



Conception et réalisation d'un dispositif portatif de capteur de rayonnement PAR

Arnaud Coffin, Christelle Gée, Bonnefoy-Claudet Clément, Morgane Chassaigne, Jansen Arthur

► To cite this version:

Arnaud Coffin, Christelle Gée, Bonnefoy-Claudet Clément, Morgane Chassaigne, Jansen Arthur. Conception et réalisation d'un dispositif portatif de capteur de rayonnement PAR. Cahier des Techniques de l'INRA, 2021, 107, pp.1-16. hal-03348779

HAL Id: hal-03348779

<https://institut-agro-dijon.hal.science/hal-03348779>

Submitted on 20 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

PARADe
(PAR Acquisition Device)

Conception et réalisation d'un dispositif portatif de capteur de rayonnement PAR

Arnaud Coffin ^{1,*}, Christelle Gée ^{1,a}, Clément Bonnefoy-Claudet ¹, Morgane Chassaigne ¹, Arthur Jansen ¹



Arnaud Coffin. J'ai commencé ma carrière professionnelle en 1998 dans l'industrie agro-alimentaire. Sensible depuis toujours aux questions scientifiques, en 2005 j'ai intégré l'INRA. Technicien d'instrumentations j'ai pu développer des outils de mesures diversifiés comme des systèmes de mesures automatiques de GES ou des « pots capteurs » : prototype pour lequel j'ai reçu le Prix de l'Innovation par la société Campbell Scientific. J'ai souhaité valoriser l'appui technique à la recherche en participant à des activités d'enseignements et de transfert. Pour cela j'ai intégré en février 2014 l'école d'ingénieurs AgroSup Dijon. Assistant Ingénieur je partage mes activités entre l'appui à l'enseignement et des projets de recherche dans l'UMR Agroécologie. Je travaille sur la compréhension du rôle filtre du sol dans les agrosystèmes en particulier sur sa capacité à dégrader les intrants.



Christelle Gée est née à Dijon (France) en 1969. Après une maîtrise en chimie physique à l'Université Paris Saclay, elle a obtenu un doctorat en physique chimique avec la même université (1995-1997). Elle rejoint l'Université de Cergy-Pontoise la même année en tant que Maître de Conférences en Astrophysique pendant 5 ans. Début 2002, elle rejoint AgroSup Dijon où elle crée l'équipe Agriculture de Précision. Elle devient professeur en 2008 dans l'Unité Mixte de Recherche Agroécologie (INRA/AgroSup Dijon/Université de Bourgogne). Elle a consacré ses recherches à la caractérisation des parcelles cultivées avec des capteurs de proxi-détection (systèmes d'imagerie optique et multispectrale) pour réduire l'utilisation d'herbicides. Dans ce contexte, elle a développé des stratégies innovantes pour une agriculture durable.

Keywords: agroécologie, agriculture de précision, imagerie visible et multispectrale, modélisation, désherbage

¹ AgroSup Dijon, INRA, Université de Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

* arnaud.coffin@agrosupdijon.fr

^a <https://orcid.org/0000-0001-9744-5433>



Clément Bonnefoy-Claudet. Souhaitant travailler dans la recherche sur les domaines de l'agriculture et de l'environnement, j'ai intégré une école d'ingénieur en agronomie à la suite de mon bac, AgroSup Dijon. Lors de ces cinq années d'études j'ai pu à plusieurs reprises avoir des expériences professionnelles dans le monde de la recherche scientifique. Notamment lors de ma quatrième année où j'ai pu travailler sur le développement d'un système portable de mesure du rayonnement PAR. Je me suis orienté lors de ma dernière année vers le domaine des matières organiques du sol. Je suis désormais en première année de thèse sur la diversité et la réactivité des matières organiques des sols forestiers du Morvan au sein de l'UMR Biogéosciences



Morgane Chassaigne. Sensible aux problématiques environnementales depuis longtemps, je me suis rapidement tournée vers des études en lien avec l'agronomie et l'environnement dans sa globalité. Etudiante à AgroSup Dijon (promotion 2018-2021), j'ai découvert le monde de la recherche lors de différents projets pédagogiques relatifs à l'étude des sols et des cultures. Ces projets m'ont amenée à travailler sur des dispositifs de mesures innovants pour le monde agricole. Je débute ma carrière professionnelle dans le domaine des énergies renouvelables afin d'aborder les aspects énergétiques – et non agronomiques – du changement climatique.



Arthur Jansen. J'ai commencé en 2018 une formation d'ingénieur agronome à Agrosup Dijon en tant que fonctionnaire. Durant cette formation, j'ai réalisé un stage sur la programmation d'un dispositif comportant un capteur PAR et une carte d'acquisition programmable. J'ai effectué mon stage de fin d'étude à la chambre d'agriculture de Bourgogne-Franche-Comté sur la conception d'un outil de cartographie en ligne pour la diffusion d'informations régionales sur l'eau et le changement climatique. Depuis septembre 2021 j'occupe un poste en tant que chef de l'unité « Projets d'exploitations » à la Direction Départementale des Territoires de l'Ain. Cette unité gère principalement l'instruction des dossiers pour les dispositifs d'aide du second pilier de la PAC relatifs à l'installation et à l'investissement des exploitations agricoles.

Résumé. Dans un contexte de changement climatique et de pratiques agricoles tournées vers la préservation des ressources, il devient indispensable de suivre précisément la croissance des cultures pour amener une réponse rapide en cas de problèmes (stress, bio-agresseurs...). La croissance des plantes repose sur un processus bioénergétique appelé photosynthèse, elle-même stimulée par le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR). Combinée au microclimat, cette grandeur devient également un paramètre essentiel dans certains modèles de prédiction. Cependant les coûts ou la complexité des solutions commerciales (capteurs/centrale d'acquisition) sont des freins pouvant retarder la compréhension de certains phénomènes. L'objet de cet article est de proposer une alternative à faible coût, miniaturisée et innovante. Cet article explique comment concevoir, construire et calibrer un dispositif de mesure de la quantité de rayonnement PAR, PARADe (PAR Acquisition Device), en combinant un capteur PAR abordable (SOLEM PAR/LE) et une plate-forme de développement Open Source (ARDUINO). La tension électrique du capteur est enregistrée sur l'ARDUINO après amplification. L'étalonnage est fait par comparaison avec une chaîne d'acquisition robuste composée d'un capteur PAR certifié (PQS1 PAR Quantum Sensor Kipp&Zonen) et d'une centrale d'acquisition (CR1000 Campbell Scientific). Les résultats sont présentés et discutés. Le système est opérationnel, utilisable sur l'ensemble des valeurs PAR attendues. La fiabilité et la validité des données sont comparées à celles du système existant. En perspective il est envisagé qu'un smartphone, une tablette numérique ou un ordinateur portable servent d'interface avec le dispositif via une connexion Bluetooth ou Wifi.

