre qui est ombragé, mesure le rayonnement diffus (valeurs de mesures dans la gamme spectrale comprise entre 200 nm et 3600 nm).



Photo 3. PAR PQS1

Deux quantummètres (*Quantum sensor* en anglais nommé : Capteur PAR modèle PQS1, photo 3) servent à mesurer le rayonnement photosynthétiquement actif (dans la gamme spectrale comprise entre 400 nm et 700 nm : spectre de la lumière dans le visible) et sa composante diffuse. L'unité de mesure est en $\mu mol/m^2/s$.



Photo 4. CHP_1

Un pyréliomètre (modèle CHP_1, photo 4) mesure (en W/m^2) le rayonnement solaire direct, c'est-à-dire le rayonnement provenant directement et exclusivement du disque solaire (valeurs de mesures dans la gamme spectrale comprise entre 200 nm et 4000 nm).

Programmation et câblage

Le programme de la centrale d'acquisition des données (modèle CR3000 de la marque Campbell Scientific Ltd) est réalisé en CR basic (langage de programmation CAMPBELL). Il comporte plusieurs spécificités :

- acquisition des signaux délivrés par les capteurs (enregistrées et mesurées en fonction des instructions prédéfinies par ICOS).
- récupération de l'adresse IP du traqueur solaire.
- récupération des données GPS du traqueur solaire qui sont l'azimut et l'élévation (obtention des valeurs pratiques).
- calcul de l'azimut et de l'élévation par l'intermédiaire de la centrale CR3000 (obtention de valeurs théoriques). Dans le but de faire une inter-comparaison avec les coordonnées fournies par le GPS est réalisée en continu afin d'estimer une éventuelle dérive du traqueur.

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (100)

- calcul du point de rosée (et du point de givre) par la formule de MAGNUS TETENS (ces températures sont calculées à partir des résultats de mesure fournies par la sonde CS215, c'est-à-dire la température et l'humidité relative de l'air).
- déclenchement des chauffages (des unités de ventilation : CVF3 et CVF4) des deux pyranomètres dans le but d'éviter la formation de givre sur leurs dômes en verre de quartz.

Les parties détaillées dans le cahier des techniques sont les suivantes :

- sous-programme de l'inter-comparaison de l'azimut et de l'élévation par les coordonnées GPS du traqueur en fonction du calcul numérique.

Les lignes de codes créées pour la surveillance du traqueur solaire donnent le tableau ci-dessous (tableau 1). Cette observation est visible grâce au logiciel Device Config Utility (Campbell Scientific Ltd).

Course soleil	
Record No	5 534
Time Stamp	03/07/2019 13:50:00
Azimuth	205,163
Elevation	66,5655
Azimuth_calcul	209,1804
Elevation_calcul	65,85658
CMP22_chauffe	0
AirTC_8m	28,978
RH_8m	52,21
Temp_rose	18,17516
CMP22globaltemp	33,07882

Tableau 1. Tableau de résultats course du soleil Azimut et Elévation

L'encadré en rouge représente les données délivrées par le GPS, celui en vert correspond aux calculs réalisés par la centrale CR3000. Cela permet de vérifier rapidement une éventuelle dérive du traqueur.

Pour affiner la vérification du bon fonctionnement du dispositif, il est possible de représenter ces données graphiquement, comme les deux exemples ci-dessous.

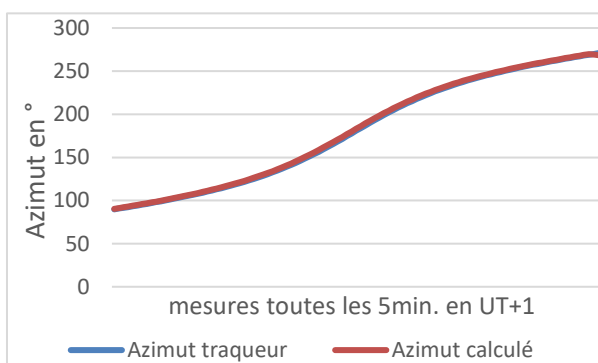


Figure 5. Azimut traqueur VS Azimut calculé sur un cycle diurne

Pour la figure 5 nous pouvons dire que lorsque le corps des deux courbes est superposé, il n'y a pas de dérive.

