

Conception d'un dispositif automatisé de chambres de mesures d'échanges gazeux du sol à fermeture horizontale

Maxime Duthoit^{1,2}, Olivier Roupsard^{1,2,3,4}, Nathan Créquy^{1,2}, Joana Sauze⁵, Karel Van den Meersche^{1,2}



Maxime DUTHOIT - Technicien supérieur spécialisé en Mesures Physiques au CIRAD pour des applications en micro-météorologie, écophysiologie et télédétection dans le cadre de l'étude des cycles du carbone, de l'eau et des nutriments au sein de l'UMR Eco&Sols à Montpellier.

Mon travail consiste principalement à intervenir sur les dispositifs expérimentaux Montpelliérains et sur les sites instrumentés à l'étranger pour optimiser l'acquisition des données, compléter les dispositifs de mesure ainsi que concevoir et valider des systèmes de mesures automatiques.

Résumé. Les mesures d'échanges des principaux gaz à effet de serre (CO_2 , N_2O et CH_4) entre le sol et l'atmosphère sont des données importantes dans l'étude du fonctionnement des agrosystèmes. Ces données peuvent être mesurées à haute résolution temporelle grâce à des chambres de mesure automatiques qui constituent actuellement la technique de référence. Les systèmes automatisés commerciaux sont coûteux, ce qui limite le nombre de points de mesure sur un même site, et donc, la capacité des équipes de recherche à mieux intégrer et comprendre la variabilité spatiale de l'activité métabolique du sol et plus généralement les cycles biogéochimiques qui lui sont associés. Dans cette étude, nous proposons les plans pour réaliser soi-même un système multiplexé original de chambres de mesure automatisées. Nous avons opté ici pour une fermeture horizontale, afin de minimiser les effets liés à la surpression lors de la fermeture et/ou passer sous des branches basses. Des résultats de tests de fuite et de fonctionnement en plein champ pendant plusieurs mois sont présentés. Une attention particulière a été apportée au coût du matériel, à la consommation énergétique ainsi qu'à la simplicité de mise en œuvre. Les informations techniques relatives à la conception, à la fabrication, à l'utilisation de ces chambres et à l'analyse des données de sortie sont détaillées dans cet article, avec les plans, les programmes de pilotage et les codes pour l'analyse de données.

¹ CIRAD, UMR Eco&Sols, 34060 Montpellier, France

² Eco&Sols, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, IRD, Institut Agro, Montpellier, France

³ CIRAD, UMR Eco&Sols, BP1386, CP18524, Dakar, Sénégal

⁴ LMI IESOL, Centre IRD-ISRA de Bel Air, BP1386, CP18524, Dakar, Sénégal CIRAD, UMR Eco&Sols, BP1386, CP18524, Dakar, Sénégal

⁵ CNRS, Ecotron UPS 3248, 34980 Montferriez-sur-lez, France

Mots-clés : chambre de mesure, automatisation, multiplexage, échanges gazeux, gaz à effet de serre, respiration du sol.

Abstract. Greenhouse gas (CO₂, N₂O and CH₄) exchange measurements between soil and atmosphere are important data when studying agrosystem functioning. These data can be measured on high temporal resolution with automatic chambers. However, automated chamber systems are expensive which limits the number of measuring points on a same site. Besides, researchers are restrained to integrate and understand the spatial variability of the soil metabolic activity and more generally biogeochemistry cycles that are associated to. For this study, we propose a construction plan for a self-made multiplexed system of automated chambers. We chose a system with an horizontal closure to minimise effects due to overpressure during closing events, and to allow the system to be installed under low branches. Here we present some results of leakage tests and at field functioning during several months. A particular attention has been brought to the material cost, to the electric consumption as well as the implementation simplicity. Technical information about the conception, construction and the use of these chambers and output data analyses are detailed in this paper with the drawings, pilot programming and codes for the data analysis.

Keywords: measuring chamber, automation, multiplexing, gas exchange, greenhouse gases, soil respiration

Introduction

La mesure des bilans de gaz à effet de serre (GES) à différentes échelles (du local au global) tend à se généraliser en réponse aux conventions sur le climat et aux objectifs d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques. Ces mesures sont rendues d'autant plus pertinentes pour le compartiment sol depuis l'accord de Paris engageant les Parties sur la limitation du réchauffement global à +2°C, voire +1.5°C (IPCC, 2018), et proposant le mécanisme du 4 pour mille (<https://www.4p1000.org/fr>) dont l'initiative est de compenser tout ou en partie les émissions de GES par l'augmentation du stock de carbone dans les sols, au rythme de 4 pour mille par an dans les horizons 0-30 cm. La mesure des variations temporelles du stock de carbone du sol offre peu de précision en raison de la variabilité spatiale naturelle de ce stock et de la difficulté à déterminer la masse volumique des sols. En outre, il faut souvent compter une à plusieurs décennies pour détecter des variations significatives. En revanche, la mesure des flux de GES entre le sol et l'atmosphère offre une alternative permettant d'accéder directement aux échanges qui ont lieu ainsi qu'à leurs fluctuations (journalières, saisonnières ou annuelles) à haute résolution temporelle (semi-horaire, ou horaire), ce qui fournit beaucoup d'informations sur les mécanismes mis en jeu en plus des bilans *stricto sensu*.