Abstract. In a context of climate change and agricultural practices focused on the preservation of resources, it becomes essential to precisely follow the crop to bring about a rapid response to problems (stress, weeds and diseases, etc.). Plant growth is based on a bioenergetic process called photosynthesis, which is itself stimulated by photosynthetically active radiation (PAR). Combined with the microclimate, this parameter is considered as an essential parameter in prediction models. However, the costs or the complexity of commercial solutions (sensors/ data logger) could be an issue that can delay the understanding of some phenomena. The purpose of this article is to provide a low cost, miniaturized and innovative alternative. This article explains how to design, build and calibrate a device for measuring the amount of PAR radiation, named : PARADe (PAR Acquisition Device), by combining an affordable PAR sensor (SOLEM PAR / LE) and an open source development platform (ARDUINO). The sensor voltage is recorded on the ARDUINO after amplification. The calibration is done by comparison with a robust acquisition chain composed of a certified PAR sensor (PQS1 PAR Quantum Sensor Kipp & Zonen) and a data logger (CR1000 Campbell Scientific). The results are presented and discussed. The system is operational, usable on all the expected PAR values. The reliability and validity of the data are compared to that of the existing system. In perspective, a smartphone, a digital tablet or a laptop could be the interface with the device via a Bluetooth or Wifi connection.

Mots-clés : PAR – ARDUINO – capteur – dispositif portatif – acquisition - device

Introduction

Le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), évalué de 400 à 700 nm, est la partie du rayonnement solaire utile pour la photosynthèse. Il contribue donc à la croissance et au développement des plantes (Chartier et al., 1989). L'évaluation de ce rayonnement permet de caractériser la croissance en matière sèche d'un couvert végétal, que ce soit d'une forêt ou d'une culture (Varlet-Grancher et al., 1982). La mesure de ce rayonnement est donc une variable clé en écophysiologie végétale et donc elle intervient dans de nombreux modèles de fonctionnement des plantes (tels que STICS : Brisson et al., 2003 ; APSIM : Keating et al., 2003 ; AZODYN : Jeuffroy et Recous, 1999), afin de prédire leur croissance (Pashiardis et al. 2017; Sellers et al. 1997). Ces modèles de prédiction de croissance sont de plus en plus utilisés dans les outils d'aide à la décision pour, par exemple, le pilotage de la fertilisation d'une culture ou encore pour l'estimation de rendement.

La variabilité temporelle de ce rayonnement est très importante et dépend en grande partie des conditions météorologiques, ce qui nécessite donc une grande adaptabilité des plantes (Tomson et al 2006; Sager et Craig Mc Farlane 1997). Ainsi, avoir des mesures très précises de ce rayonnement nécessite que les capteurs soient au plus près de la parcelle cultivée.

De manière générale, l'évaluation du rayonnement PAR se fait par la mesure de la densité de flux de photons photosynthétiques (PPFD) via une chaîne d'acquisition composée d'un capteur PAR et d'une centrale d'acquisition de données. Un capteur PAR est constitué d'une cellule photovoltaïque en silicium amorphe (Chartier et al., 1989 ; Street, 2000) qui transforme le signal lumineux (i.e. photons) en un signal électrique (une tension). Elle est noyée dans une résine polyuréthane et s'intègre dans un boîtier qui peut être en plastique ou en métal. La face supérieure du boîtier est ensuite fermée avec du plexiglas qui permet à la lumière d'entrer dans le capteur. Le capteur PAR fonctionne à une exception près comme une cellule photovoltaïque de panneau solaire. Il dispose d'une résistance de charge qui permet de mettre le capteur dans un état de quasi court-circuit ; ce qui permet de n'avoir qu'une faible intensité en sortie, mais surtout d'avoir une relation linéaire entre la tension mesurée (mV) et la mesure de la quantité de rayonnement PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) qui est fonction de la résistance choisie par le constructeur (SOLEMS S.A. 2011; Labouret 2008). Néanmoins les capteurs de haute qualité, calibrés et étalonnés ont un coût de plusieurs centaines d'euros, idem pour les centrales d'acquisition certifiées. Très souvent les constructeurs de centrales ont développé des logiciels propriétaires (programmation, communication et récupération des données) qui peuvent contraindre les utilisateurs dans le développement de fonctions supplémentaires. En plus des contraintes logicielles, il existe également des contraintes matérielles. En effet si l'on souhaite ajouter une extension (module wifi par exemple) sur la centrale, il faut l'acheter au constructeur de la centrale à un prix élevé. Enfin, elles sont souvent encombrantes et lourdes à transporter, car le plus souvent dédiées aux grandes expérimentations pour contrôler des dizaines de capteurs.

Pour une utilisation très localisée et pour peu de capteurs, des solutions miniaturisées se développent de plus en plus grâce aux technologies de l'information et de la communication (TIC) et l'émergence de mini-cartes électroniques qui permettent d'enregistrer des données. Il existe actuellement sur le marché de nombreuses cartes programmables avec un large choix de bibliothèques permettant d'acquérir des données, comme par exemple les cartes ARDUINO, Raspberry PI ou d'autres dérivés. Ces cartes ont l'avantage d'être fiables, d'un faible coût, facilement programmables grâce à des logiciels libres partagés en open-source et bénéficiant d'une importante communauté d'utilisateurs. La carte la plus utilisée pour des situations d'acquisition de données ou la puissance de calcul nécessaire est assez faible est la carte ARDUINO. De plus cette carte est compatible avec de nombreuses extensions qui permettent d'ajouter des fonctionnalités au système au travers de modules supplémentaires, par exemple une horloge pour horodater les données, un écran ou encore une carte wifi pour la communication et le transfert de données vers d'autres périphériques (ordinateur, smartphone, ...).

Cet article présente la conception du dispositif portable, PARADe. De faible coût, il permet d'enregistrer en continu les valeurs issues d'un capteur de rayonnement PAR. Les objectifs de ce travail sont d'évaluer les performances par comparaison à des dispositifs standards et professionnels. Des courbes d'étalonnage seront réalisées et les résultats seront analysés et discutés pour une utilisation en conditions réelles.

Matériels et méthodes

Dispositif expérimental

Le nouveau dispositif portable (Figure 1) a été conçu pour mesurer de manière autonome le rayonnement PAR tout en utilisant une technologie open-source et des éléments au prix abordable (Tableau 1). Ce dispositif devait également répondre à plusieurs critères, il devait être facilement transportable donc peu encombrant, léger (poids total de 15 kg avec des parties démontables) et être étanche à l'eau et à la poussière et autonome en énergie. Le montage de l'ensemble du dispositif est également aisément réalisable. L'ensemble des composants ainsi que leur prix sont décrits dans le tableau 1.

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2021 (107)

Tableau 1: Liste du matériel et des coûts associés (Prix à titre indicatif en 2019)

Elément	Prix (€)
Tube rond (1,1 m ; diamètre 40 mm)	10,90
Boite de dérivation Legrand 32x24x12 cm	77,16
Panneau solaire (10W) + régulateur de charges	64,99
Capteur SOLEMS PAR/LE	256,32
Pied : tube carré (1,8m/40x40mm)	24,00
PVC rigide (fond de boite et support capteur) 32x24 + 2*50x10	23,80
Support panneau solaire	15,90
Batterie 12V 3,2 ah	19,99
ARDUINO méga 2560	41,26
Shield microSD ARDUINO	18,04
Horloge ARDUINO DS1307	7,81
Carte microSD 4Go	7,99
Plaque de branchement Proto Shield ARDUINO	4,8
AD 623	6,35
Résistance 4700 ohms X1	0,14
Résistance 2200 ohms X1	0,14
Résistance 1000 ohms X1	0,14
Résistance 220 ohms X1	0,13
Résistance 10000 ohms X1	0,14
Bouton poussoir	0,59
LED	0,43
Câbles électriques	1,85
Presse étoupe X3	3,67
Câble d'alimentation ARDUINO pour pile 9V	3,00
Pile CR1225	2,90
Bornier x3	2,40
TOTAL	594,85

Pour obtenir un dispositif autonome permettant de fonctionner de manière ininterrompue pendant plusieurs semaines, nous avons choisi d'intégrer un panneau solaire et une batterie (12V ; 3.2ah) à notre bâti. Nous avons choisi un panneau d'une puissance de 10 W, ce qui permet d'avoir une marge de sécurité confortable et de ne pas avoir de coupure d'alimentation même si le dispositif est confronté à plusieurs jours nuageux consécutifs. Le panneau solaire et la batterie sont connectés au régulateur de charge, celui-ci gère donc la charge de la batterie et sa décharge. Le dispositif est donc autonome en énergie.