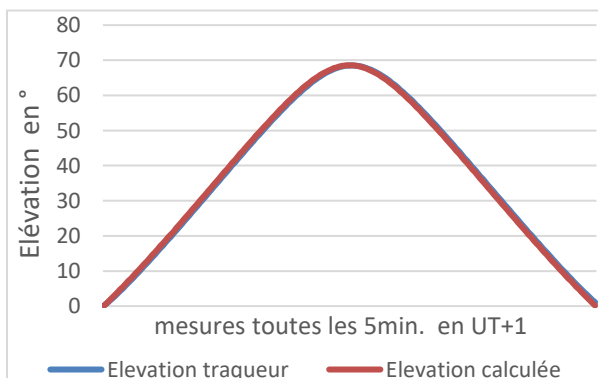


Figure 6. Elévation traqueur VS Elévation calculée sur un cycle diurne

Nous pouvons voir que sur la figure 6 les élévations sont parfaitement superposées.

- sous-programme qui assure le lancement des chauffages des pyranomètres par la mesure du point de rosée.

Les dômes des pyranomètres CMP22 sont sensibles à la formation de rosée et de givre en fonction des températures de l'air et du point de rosée. Pour éviter cela, les unités de ventilation associées aux capteurs sont équipées de résistances permettant de chauffer l'air et ainsi faire fondre les éventuelles traces de givre. Le dimensionnement de l'alimentation électrique a été prévu de manière à répondre à la consommation importante de ces unités de ventilation et de chauffage.

Le déclenchement du chauffage est réalisé lorsque la température du point de rosée est inférieure à la température du corps du capteur. Un relais (référence EI100D5-12, figure 7) est alors commuté via un port de contrôle de la centrale pour alimenter électriquement les résistances de chauffage.

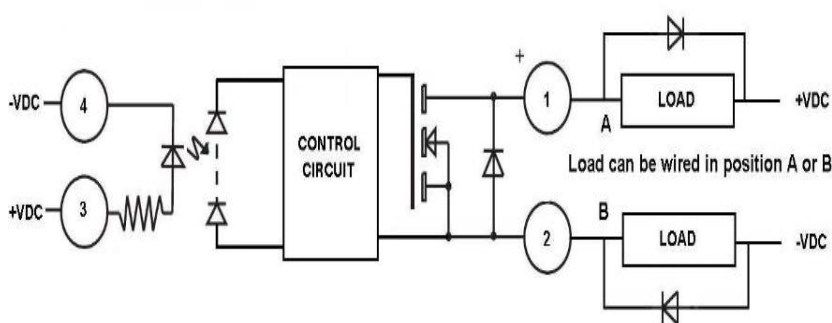


Figure 7. Plan du relais EI100D5-12

Le descriptif du câblage des relais est le suivant : la borne 4 du relais est connectée à la masse d'alimentation de la centrale CR3000 ; la borne 3 au port de contrôle C2 (contrôle d'entrée/sortie de la CR3000) ; la borne 1 à l'alimentation +12 V ; enfin sur la borne 2 d'un des relais aux fils noir/blanc de l'unité de ventilation CVF4 et aux fils ver/blanc de l'unité de ventilation CVF3.

Pour avoir une grande réactivité au niveau des chauffages, les mesures sont faites toutes les 5 minutes.

Course soleil	
DataTableInfo	Record No 5 534
ICOS_RAY_herm_20S	Time Stamp 03/07/2019 13:50:00
Public	Azimuth 205,163
Ray_30min_moy	Elevation 66,5655
Status	Azimuth_calcul 209,1804
	Elevation_calcul 65,85658
	CMP22_chauffe 0
	AirTC_8m 28,978
	RH_8m 52,21
	Temp_rose 18,17516
	CMP22globaltemp 33,07882

Tableau 2. Tableau de résultats course du soleil Trosée

La table de données de la centrale CR3000 (Tableau 2, encadré en jaune) permet de visualiser les données mesurées par la sonde CS215 et calculées par la centrale CR3000 ainsi que la variable « CMP22_chauffe » indiquant le déclenchement du chauffage (valeur 0 ou 1 : arrêt / marche). Les Variables AirTC_8m et RH_8m correspondent aux mesures de la sonde CS215, Temp_rose indique la température du point de rosée, CMP22globaltemp la température du corps du pyranomètre.