Les échanges de GES, entre le sol et l'atmosphère, peuvent être mesurés : i) manuellement à l'aide de chambres portables dites « statiques » avec un intérêt d'obtenir une large représentativité spatiale, ou ii) de manière automatisée grâce à des chambres dynamiques à haute résolution temporelle et ne nécessitant pas d'assistance humaine. Ces dernières peuvent être multiplexées pour obtenir un nombre plus important de répétitions spatiales et constituent finalement la technique de référence venant en appui aux mesures de bilan de GES des écosystèmes par covariance des turbulences (eddy-covariance en anglais ; technologie mise en œuvre dans les tours à flux). Les systèmes automatisés commerciaux présentent quelques inconvénients. Tout d'abord ils sont coûteux, ce qui restreint trop souvent la capacité d'échantillonnage et donc le nombre de répétitions mises en place *in situ* pour tenir compte de la variabilité spatiale pour la mesure des échanges de GES. Les chambres des systèmes commerciaux ferment généralement à l'aide d'un clapet ou d'un piston, ce qui présente un double inconvénient : le premier étant de modifier légèrement la pression de l'air au-dessus et dans la colonne de sol (même lorsque ces chambres sont munies d'une soupape), le second étant qu'ils peuvent aisément être gênés dans leur course, par exemple, en cas de présence de branches basses. Enfin, les modèles commercialisés ont des dimensions fixes et sont souvent de petites tailles (exemple : une chambre de mesure « long terme » proposée par Li-Cor Inc., Lincoln,

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (102)

NE (réf 8100-104) offre un diamètre de 20 cm de diamètre pour la mesure des échanges de GES). De fait, elles ne peuvent souvent pas être ajustées à la maille élémentaire spécifique de chaque culture.

Nous proposons un modèle original de chambre dynamique automatisée pour la mesure de gaz en circuit fermé dont les dimensions (longueur, largeur, hauteur) pourront être adaptées à chacun des cas d'étude. Le modèle de chambre à fermeture horizontale, ici présenté, a déjà été testé et utilisé dans deux études de cas. La première a eu lieu de 2016 à 2020 au Costa Rica, en zone tropicale humide, sous caféiers (branches basses, climat humide et corrosif) pour mesurer les flux de N_2O du sol. Dans cet article, nous présenterons la deuxième étude de cas qui s'est déroulée en zone sahélienne. Le dispositif a donc été adapté pour spécifiquement répondre aux besoins liés à la mesure de respiration du sol, sous climat sahélien aride. Ce système automatisé a été conçu pour cinq chambres de mesure, de dimensions 70 cm x 50 cm. Il offre un coût réduit (moins de 15 k€), une faible consommation énergétique, et est autonome du fait de l'utilisation de panneaux solaires.

Principe de fonctionnement et calcul théorique du flux

Le système de chambre dynamique connectée à un analyseur (Figure 1.a) est largement utilisé dans les études d'échanges de CO_2 , N_2O et CH_4 entre le sol et l'atmosphère. Cette méthode, dite de mesure des échanges gazeux en système fermé (Field et al., 1989), est basée sur la mesure de l'accroissement de la concentration du gaz étudié après fermeture de l'enceinte sur l'objet d'étude. Si la méthode est bien connue, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de système de chambre dynamique normalisée (Pumpanen et al., 2004). Les variations de concentration dans la chambre sont, *in fine*, mesurées en utilisant un analyseur de gaz infrarouge (InfraRed Gas Analyser (IRGA)) ou photoacoustique ou par spectroscopie laser (Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLAS) ; Cavity-Ring Down Spectroscopy (CRDS)).

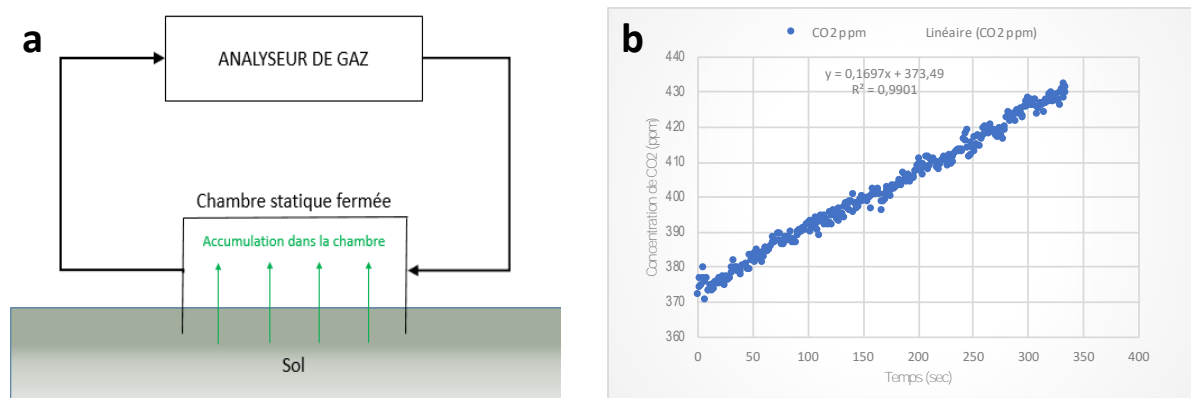


Figure 1. a) Schéma illustrant une chambre dynamique fermée reposant sur le sol. Le gaz émis par le sol s'accumule dans la chambre, l'évolution de la concentration dans cette même chambre est mesurée par un analyseur de gaz suivant le principe de mesure en circuit fermé ; b) Exemple d'accroissement quasi-linéaire de la concentration de CO_2 (en ppm) dans la chambre mesurée par l'analyseur à une fréquence de mesure de 1 Hz. A 0 s la valeur de la concentration correspond à l'air ambiant (370ppm). La chambre reste fermée pendant 340 sec .