La conception du bâti permettant d'accueillir le système d'acquisition, les capteurs et le système d'alimentation était également un enjeu important du projet (Figure 1). Nous avons donc choisi d'utiliser une boite de dérivation étanche, dans cette boite sont placés : la carte ARDUINO et ses extensions, le système d'amplification ainsi que la batterie, le régulateur de charge et toutes les connexions électriques. Cette boite est fixée à un mat en haut duquel sont disposés le capteur de rayonnement PAR (PAR/LE, SOLEMS, Orsay, France) à étalonner. Egalement lors de la phase d'étalonnage de ce dernier, un autre capteur, dit 'capteur étalon' (PQS1, Kipp&Zonen, Pays-Bas) est également fixé. Ces capteurs sont positionnés sur une plaque amovible permettant de régler leurs horizontalités à l'aide d'un niveau à bulle. Un panneau solaire est fixé sur le mât du côté opposé à la boite pour équilibrer les masses du dispositif. Ce mat s'insère dans un pied en forme de croix qui permet une bonne stabilité du dispositif, des ouvertures ont été faites pour fixer le dispositif au sol à l'aide de sardines.

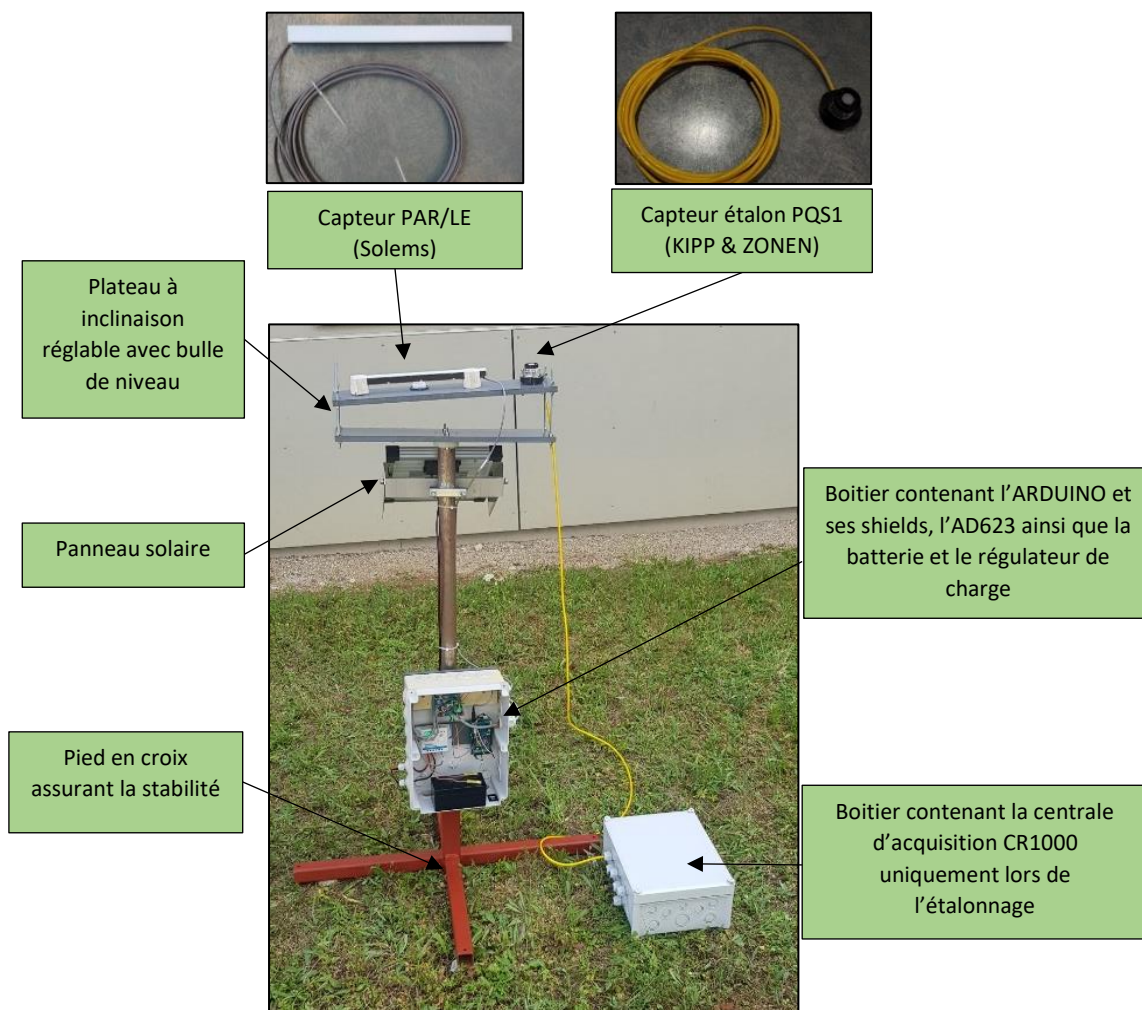


Figure 1. Présentation du PARADe

Capteurs de rayonnement

Le capteur utilisé est de la marque SOLEMS (capteur PAR/LE). De prix abordable, il est couramment utilisé en agronomie pour mesurer le rayonnement dans les couverts végétaux. Cependant, il est livré avec un pré-calibrage effectué par lot de capteurs, ce qui n'est pas suffisant pour obtenir précisément la valeur de la quantité de rayonnement PAR. Il faut pour cela réaliser un étalonnage. Pour cet étalonnage, nous aurons recours à un capteur « étalon » PQS1, livré avec un certificat d'étalonnage, de chez Kipp and Zonen. Cet étalonnage consiste à fournir l'équation linéaire et donc le coefficient multiplicateur reliant la tension de sortie (mV) du capteur au signal de rayonnement ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Cette équation est propre à chaque capteur et dans notre cas, l'équation fournie par le constructeur pour ce capteur étalon est :

$$V_e = 4,7 \cdot 10^{-3} \times \text{PAR} \quad (1)$$

Ces deux capteurs convertissent le signal initial (exprimé mV) en rayonnement PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) grâce à l'étalonnage ou à l'équation constructeur (1). Il est à noter que la tension de sortie (V_e) des capteurs est trop faible (de 0 à 100 mV) pour être directement lisible par la carte ARDUINO, aussi une chaîne d'amplification du signal a été mise en place.