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (100)

Exemple de courbe que l'on peut tracer pour observer ces types de données :

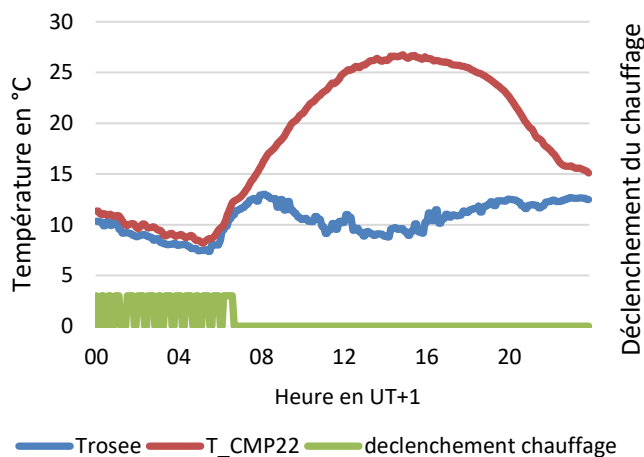


Figure 8. Déclenchement du chauffage des CMP22 sur un cycle journalier (15/06/2019)

Sur ce graphique on observe le déclenchement du chauffage (passer de 0 à 1) lorsque la température interne du CMP22 atteint la température du point de rosée calculée.

Déploiement sur le terrain

Montage du matériel sur l'échafaudage et orientation du traqueur solaire



Photo 5. Alignement du trépied

Du fait de son encombrement, l'intégralité du matériel a été montée grâce à un tracteur nacelle.

A l'aide d'une boussole, les axes des quatre points cardinaux ont été définis puis tracés sur le tablier qui supporte le traqueur solaire, ce dernier devant être aligné dès sa première mise en marche sur l'Est. Le trépied et l'étiquette E du traqueur (cercle rouge) sont aussi alignés dessus (voir photo 5 ci-contre).

Le réglage de la planéité du traqueur solaire

Une fois l'orientation du traqueur dirigée à l'Est, le réglage de la planéité doit être fait grâce à des vis situées sur le trépied (vis de réglage). Lorsque la bulle du niveau présent sur le traqueur est au centre, cela signifie que le traqueur est à l'horizontale. Ce réglage est alors terminé. Toute cette étape est décrite dans la notice du traqueur.

Le réglage des capteurs et du kit d'ombrage

Des supports pour les quantummètres PQS1 sont créés afin de les aligner horizontalement avec les pyranomètres (qu'ils soient sur le même plan horizontal). Ici aussi la planéité de ces capteurs a été faite avec leur niveau à bulle (intégré). A la suite de quoi le kit d'ombrage peut être installé. Pour ce faire, il faut se placer dans les conditions météorologiques suivantes : un jour de ciel bleu et attendre le midi solaire (heure à laquelle le soleil est au maximum). Les boules d'ombrages sont fixées selon les préconisations de la notice.



Photo 6. Alignement des capteurs

A l'aide d'une feuille blanche, il est possible d'affiner le réglage en déplaçant celle-ci de la boule d'ombrage jusqu'aux capteurs qui mesurent le rayonnement diffus (un PAR PQS1 et un CMP22). Le kit d'ombrage est réglé lorsque l'ombre de la boule se dépose sur la feuille située sur la tête de mesure du capteur.



Photo 7. Alignement du CHP_1

Le réglage le plus sensible du dispositif est celui du pyréliomètre (CHP_1) qui mesure le rayonnement direct du soleil.

Il est important que le CHP_1 soit réglé en direct sur le centre du soleil.

Pour affiner les réglages on joue plus ou moins, mm par mm, sur l'axe de rotation horizontal du traqueur solaire et sur l'axe d'élévation du kit d'ombrage jusqu'à ce que le soleil pointe sur le trou de visée (voir photo ci-contre).

Résultats préliminaires

Mesures du rayonnement solaire global (CMP22), des composantes directes (CHP_1) et diffuse (CMP22)

Les résultats de mesure correspondent à des valeurs moyennes intégrées sur 30 minutes.