Le flux de gaz entre le sol et la chambre est proportionnel à la différence en concentration (loi de Fick ; Fick, 1855). En parallèle, il y a des pertes de gaz de la chambre vers l'environnement qui à leur tour dépendent d'une différence en concentration entre la chambre et l'environnement. Par conséquent, l'accumulation des gaz dans la chambre fermée suit une courbe exponentielle (Moffat et Brümmer, 2017). Dans une première phase suffisamment courte, l'accumulation de la concentration d'un gaz dans la chambre après fermeture est presque linéaire (Figure 1.b) et le flux d'un gaz peut être calculé à partir de la pente d'accumulation ($\Delta G / \Delta t$) en $ppm \cdot sec^{-1}$ (équivalent à des $\mu mol_{gaz} \cdot mol_{air}^{-1} \cdot sec^{-1}$) en utilisant la formule de l'équation (Eq.1) :

$$F_{\text{gaz}} = \rho \cdot (V/A) \cdot (\Delta G/\Delta t) \quad \text{Eq.1}$$

où :

F_{gaz} = flux de gaz ($\text{mol}_{\text{gaz}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

ρ = densité molaire de l'air ($\text{mol}_{\text{air}} \cdot \text{m}_{\text{air}}^{-3}$)

V = volume d'air total de la chambre, des tuyaux, de l'analyseur et de la pompe (m^3)

A = surface au sol de la chambre (m^2)

ΔG = variation de la concentration du gaz à l'intérieur de la chambre au cours d'un cycle de mesure ($\text{mol}_{\text{gaz}} \cdot \text{mol}_{\text{air}}^{-1}$)

Δt = temps de mesure d'un cycle (s)

L'expression de la densité molaire de l'air suit l'équation (Eq.2) depuis la relation des gaz parfaits :

$$\rho = P/(R \cdot T_K) \quad \text{Eq. 2}$$

où :

ρ = densité molaire de l'air ($\text{mol}_{\text{air}} \cdot \text{m}_{\text{air}}^{-3}$),

P = pression de l'air ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)

R = constante des gaz parfaits ($8.314 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{mol}_{\text{air}}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T_K = température Kelvin (K)

Le flux ainsi calculé s'exprime en quantité de matière par unité de surface et par unité de temps. Dans le cas de la mesure de la respiration du sol, par exemple, l'unité de travail sera le $\mu\text{mol}_{\text{CO}_2} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{sol}} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le temps de fermeture de la chambre, pour mesurer l'accumulation d'un gaz, doit être adapté empiriquement, aux taux d'émission observés pour chaque gaz. Typiquement, en mesure à 1 Hz, lorsque les taux d'émission sont faibles, et donc l'évolution de la concentration est lente, le temps de fermeture de la chambre sera plus long que lorsque les taux d'émission sont forts, et l'évolution de la concentration est rapide. Ces temps peuvent aller d'une durée de quelques minutes (par exemple pour la mesure du flux de CO_2) à plusieurs dizaines de minutes (par exemple pour la mesure du flux de N_2O ; Courtois et al., 2019).

Au début de chaque cycle de mesure, le système est purgé pour éviter les contaminations liées à la mesure précédente ainsi que pour supprimer les volumes morts (*i.e.* l'air ambiant compris dans les tuyaux). Cette étape est indispensable pour optimiser la qualité des mesures.

Le niveau de précision de la mesure de flux est relié à la qualité métrologique de l'analyseur mais également à la conception de la chambre (étanchéité, volume adapté, homogénéité de l'air dans la chambre et variation de pression minimale pour ne pas perturber les échanges avec le sol) et aux réglages de mesures (période des intervalles de purge et de mesure, fréquence de mesure de l'analyseur).

Étude de cas

Descriptif du site d'étude

Le site d'expérimentation collaboratif « Faidherbia-Flux » (<http://agraf.msem.univ-montp2.fr/Senegal.html>) est situé à 135 km à l'Est de Dakar, dans la région de Fatick, au cœur du bassin arachidier du Sénégal, en Afrique de l'Ouest. Ce site a pour objectif d'étudier les cycles biogéochimiques (carbone, azote, eau) dans un système agrosylvopastoral associant une rotation mil/arachide à un arbre légumineuse (*Faidherbia albida*), en comparant

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (102)

différents itinéraires techniques. L'objectif est de faire émerger des pratiques agronomiques durables à bas niveau d'intrants et de comprendre les processus écologiques et physiologiques en jeu. Plusieurs expériences sont en cours sur le site, ce qui permet d'avoir une approche globale du système agroforestier, en particulier des cycles du carbone et de l'eau, dans le contexte actuel de changement climatique.

Roupsard et al. (2020) ont, par exemple, montré que le rendement du mil était trois fois plus élevé sous *Faidherbia albida* et qu'il existe une influence des arbres sur les cultures. Dans ce contexte, les flux de CO₂ sont évalués pour caractériser l'effet des arbres sur le stockage du carbone dans le sol.