Carte ARDUINO

Nous avons choisi de concevoir le système d'acquisition autour d'une carte ARDUINO (de type UNO, alimentée en 12 V par batterie) pour plusieurs raisons. Premièrement, cette carte a une faible consommation électrique (75 k0mA) ce qui permet d'envisager l'utilisation de batteries. Cette faible consommation est en partie liée à la faible puissance de la carte, puissance néanmoins suffisante pour une application d'acquisition de données avec un faible nombre de capteurs et pour un traitement léger des données. La carte ARDUINO est une solution simple d'utilisation, pas de système d'exploitation à installer ni besoin d'autres périphériques comme un écran, ou une souris qui seraient nécessaires pour des cartes plus puissantes comme les cartes Raspberry. La programmation est réalisable de manière relativement facile avec quelques bases de programmation et avec des échanges avec des utilisateurs de cartes ARDUINO. Ce type de carte permet d'acquérir un signal analogique, tel que celui d'une tension issue des capteurs PAR, pour le convertir en signal numérique. La carte permet donc de lire des valeurs analogiques de tension variant entre 0 et 2,56 V ou 0 et 3,3 V ou 0 et 5 V. Cette lecture est réalisée sur une résolution de 10 bits soit 1024 valeurs, allant de 0 à 1023. Pour plus de résolution nous avons choisi de lire les valeurs de tension entre 0 et 2,56 V. Plus la tension issue d'un capteur sera élevée et plus la valeur analogique lue sera grande. A la carte ARDUINO, ont été intégrés des composants supplémentaires : un module permettant de connecter une carte mémoire microSD qui permet de stocker les données issues du capteur PAR pour ensuite les récupérer sur un ordinateur. Le modèle choisi est un ARDUINO WIRELESS microSD SHIELD qui dispose d'un port pour carte microSD. Lors de l'enregistrement des données de rayonnement acquises quotidiennement, il est nécessaire d'y associer la date et l'heure. Pour cela une horloge externe a été également ajoutée permettant d'indiquer en continu l'heure à l'ARDUINO. Cette horloge est une horloge DS1307 de la marque Grove. La carte ARDUINO, l'horloge et microSD SHIELD constituent donc la centrale de mesures.

Chaîne d'amplification du signal

Il est néanmoins nécessaire d'amplifier la tension (Vs) du capteur à étalonner. En effet la tension de sortie du capteur est au maximum de 40 mv et la carte ARDUINO ne peut mesurer précisément de faibles tensions (au moins < 100 mv) d'après nos observations. Pour réaliser l'amplification de ces signaux et éviter des coûts supplémentaires, nous avons choisi de concevoir et réaliser une chaîne d'amplification (Figure 2).

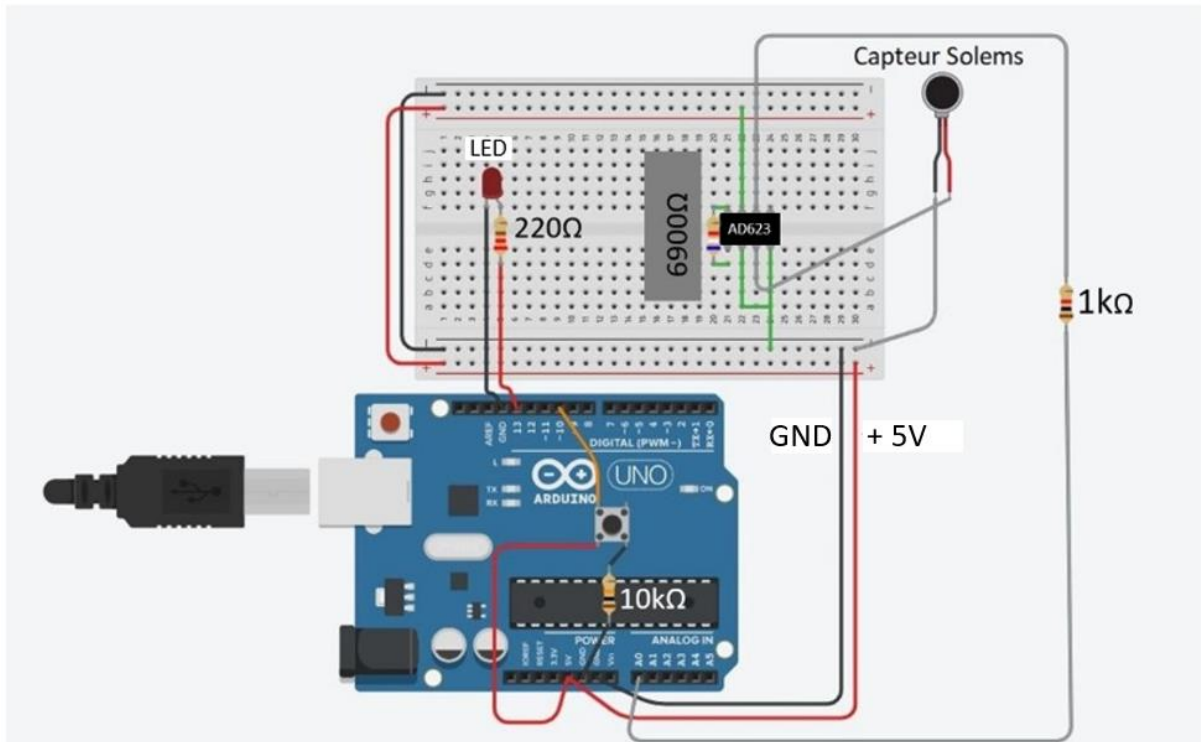


Figure 2. Schéma du circuit électrique du dispositif

L'amplificateur utilisé est le composant AD623 de la marque Analog Device qui peut être alimenté par une plage d'alimentation située entre 2,7 et 12 V. Il s'agit d'un amplificateur d'instrumentation ayant une rampe d'amplification linéaire en sortie (rail-to-rail) permettant une tension d'entrée comprise entre 0 et 150 mV et délivrant une tension de sortie linéaire à celle d'entrée et dont le gain, compris entre 1 et 1000, est sélectionnable à l'aide d'une résistance externe déduite de l'équation théorique suivante :

$$\text{Gain AD 623} = \frac{V_s'}{V_e'} = \left(\frac{100}{R_G} \right) + 1 \quad (2)$$

Avec R_G la résistance externe exprimée en $k\Omega$.

Pour obtenir la plage de tension (V_s) acceptable pour la carte ARDUINO, la détermination de la valeur de la résistance a été obtenue à travers plusieurs essais de différentes résistances, ceci a également permis de connaître précisément le gain réel du montage. Pour amplifier la tension (V_e) du capteur SOLEMS la résistance retenue est de 6 900 ohms. La courbe réponse de l'AD623 pour une résistance de 6 900 ohms est présentée en Figure 3. Nous observons une nette amplification et un offset positif au niveau du zéro qui permet de ne pas avoir de tension inférieure à 500 mv, afin d'avoir la meilleure précision de mesure possible.