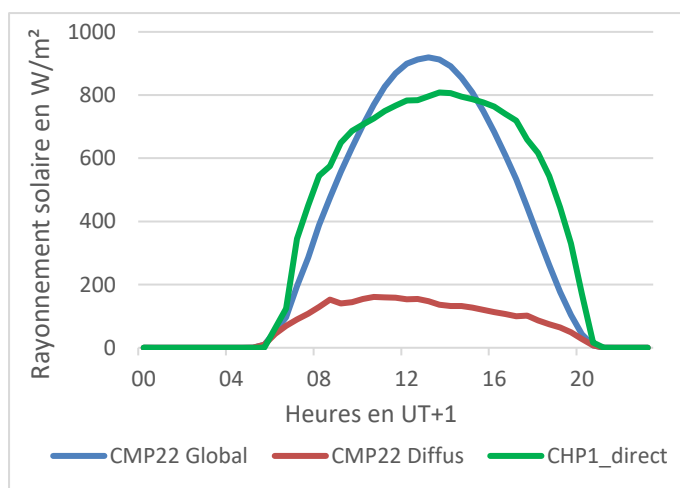


Figure 9. Exemple de résultats acquis par jour de ciel clair

On observe un rayonnement global maximum avec des valeurs d'environ 900 W/m² au niveau du zénith du soleil et un rayonnement diffus d'environ 150 W/m². On remarque bien que les mesures du pyréliomètre (CHP_1) sont élevées et indiquent bien des données pour une journée ensoleillée.

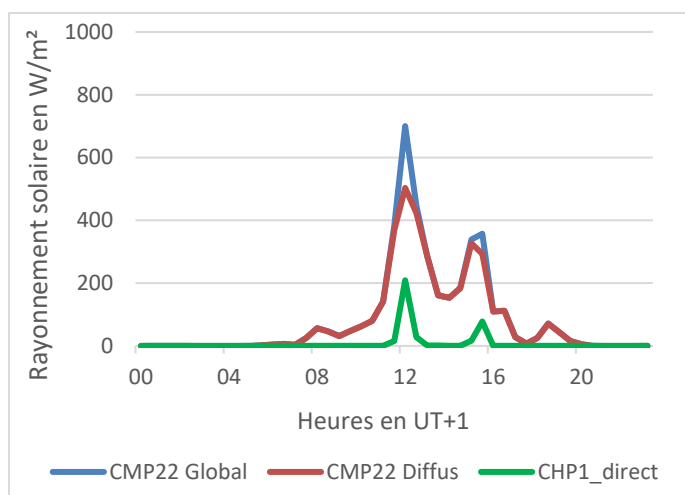


Figure 10. Exemple de résultats acquis par jour de ciel nuageux

Lorsque le soleil est ombragé (confirmé par les mesures du CHP_1 avec ces valeurs qui tendent vers $0 W/m^2$), les valeurs du rayonnement solaire global et diffus sont quasiment égales.

Mesures du rayonnement photosynthétiquement actif (PQS1), de sa composante diffuse (PQS1) et du rayonnement solaire direct (CHP_1)

Les résultats de mesure correspondent à des valeurs moyennes intégrées sur 30 minutes.

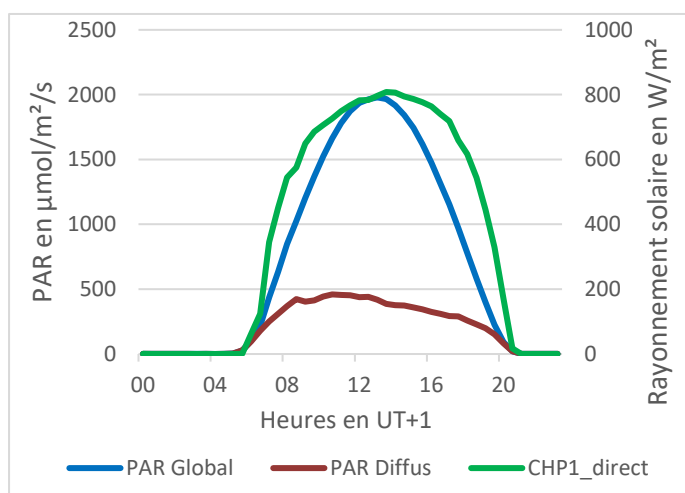
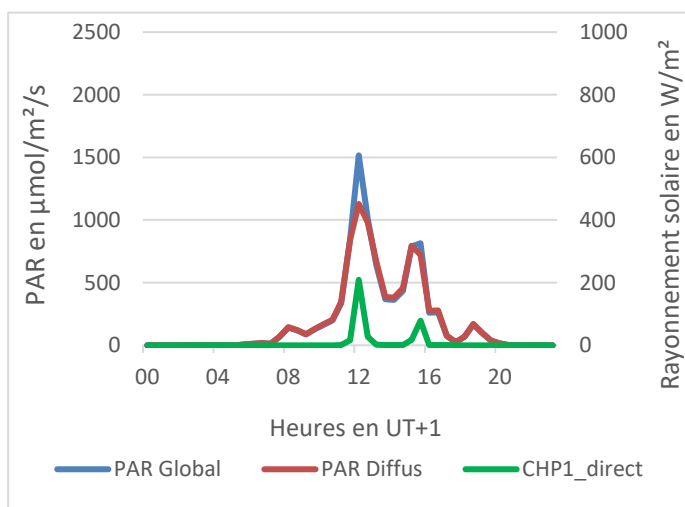