Ce site dispose de trois zones d'étude, chacune équipée avec une tour à flux, permettant de mesurer les flux de gaz et d'énergie à l'échelle de l'écosystème (tour de 30 m de haut) et à l'échelle des cultures (deux tours de 2 m et 4,5 m de hauteur dans deux parcelles différentes) par la méthode de fluctuations turbulentes (eddy covariance). Le déploiement des chambres de respiration du sol sans végétation, avec un fonctionnement entièrement automatisé, permettra d'évaluer la part du compartiment sol dans les échanges gazeux mis en jeu et de comparer des flux de gaz (CO₂, vapeur d'eau) à l'interface sol-atmosphère en fonction de la distance à l'arbre.

Conception de la chambre de mesure

Nous nous sommes inspirés des recommandations depuis les revues existantes (Hutchinson and Livingston, 2002; Livingston and Hutchinson, 1995) pour le choix de la géométrie de la chambre, des matériaux de fabrication et sur l'utilisation de ventilation. Il n'existe pas de standardisation, ces systèmes de mesure dans leur ensemble doivent être adaptés aux caractéristiques du site, aux conditions d'échantillonnage et aux objectifs de mesure, en accordant une attention particulière à la minimisation du risque d'erreur de mesure de la chambre. Pour ces raisons, nous décrivons les détails d'une conception de la chambre et nous laissons le choix aux utilisateurs d'adapter celle-ci selon le cas d'étude.

Brièvement, le principe de ce modèle de chambre de mesure repose sur le fait que le capot coulisse horizontalement sur un rail d'angle de 5° par rapport à l'horizontal (compatible avec des obstacles bas) et comprime progressivement le joint étanche à l'air de la chambre en fin de course (Figure 2a vers Figure 2b), minimisant ainsi les écarts de pression qui peuvent être sources de perturbations pour la mesure (Longdoz et al., 2000). Le mécanisme d'ouverture et de fermeture du couvercle de la chambre le long du rail est actionné par un moteur linéaire de lève-vitre électrique standard de voiture (ici modèle Hyundai Elantra 1993 porte arrière droite), qui présente les avantages d'être facilement disponible en pièce détachée de seconde main et à un coût modéré.

Nous n'utilisons pas de ventilateur pour brasser l'air car la turbulence induite par le ventilateur peut influencer la mesure du flux (Norman et al., 1992). En revanche, nous laissons au système un temps plus important, une fois la chambre fermée, avec un espacement suffisant entre les tubes d'entrées et de sorties d'air de la chambre afin d'assurer l'équilibre de l'air.

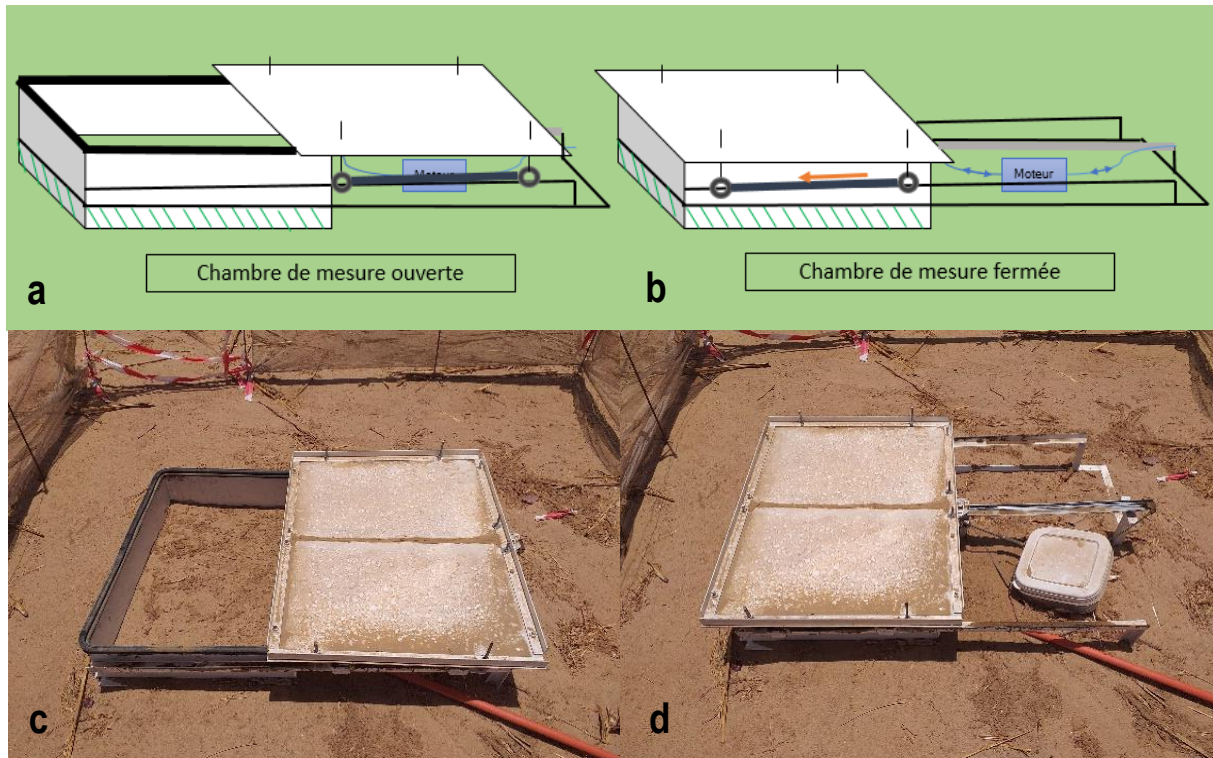


Figure 2. Schéma de principe illustrant a) la chambre de mesure ouverte ; b) la chambre de mesure fermée. Photo *in situ* de c) la chambre de mesure ouverte ; d) la chambre de mesure fermée (fermeture horizontale de la chambre)