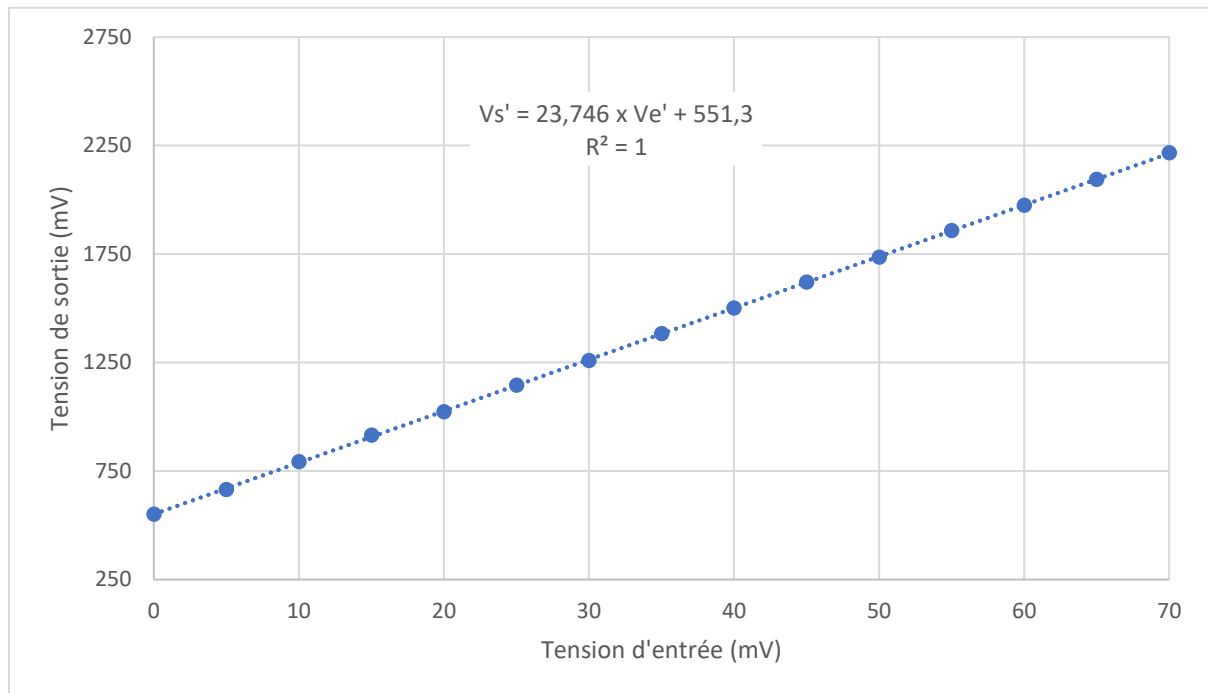


Figure 3. Evolution de la tension en sortie de l'AD623 (en mV) avec une résistance externe de 6900 ohms en fonction d'une tension l'entrée (en mV)

Programmation et procédure d'enregistrement

La Figure 4 présente le programme d'enregistrement des données en y détaillant les différentes étapes (annexe 1). La carte ARDUINO enregistre la tension issue de l'amplificateur toutes les cinq secondes dans sa mémoire interne et au bout de 60 valeurs (soit 5 minutes) elle calcule la moyenne des valeurs et l'inscrit dans la carte microSD. L'ARDUINO écrit également dans la carte microSD la valeur du rayonnement PAR obtenue par les valeurs de l'équation d'étalonnage du capteur. Nous avons choisi d'enregistrer la moyenne des 60 mesures toutes les 5 minutes pour diminuer les variabilités issues de l'ARDUINO et des conditions d'ensoleillement. En s'appuyant sur les travaux de Thiebeau et Herre (2007) qui permettent de déduire un intervalle acceptable de mesures pour calculer une moyenne horaire, un pas de temps de cinq minutes est une solution adéquate entre représentation significative du rayonnement, préservation de l'énergie électrique et capacité d'enregistrement.

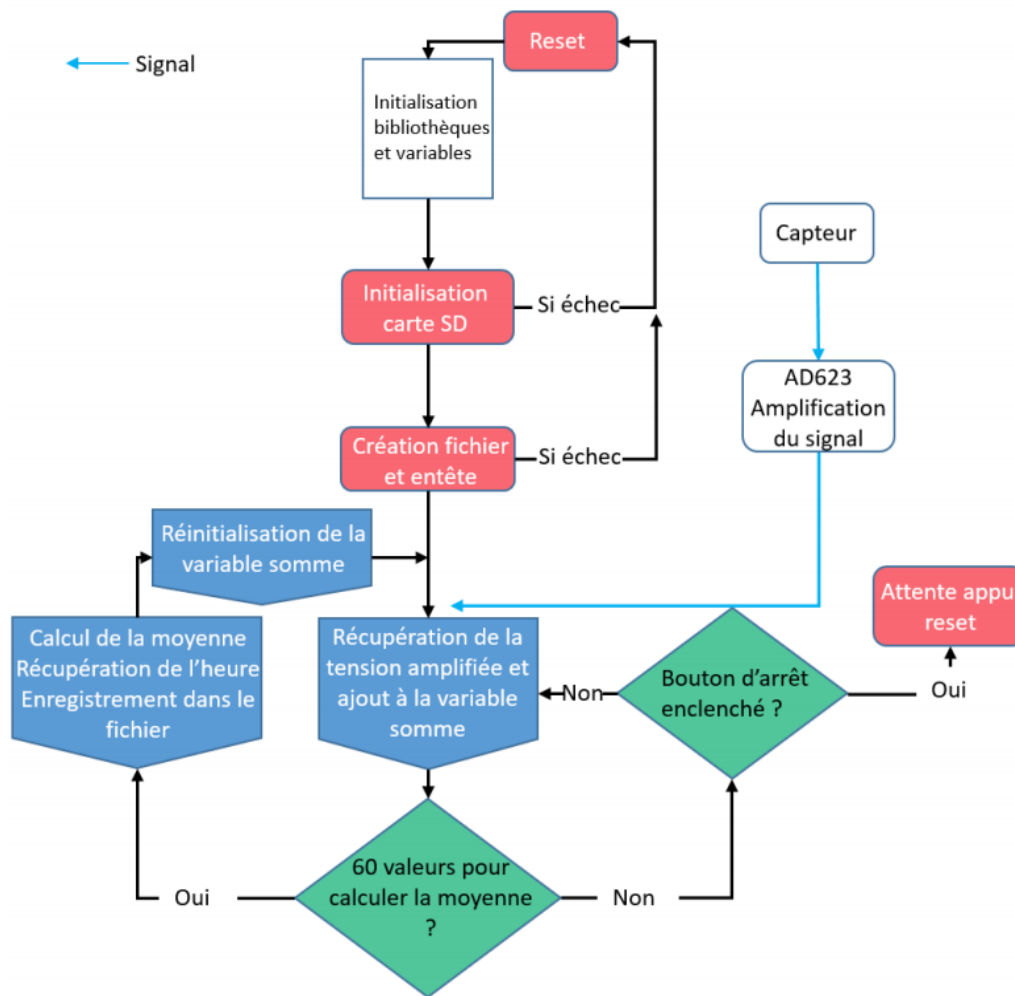


Figure 4. Logigramme des différentes étapes du programme d'enregistrement des données.

Méthode d'étalonnage

Pour obtenir cette courbe d'étalonnage, reliant la tension de sortie de la chaîne d'acquisition au signal de rayonnement, il faut positionner le capteur étalon à côté du capteur à étalonner (Figure 1). Ce capteur étalon (Kipp&Zonen) est relié à une centrale d'acquisition Campbell Scientific CR1000 pour enregistrer sa tension de sortie. Le fonctionnement de la centrale est le même que celui de l'ARDUINO : toutes les cinq secondes, des mesures sont acquises puis toutes les cinq minutes, la moyenne de ces mesures est écrite dans un fichier de données. La tension capteur étalon obtenue est transformée selon l'équation (1) pour obtenir la valeur de PAR associée. En traçant les valeurs de tensions (issues du capteur SOLEMS) lues sur l'ARDUINO en fonction des valeurs de rayonnement PAR (issues du capteur étalon), nous obtenons alors l'équation d'étalonnage du dispositif portable. Pour cet étalonnage ainsi que pour les autres vérifications que nous ferons par la suite, les données pour lesquelles les valeurs de PAR sont inférieures à $100 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ sont supprimées car elles ne représentent qu'une faible proportion du PAR journalier ; ce sont généralement ces valeurs qui ont une forte variabilité (Barnard, Findley, et Csavina 2014).