Figure 11. Exemple de résultats acquis par jour de ciel clair



On observe sur la figure 11, un rayonnement photosynthétiquement actif (quantumètres PQS1) maximum ayant des valeurs d'environ $2000 \mu mol/m^2/s$ au niveau du zénith du soleil et la composante diffuse d'environ $500 \mu mol/m^2/s$. On remarque bien que les mesures du pyréliomètre (CHP_1) sont élevées. Ces résultats sont caractéristiques d'une journée ensoleillée.

Figure 12. Exemple de résultats acquis par jour de ciel nuageux

Ce graphique (Figure 12) nous montre bien qu'il y a des passages nuageux. Les mesures du rayonnement photosynthétiquement actif sont quasiment égales aux mesures de la composante diffuse lorsque le ciel est totalement couvert.

Mesures du rayonnement solaire direct avec le pyréliomètre seul (CHP_1)

Pour observer le travail du pointeur solaire CHP_1 et sa réactivité en fonction des conditions météorologiques, il faut des mesures en lecture directe (*sample*) toutes les 20 secondes en W/m^2 .

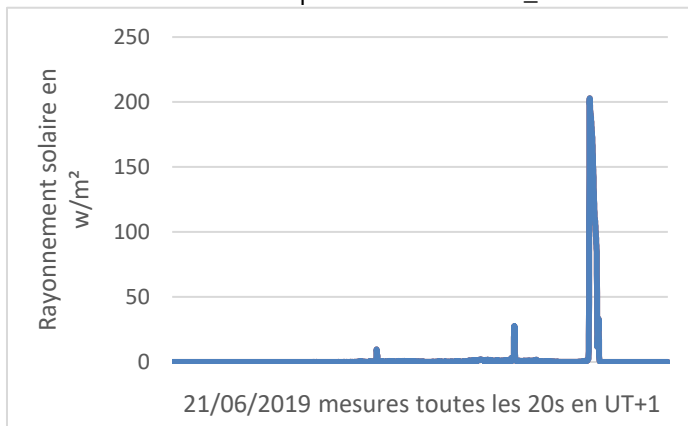


Figure 13. Evolution ciel noir et temps de pluie

Sur la figure 13, on voit qu'il y a eu juste deux éclaircies sur la journée (16H30 et de 20H00 à 20H40).

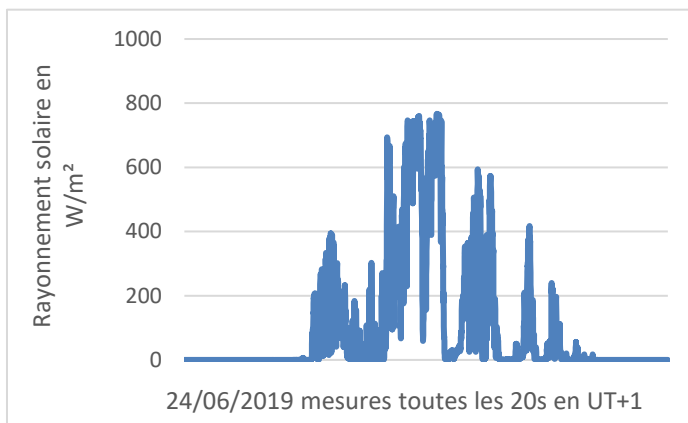


Figure 14. Mesure du rayonnement solaire avec quelques passages nuageux

La figure 14 nous montre qu'il y a des passages nuageux tout au long de la journée car les mesures varient entre 0 et 750 W/m^2 .