Pour éviter tous effets d'interactions et de diffusion des gaz, ainsi que pour limiter au maximum le vieillissement du matériel (corrosion, moisissure) les matériaux privilégiés pour la construction de la chambre (parois, joints d'étanchéité et tubes) sont inertes et résistants aux conditions extérieures (acier, aluminium, téflon). Pour les matériaux plastiques type PVC, PE, PP, que nous avons utilisés notamment pour le couvercle et les joints, nous avons systématiquement vérifié au préalable leur caractère inerte pour le gaz d'intérêt.

Plus en détails, chaque chambre présente une base robuste en acier galvanisé (Figure 2c), soudée d'un seul tenant, qui sera enterrée sur environ 10 cm de profondeur dans le sol. Le couvercle est quant à lui fait de polyéthylène blanc opaque. Il a été vissé sur le contour de cornière en acier. Enfin, afin d'éviter les fortes augmentations de température dans la chambre pendant les périodes de mesures, l'intégralité des parois externes de la chambre a été peinte en blanc (Figure 2d).

Pour assurer une excellente étanchéité à l'air lors de la fermeture du couvercle, les joints profilés (de type joint d'étanchéité de porte de voiture) ont été enfoncés à la main sur l'ensemble du contour de la base robuste en acier. Ce joint est composé d'un insert en métal flexible en forme de U, recouvert d'un revêtement en PVC noir, qui permet un bon maintien en place par un effet de serrage sur la paroi.

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (102)

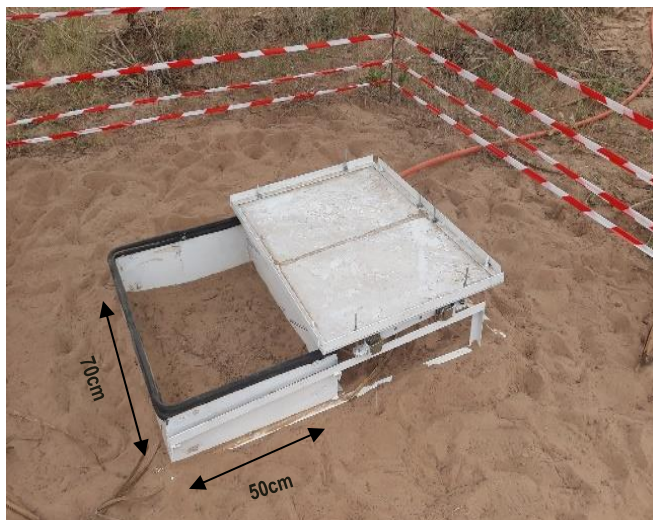


Figure 3. Chambre de mesure de dimensions 70 × 50 cm conçue pour la mesure de respiration du sol sur une parcelle agroforestière au Sénégal

Pour répondre aux besoins spécifiques des mesures de GES du sol sur le site de « Faidherbia-Flux » et assurer une bonne conception de notre chambre nous avons tout d'abord pris en compte les contraintes concernant les dimensions de la chambre. Pour minimiser les inconvénients de notre système à chambre, notamment la modification des variables microclimatiques à l'intérieur de la chambre (rayonnement, précipitations et température), nous avons, entre autre, peint en blanc les parois externes et systématiquement orienté les chambres vers le Nord.

La surface idéale d'une chambre dépend du lieu où le dispositif est déployé : les chambres les plus grandes sont conçues pour être placées sur un terrain relativement plat et dégagé tandis que les

écosystèmes forestiers présentant une haute densité d'individus peuvent nécessiter des chambres d'une superficie inférieure. La surface des chambres utilisées sur le terrain varie de 0,02 à 1 m² environ. Ici nous avons choisi de concevoir une chambre de 70 cm de long et de 50 cm de large (0,35 m²) pour mesurer les flux du sol dans l'inter-rang de culture d'un champ cultivé de mil, avec une hauteur de la chambre de 18 cm. (Figure 3). Le rapport Volume / Surface (**Eq.1**), ou la hauteur des chambres doit être suffisamment petit pour qu'un changement de la concentration de gaz cible puisse être mesuré sur une période aussi courte que possible.

Avant le déploiement sur le terrain, l'inertie des matériaux ainsi que l'étanchéité de la chambre ont été testées. Pour cela, la chambre a été momentanément isolée par une bâche en plastique, le tout étant à même le sol. En parallèle, la concentration de CO₂ a été mesurée en continu à l'aide d'un analyseur de CO₂ Li840 (Li-Cor Inc., Lincoln, NE). La chambre a enfin été perfusée par une concentration élevée en CO₂ allant jusqu'à plus de 2200 ppm (Figure 4). Après stabilisation, la concentration maximale était de 750 ppm environ. L'évolution de la stabilité de la concentration au cours du temps nous a permis de déterminer les pertes liées aux fuites, ici évaluées à 3,4 ppm par minute (Figure 4). Ces pertes (environ 7 ppm pendant les deux minutes de mesure) sont certainement dépendantes du gradient de concentration entre l'intérieur et l'extérieur de la chambre. Elles sont à comparer à la différence de concentration mesurée entre le début (500 ppm) et la fin (750 ppm) de la mesure. *In fine*, la quantité de CO₂ perdue représente moins de 3 % (valeur maximale) du signal mesuré, ce que nous considérons, dans cette étude, comme négligeable. Une correction peut toutefois être appliquée selon les cas.