Méthode pour valider la répétabilité des mesures

Pour montrer une bonne répétabilité du dispositif, des prises de mesures à différentes heures de la journée, à différents endroits, à l'ombre et au soleil sur différents jours ont été réalisées. Ces prises de mesures ont consisté, comme pour l'étalonnage, à prendre des valeurs de tensions lues sur la carte ARDUINO et des valeurs de PAR

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2021 (107)

via la centrale d'acquisition CR1000. Les points ainsi obtenus seront placés sur la courbe d'étalonnage. Le but est de montrer que la réponse de notre dispositif est fidèle quel que soit les conditions d'éclairement ou de déterminer une éventuelle dérive dans le temps.

Méthode pour vérifier l'exactitude des mesures

Pour vérifier l'exactitude des mesures acquises par ce dispositif portable un profil d'erreur relative a été réalisé. Ce profil est un graphique représentant l'erreur relative en fonction du PAR réel. La formule de l'erreur relative est donnée ci-dessous :

$$Erreur\ relative = \frac{(PAR\ calculé - PAR\ réel)}{PAR\ réel} * 100 \quad (3)$$

Avec deux valeurs différentes de PAR : la quantité de PAR réel qui est déterminée grâce au capteur étalon branché sur la centrale d'acquisition CR1000 et celle du PAR calculé obtenue par l'équation d'étalonnage du dispositif portable.

Ce graphique permet d'identifier les limites d'utilisation d'un tel dispositif sans pour autant déterminer les principales sources d'incertitudes. Nous pouvons également observer l'évolution de la fiabilité et de l'exactitude du dispositif sur l'étendue des valeurs de PAR.

Résultats et Discussion

Etalonnage

L'étalonnage du dispositif a été réalisé en suivant la méthode indiquée précédemment et la figure 5 présente la courbe d'étalonnage (points de couleur bleue) du dispositif portable. Des centaines de mesures ont été obtenues en réalisant une acquisition continue en juillet 2020, du 13/07/2020 à 16h05 au 14/07/2020 à 20h30. Comme on peut le voir le coefficient de corrélation est très proche de 1 ce qui témoigne d'une corrélation très forte entre la tension du capteur étalonné et le rayonnement PAR. Afin de valider cette droite d'étalonnage des points de mesures supplémentaires pris dans différentes conditions d'ensoleillement (ombrage, lever et coucher du soleil) ont été ajoutés pour montrer la fidélité du dispositif (points de couleur non bleue). La légende indique à quels moments et dans quelles conditions ont été réalisés les points supplémentaires. L'ensemble de ces points se placent sur la droite d'étalonnage ce qui signifie que l'équation est constante dans le temps et ce malgré des déplacements et redémarrages du dispositif. La méthode de mesure du dispositif est donc fidèle.

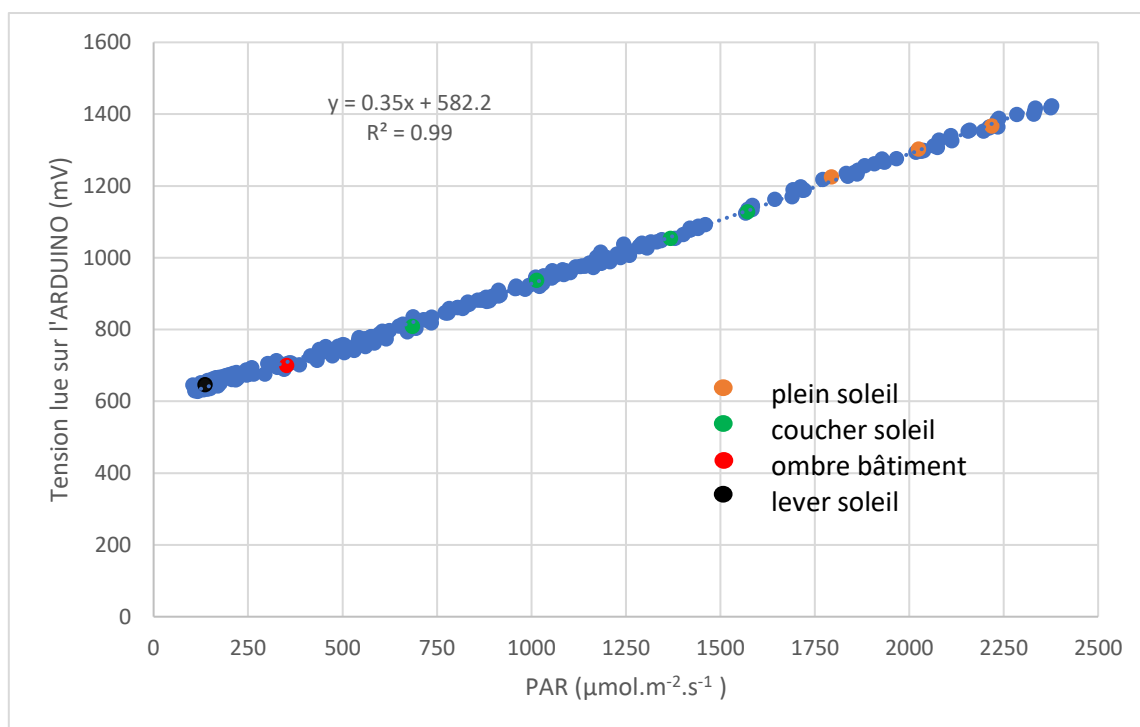


Figure 5. Graphique de l'étalonnage du dispositif avec points de validation

Validation du dispositif

Suite à cet étalonnage, nous avons réalisé une acquisition de données avec la chaîne d'acquisition certifiée et le capteur étalon, conjointement avec le dispositif ARDUINO étalonné. L'objectif de cette acquisition est de réaliser le profil de l'erreur relative en comparant le PAR calculé avec les deux systèmes. Le graphique de la figure 6 représente ce profil d'erreur relative du dispositif ARDUINO.