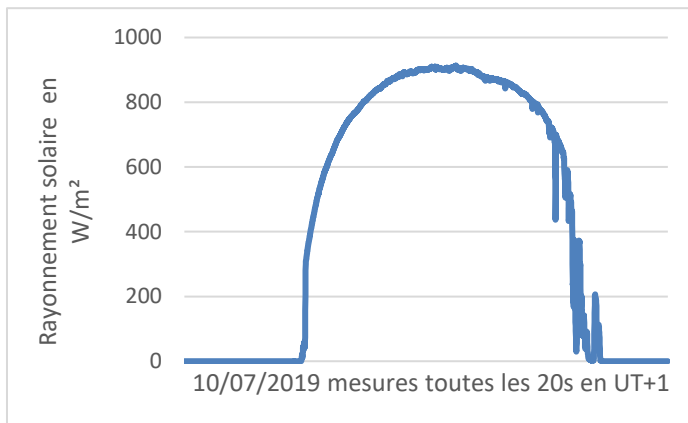


Figure 15. Evolution journalière du rayonnement solaire avec passage nuageux en fin de journée

Enfin sur la figure 15, on observe des données d'une journée de ciel bleu avec des valeurs montant jusqu'à 900 W/m^2 . Par contre en fin de journée à partir de 19h00 il y a des variations qui correspondent à des passages nuageux.

Sur les figures 13, 14 et 15, les valeurs des mesures à 0 W/m^2 correspondent à la période nocturne.

Observation sur les mesures et vérification

La forme (presque carrée) de la réponse journalière du rayonnement direct pour un jour de beau temps (sans changement des caractéristiques de l'atmosphère est d'environ 700 W/m^2) est expliquée par l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée par les rayons du soleil. Ensuite, cette réponse peut être atténuée, modifiée en

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (100)

fonction des déplacements de masses d'air et de leur composition. Ensuite, les passages nuageux atténuent fortement le rayonnement direct comme on le voit sur les graphiques, jusqu'à 0 W/m² lorsque le soleil est totalement occulté.

Les mesures du rayonnement global et du rayonnement photosynthétiquement actif pour une journée de ciel clair donnent des paraboles avec des valeurs maximum d'environ 2000 µmol/m²/s pour le PAR PQS1 et 900 W/m² pour le CMP22.

Lorsque nous avons des journées nuageuses, le rayonnement global et sa composante diffuse sont égaux, ce qui est confirmé par les mesures du CHP_1 (tendant vers 0 W/m²).

Conclusion et perspectives

Ce dispositif est fiable. Il marche depuis un an avec des mesures en continu sans coupure d'énergie et du pont wifi. La transmission des données est en temps réel. La prochaine évolution du système à prévoir est de mettre en place un suivi sous forme graphique en temps réel (monitoring) avec les mesures clés pour une meilleure réaction et de correction en cas de problème répondant ainsi aux exigences des instructions ICOS. Notre objectif à court terme est également de valoriser cette expérience au sein de la communauté technique d'ICOS.

Remerciements

Le traqueur solaire a été financé par la Région Nouvelle Aquitaine et l'ANR (Equipex Xylsosylve), ses mesures participent à la station de Salles (Bilos) (FR-Bil).

Je tiens tout particulièrement à remercier Patrick PASTUZKA, Denis LOUSTAU et Frédéric BERNIER qui m'ont confié ce projet.

Les différents acteurs avec qui j'ai eu beaucoup de conversations scientifiques sur ce projet (C. CHIPEAUX et P. SIMONNEAUD). L'équipe de montage pour l'échafaudage (C. CHIPEAUX, L. SALERA, H. BIGNALET et B. DOKHELAR) et le validateur (JM. BONNEFOND). L'équipe d'installation du traqueur (B. DOKHELAR et B. ISSENHUTH). T. LABBE et B. LAGARDERE pour avoir finalisé les connections du pont wifi au réseau INRAE.

F. GENERALE et A. MATHOU pour l'aide à la relecture. Et enfin O. MARLOIE pour les différentes corrections apportées.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-SA).



<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Le Cahier des Techniques de l'Inra », la date de sa publication et son URL).

Bibliographie

Reinhold Rosemann (2011) *A Guide to Solar Radiation*. Kipp&Zonen.

World Meteorological organization (2018) *Guide to instruments and Methods of observation, Volume 1, Measurements of Meteorological Variables*.

Nicolini, G., Sabbatini, S., & Papale, D. (2017). ICOS Ecosystem Instructions for Radiation Measurements (Version 20180620). ICOS Ecosystem Thematic Centre. <https://doi.org/10.18160/zwgb-wrrx>,

https://fr.wikipedia.org/wiki/Point_de_ros%C3%A9e

<https://www.kippzonen.fr/Product/124/SOLYS2-Pointeur-Solaire#.XSRd6nvgqUk>