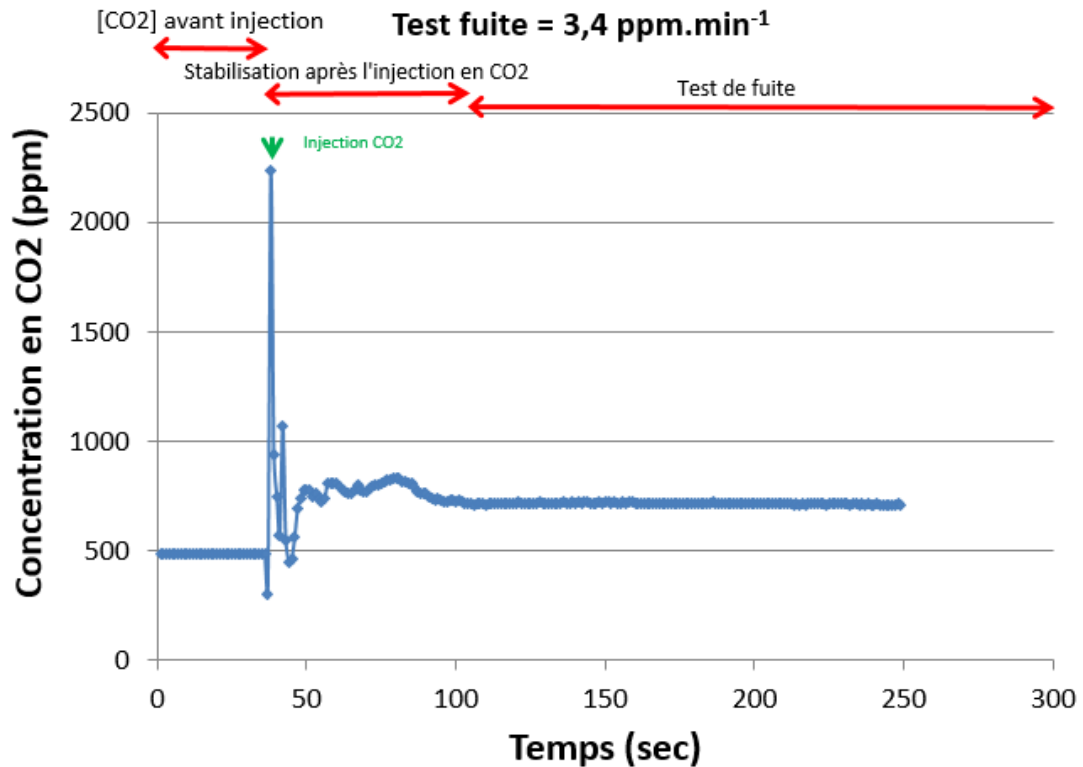


Figure 4. Résultat d'un des tests d'étanchéité effectué sur une chambre de mesure, sur une bâche en plastique imperméable, avant déploiement sur le terrain

Dispositif automatisé de chambres de mesure

Le dispositif complet de mesure (Figure 5) est constitué d'un analyseur de gaz infrarouge (IRGA) CO₂/H₂O Li840 (Li-Cor Inc., Lincoln, NE) permettant une fréquence d'acquisition de 0.5 sec à 20 sec, d'une centrale d'acquisition de données CR1000 (Campbell Scientific Ltd., Leicestershire, UK), d'un contrôleur de voies à relais SDMCD16AC (Campbell Scientific Ltd., Leicestershire, UK), de deux modules comportant huit électrovannes Matrix série 758 (Matrix Pneumatix., Santa Clarita, CA) et d'une pompe à membrane KNF NMP830KNDC (KNF Neuberger, Inc., Freiburg, DE). En pratique, ce système multiplexé peut accueillir jusqu'à cinq chambres de mesure dynamique.