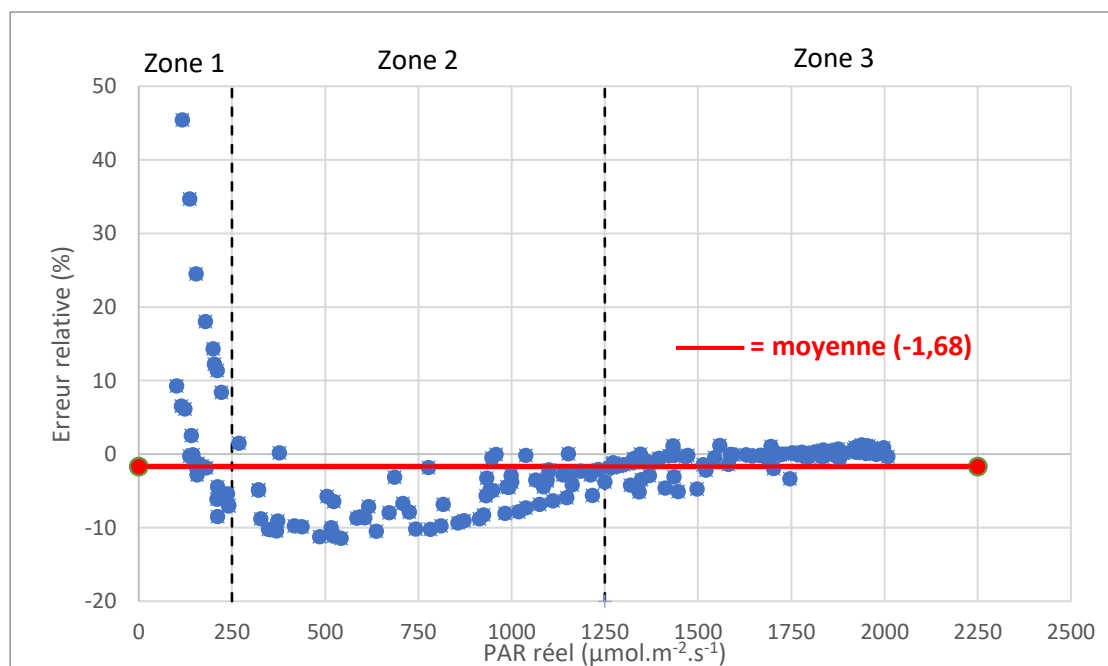


Figure 6. Profil de l'erreur relative du dispositif PARADe en fonction des valeurs du PAR réel

En moyenne, le dispositif portatif avec la carte ARDUINO présente une erreur relative de -1,68 % ce qui est satisfaisant pour pouvoir utiliser ce dispositif tout en ayant accès à des valeurs de PAR justes et représentatives. Nous constatons que selon les valeurs du PAR, l'erreur varie. Tout d'abord ce profil peut être analysé selon trois zones. La Zone 1 est représentée par un rayonnement PAR inférieur à 250 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Pour cette zone, une surestimation importante des valeurs est observée. Cependant ces faibles valeurs PAR n'ont pas d'impact sur la croissance des plantes. La Zone 2 correspond à une faible sous-estimation des valeurs de PAR comprises entre 250 et 1250 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Enfin, pour Zone 3, lorsque le PAR est supérieur à 1250 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, le dispositif estime correctement la valeur du rayonnement PAR. Globalement, on peut conclure que le dispositif PARADe estime correctement le PAR, l'erreur importante sur les faibles valeurs de PAR n'a au final que peu d'impact sur la gamme entière (-1,68% par rapport à l'étalon). En effet, il faut avoir en tête que la valeur de PAR maximale en juillet et de l'ordre de 2600 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ alors que la valeur maximale en février est seulement de l'ordre de 1200 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Le tableau suivant présente les moyennes et écart-types d'erreur en fonction des différentes parties du profil cité précédemment :

Tableau 2. Présentation de la moyenne et de l'écart-type du profil d'erreur en fonction de différentes gammes de PAR

Gamme de PAR (en $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Zone 1 [0 – 250]	Zone 2 [250 – 1250]	Zone 3 [1250 et 2500]	Total [0 – 2500]
Moyenne (en %)	5,56	-5,94	-0,55	-1,68
Ecart-type	13,26	3,35	1,51	6,85

Nous pouvons apporter plusieurs explications quant à la forme de ce profil. Premièrement, d'après les tests réalisés en laboratoire nous constatons que la variabilité du dispositif portatif d'acquisition avec la carte ARDUINO est plus importante pour de très faibles valeurs de tension. Ceci peut expliquer une plus grande variabilité pour des faibles valeurs de rayonnement PAR. Deuxièmement, la forme de ce profil d'erreur est également justifiée par le fait que l'étalonnage du dispositif ne semble pas linéaire pour de faibles valeurs PAR. En effet une pente plus faible est perceptible sur la courbe d'étalonnage pour les faibles valeurs de PAR. Pour démontrer graphiquement la présence de cette deuxième pente au début du graphique d'étalonnage, voici un agrandissement du graphique d'étalonnage sur la zone (Figure 7) :

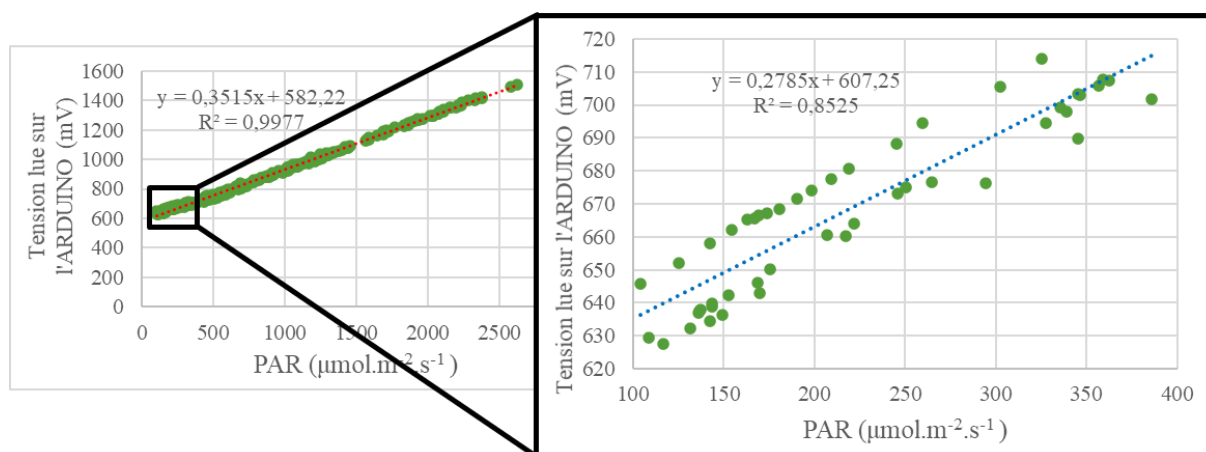


Figure 7. Agrandissement de la zone de faibles valeurs de PAR de la figure 5

Sur le graphique de gauche de la figure 7 la droite en pointillé rouge est la droite d'étalonnage (Figure 5), son équation est rappelée juste à côté. Sur le graphique de droite, la droite en pointillé bleu représente la droite d'étalonnage du dispositif sur des valeurs de PAR entre 100 à 400 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, son équation est : $y = 0,2785x + 607,25$. En comparant les deux équations de droite on voit rapidement que pour la droite bleue la pente est plus faible et l'offset plus élevé. Ceci confirme donc que les points obtenus pour réaliser l'étalonnage du dispositif forment un léger plat sur des valeurs de PAR comprises entre 100 et 400 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Même si les conséquences sont faibles, cette réponse aux faibles valeurs de PAR a de quoi surprendre. A partir de la relecture de la norme Norme ISO 9847 sur l'étalonnage de tels capteurs en extérieur, il ressort qu'en pratique les mesures de

rayonnement pour lesquelles l'angle d'élévation du soleil est inférieur à 20° (au lever du soleil et du coucher du soleil) sont écartés car la réponse au rayonnement de ce type de capteurs rectilignes est de mauvaise qualité (Norme ISO 9847 :1992). Ayant conservé ces valeurs, elles sont donc responsables de ces erreurs observées pour les faibles valeurs de rayonnement. En figure 6, les fortes erreurs observées aux faibles valeurs de PAR, sont finalement inhérentes à la forme du capteur et ne mettent pas en défaut la chaîne d'acquisition. La courbe d'étalonnage peut donc être conservée.

Au final, le dispositif sera utilisé en additionnant l'ensemble des données d'une journée pour ainsi obtenir la valeur de PAR journalier. Nous avons donc fait un essai sur une journée complète, de 0h00 à 23h55, et avons additionné les valeurs de PAR obtenues aussi bien avec le dispositif ARDUINO qu'avec la chaîne de mesure certifiée. Le but était de savoir si le dispositif construit était capable de donner une valeur correcte du PAR journalier. Nous avons trouvé que le dispositif ARDUINO surestimait le PAR journalier de 1,24 %. Finalement l'observation de cette surestimation importante lorsque les valeurs de PAR sont inférieures à 250 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ n'a pas d'influence significative sur la valeur du PAR journalier.

Comparaison à un produit existant : le PARduino

Pour comparer le dispositif portable PARADe à un outil existant, nous nous appuyons sur un article présentant le PARduino. Cet article présente un dispositif permettant d'enregistrer des valeurs de rayonnement PAR sur une carte ARDUINO (Barnard, Findley, et Csavina 2014). Le tableau suivant (Tableau 3) présente des données permettant de comparer l'exactitude du dispositif PARADe au PARduino.

Tableau 3 : Données de comparaison entre le PARduino et PARADe

	PARduino	PARADe
Erreur moyenne par rapport à une chaîne de mesure certifiée (en $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	-22,00 ($\pm$: 23,44)	-19,11 ($\pm$: 30,23)
Erreur relative moyenne (en %)	-3,49 ($\pm$: 3,88)	1,68 ($\pm$: 6,85)

Ces données présentent des résultats moyens légèrement meilleurs pour notre dispositif. En revanche les écarts-types sont supérieurs par rapport au PARduino du fait de la forte incertitude sur les faibles valeurs de rayonnement PAR. Enfin le PARADe semble plus intéressant pour des valeurs fortes de PAR puisque pour une gamme de mesure supérieure à 800 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ notre dispositif ne présente aucune valeur d'erreur relative supérieure à 10 % contrairement au PARduino qui présente 5 % de ces valeurs. A noter que le dispositif portable PARADe sera beaucoup moins cher que le dispositif PARduino.

Conclusion

L'objectif de ce travail était de combiner un capteur de rayonnement PAR et une carte d'acquisition ARDUINO afin de concevoir et d'évaluer un dispositif portable capable de mesurer le rayonnement photosynthétiquement actif. Ce dispositif devait satisfaire plusieurs critères : il devait être léger et peu encombrant, il devait également être résistant à l'eau et à la poussière tout en étant autonome en énergie.

Le dispositif PARADe a montré qu'il pouvait mesurer, à l'aide d'un capteur qui a été étalonné, la quantité de rayonnement photosynthétiquement actif de manière exacte avec une erreur relative moyenne relative faible. On peut noter un manque de justesse dans les valeurs de PAR faible ($< 250 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), essentiellement dû à la forme du capteur, mais qui n'ont pas d'incidences importantes sur les valeurs journalières qui sont le plus généralement utilisées en recherche agronomique. Une amélioration envisagée serait d'équiper le dispositif PARADe d'un capteur plus adapté à la mesure du PAR incident tel que le modèle PAR/CBE 80 de la société SOLEMS. Comparé à d'autres dispositifs portatifs disponibles, il paraît aussi efficace voir supérieur pour des rayonnements PAR importants. Ces résultats rendent opérationnel son utilisation. Ainsi, le dispositif PARADe

permet donc d'accéder à des mesures de PAR utilisables, en effet la précision de la mesure de PAR est bonne par rapport à d'autres systèmes similaires. Ces mesures de PAR pourront ensuite être utilisées comme paramètres d'entrée des modèles écophysologiques.

Ce dispositif pourra par la suite être amélioré en intégrant une connexion sans fil à l'aide de modules ARDUINO afin de récupérer les données sans avoir à ouvrir la boîte étanche. Cette connexion sans fil pourrait permettre de récupérer les données plus simplement ainsi que de vérifier en temps réel le bon fonctionnement du système.

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

Barnard HR, Findley MC et Csavina J (2014) PARduino : A Simple and Inexpensive Device for Logging Photosynthetically Active Radiation. *Tree Physiology* 34 : 640-645. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu044>

Brisson N, Gary C, Justes E, Roche R, Mary B, Ripoche D, Zimmer D, Sierra J, Bertuzzi P, Burger P, Bussière F, Cabidoche YM, Cellier P, Debaeke P, Gaudillère JP, Maraux F, Seguin B, Sinoquet H (2003) An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* 18 : 309-332.

Chartier P, Bonchretien JM, Allirand and G. Gosse (1989) Utilisation des cellules au silicium amorphe pour la mesure du rayonnement photosynthétiquement actif (400-700 nm). *Agronomie* 9 : 281-284.

Keating BA, Carberry PS, Hammer GL, Probert ME, Robertson MJ, Holzworth D, Huth NI, Hargreaves JNG, Meinke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes JP, Silburn M, Wang E, Brown S, Bristow KL, Asseng S, Chapman S, McCown RL, Freebairn DM, Smith CJ (2003) An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18 : 267-288.

ISO 9847 : 1992, Solar energy. Calibration of Field pyranometers by comparison to A reference pyranometer.

Jeuffroy MH et Recous S. (1999) Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *European Journal of Agronomy* 10 : 129-144.

Labouret A (2008) D tecteurs quantiques de PAR et de rayonnement solaire validité, conditions d'emploi,  talonnage. *Le Cahier des Techniques de l'INRA sp cial « rayonnement »*, 85-91

Pashiardis S, Kalogirou Sa, Pelengaris A (2017) Characteristics of Photosynthetic Active Radiation (PAR) Through Statistical Analysis at Larnaca, Cyprus. *SM Journal of Biometrics & Biostatistics* 2 : 1-16.

Sager JC, et Craig Mc Farlane J (1997) *Growth Chamber Handbook. Radiation*. North Central Regional Research Publication no 340, Iowa Agriculture and Home Economics Experiment Station Special Report No. 99, 30.

Sellers P, Dickinson R, Randall DA Betts A, Hall F, Berry J, Collatz G, et al. (1997) Modeling the Exchanges of Energy, Water, and Carbon Between Continents and the Atmosphere. *Science* 275 : 502-511.

SOLEMS S.A. (2011) « PAR_LE mode d'emploi ». https://www.solems.com/wp-content/uploads/PAR_LE_mode_d_emploi_fr.pdf.

Street R (2000) *Technology and Applications of Amorphous Silicon*. Series Volume 37 /Copyright 2000 Springer-Verlag Berlin Heidelberg Number of Pages XII, 417

Thiebeau P, Herre C (2007) Détermination du pas de temps de mesure du rayonnement global, sans effet sur la mesure journalière vis-à-vis du rayonnement global de référence. Les Cahier des Techniques de l'INRA numéro 59 : 31-36.

Tomson, Teolan, et Gunnar Tamm (2006) Short-Term Variability of Solar Radiation. Solar Energy 80 : 600-606.

Varlet-Grancher C, Bonhomme R, Chartier M, Artis P (1982) Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. Acta Oecologica Oecologia Plantarum 3 : 3-26.