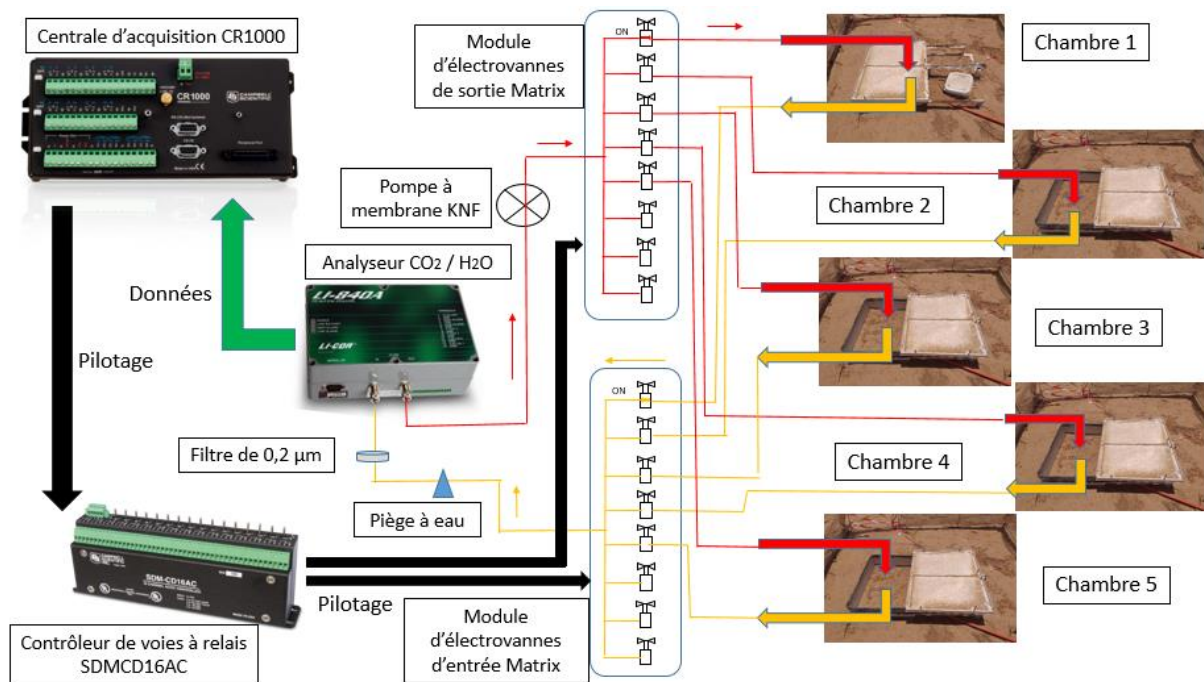


Figure 5. Schéma du dispositif complet de 5 chambres de mesure avec la chambre 1 (fermée) mesurée par l'analyseur. Les 4 autres chambres sont donc en position ouverte (pas de mesure en cours)

En détail lorsqu'une chambre est en position fermée, la circulation de l'air s'effectue grâce à une pompe à membrane KNF (1 l.s^{-1}) reliée par un tube en polyuréthane (Legris ; diamètre 6 mm extérieur / 4 mm intérieur) entre la chambre de mesure et l'analyseur de gaz (IRGA). La boucle pneumatique traverse successivement un module d'électrovannes d'entrée (multiplexée avec volume commun entre toutes les chambres), un piège à eau liquide, un filtre de $0,2 \mu\text{m}$ (pour la protection contre les poussières), l'analyseur lui-même, une pompe à membrane, un second module d'électrovannes de sortie (multiplexée avec volume commun entre toutes les chambres) avant d'assurer un retour vers la chambre.

Les modules d'électrovannes sont des modèles Matrix BX 758.8EVC212 (Matrix Pneumatix., Santa Clarita, CA) adaptés pour les mesures de gaz (Gross, 2016) avec une entrée reliée à l'analyseur et huit sorties NC (normalement fermées) reliées aux différentes chambres de mesure et comprenant un volume commun interne. Le premier module d'électrovanne est consacré aux vannes pour l'air entrant dans la chambre et le second à l'air sortant. A chaque chambre mesurée, une vanne est donc ouverte dans chacun des modules.

L'actionneur des électrovannes ainsi que la chronologie séquentielle d'ouverture et de fermeture du couvercle de chaque chambre sont ici commandés par un contrôleur 16 voies à relais SDM CD16AC (Campbell Scientific Ltd., Leicestershire, UK) relié à la centrale d'acquisition CR1000 (Campbell Scientific Ltd., Leicestershire, UK) selon une séquence programmée en boucle infinie.

L'ouverture et la fermeture des couvercles sont réglées par une configuration électronique dite de « pont en H » qui permet simplement de contrôler la polarité aux bornes du moteur pour l'actionner dans un sens ou dans l'autre (en inversant le courant) suivant si l'on souhaite ouvrir ou fermer la chambre. La charge (le moteur électrique) est connectée de chaque côté à un interrupteur qui commute entre le pôle positif et le pôle négatif de la source de tension. Si un interrupteur est connecté au pôle positif et l'autre au pôle négatif, le moteur tourne dans un sens. Si les interrupteurs sont inversés, le moteur tourne dans l'autre sens. Quand les deux interrupteurs lient la charge respectivement au pôle négatif ou au pôle positif, rien ne se passe.

La mise en place de ce pont conduit donc à utiliser pour chaque chambre deux voies sur le contrôleur de voies. Par conséquent, avec un contrôleur de 16 voies tel qu'un SDM CD16AC, on peut opérer cinq chambres séquentiellement : cinq voies servent à contrôler les électrovannes d'entrée et de sortie, 10 autres voies contrôlent l'ouverture et la fermeture des portes (*via* le pont en H).

Le nombre de chambres de mesure peut largement être augmenté : il sera doublé en ajoutant un deuxième contrôleur 16 voies sur la centrale de mesure CR1000, triplé en ajoutant un troisième contrôleur, *etc.* En pratique un maximum de 15 contrôleurs de voies SDMCD16AC peuvent venir se connecter sur la centrale d'acquisition.

Chaque chambre est équipée de capteurs auxiliaires permettant d'enregistrer les paramètres environnementaux influençant les émissions du sol tels que la température et l'humidité relative du sol ainsi que la température de l'air. Pour contrôler que ces variables (à l'intérieur de la chambre) soient aussi proches que possible des conditions ambiantes, un jeu de capteurs a également été installé à l'extérieur de la chambre. Les différences entre l'intérieur et l'extérieur de la chambre sont enregistrées par :

- température de l'air : thermocouples type T Cuivre – Constantan (TC S.A, Dardilly, FR) à l'intérieur des chambres de mesure ;
- température et humidité du sol : sondes TDR Campbell CS655 (Campbell Scientific Ltd., Leicestershire, UK) à proximité de chacune des chambres de mesure.

Le programme complet (Annexe 1) et le schéma de câblage détaillé (Annexe 2) sont fournis en annexe.

Le système est alimenté grâce à une batterie de 120 Ah, qui maintient une tension proche de 12 V. La batterie est branchée à un *panneau solaire* de 250 WC pour permettre son rechargement (régulateur 30 A) et, une fois de plus, optimiser les coûts liés à l'utilisation d'un tel dispositif. Alternativement, une source d'alimentation 220 V_{AC}/12 V_{DC} 10 A peut être utilisée.

Enregistrement des données et pilotage des chambres de mesure

L'enregistrement des données, le pilotage des électrovannes ainsi que l'ouverture et la fermeture des couvercles sont programmés et compilés par le logiciel Loggernet, fourni par Campbell Sci., en langage CrBasic. Les sorties analogiques (concentration de CO₂ et H₂O) de l'analyseur et les différents capteurs auxiliaires (température de l'air, température et humidité du sol) sont enregistrés séquentiellement (une chambre après l'autre) sur la centrale d'acquisition Campbell CR1000 à la fréquence de 1 hz, du fait du paramétrage de l'analyseur. Nous obtenons ainsi un fichier de sortie regroupant les différentes variables mesurées.

Nous ne retenons les mesures qu'après un temps de purge suffisant des tuyaux de la chambre mesurée. Ce temps est dépendant du débit de la pompe ainsi que du volume total de tubes à purger. Pour ce cas d'étude, le rayon du tube est de 0.2 cm et la longueur totale de tube entre l'analyseur et la chambre est de 5000 cm. Le volume total de tube entre l'analyseur et la chambre est donc de 628 cm³. Le débit de la pompe choisie étant de 1 l.min⁻¹, le temps de purge minimum nécessaire pour notre cas d'étude est de 38 sec.

A ce temps de purge s'ajoute une période dite de « bande morte » permettant au système de se stabiliser et de mesurer une augmentation linéaire de la concentration. Cette période commence lorsque la chambre se ferme complètement, et continue jusqu'à ce que le mélange soit établi. Ce temps est généralement compris entre 10 et 30 secondes, et peut être filtré lors du traitement de flux de données.

Le cycle de mesure, ajustable et modifiable dans le programme (Annexe 1), comprend : (i) une période de purge, chambre ouverte et pompe allumée, à la fin de laquelle on pourra estimer la concentration en gaz dans l'air de la chambre, (ii) une période de fermeture du couvercle, pompe allumée : « bande morte », (iii) une période de mesure,

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (102)

pompe allumée et couvercle fermé (accumulation), (iv) une période d'ouverture du couvercle, (v) une attente jusqu'à la fin du cycle.

Mise en place *in situ*

Chaque chambre a été placée à une distance maximale de 25 m du système de pilotage, lui-même abrité dans une cabane. Pour éviter aux gaz de diffuser latéralement dans le sol, les parois de la base de la chambre de mesure ont été enfoncées de 11,8 cm (Figures 3 et 6 ; Creelman et al., 2013). sous un arbre de *Faidherbia Albida* (Chambre 2) et en plein soleil (Chambre 1).

Pour ce cas d'étude, deux chambres de dimensions 70 x 50 x 30 cm couvrant une surface au sol de 0,35 m² ont été installées. Le volume de mesure d'une chambre (fermée) est de 63 litres. Dans ce cas d'étude, nous avons donc un rapport V/S (cf. Eq. 1) égal à 0,182 m. Dans la chambre, les tubes d'arrivée et de prise d'air sont positionnés à plus de 40 cm l'un de l'autre et à 10 cm au-dessus de la surface du sol.



Figure 6. Installation d'une chambre de mesure sur site

Analyse des données

Le cycle de mesure est paramétrable (Annexe 1). Pour cette étude de cas, la mesure des flux de CO₂ a nécessité des temps d'accumulation relativement courts avec une fréquence d'acquisition à la seconde. Nous avons fixé une durée de fermeture de la chambre de 5 min (soit 300 données pour déterminer la pente) et un temps de purge de 2 min (pour chaque mesure). Le traitement des données est réalisé de manière automatisée par des scripts développés sous le logiciel libre R (R Development Core Team) depuis les données brutes de la centrale d'acquisition afin de calculer le flux de CO₂ pour chacune des chambres à partir de fichiers bruts collectés depuis la centrale d'acquisition Campbell. Ce fichier comporte plusieurs séries de mesures de concentration en CO₂ à l'intérieur de chaque chambre au cours du temps. Pour chaque enregistrement, nous obtenons ainsi une ligne avec 5 variables correspondant à la chambre active, à l'heure du début de l'enregistrement, le flux de CO₂ (en $\mu\text{mol}/\text{mol}/\text{sec}$), la concentration initiale de l'air en CO₂ (en ppm) et le R² du modèle linéaire servant à calculer le flux de CO₂. Il est possible de visualiser graphiquement ces données de comparaison de chambres ou de fluctuation journalière et mensuelle au format .jpeg. Le code R de post-traitement des données a été généré par l'extension Rmarkdown sous la forme d'un format html (Annexe 3).

Lors de cette première campagne de mesures, les résultats de deux chambres automatiques de respiration du sol maison ont été comparées (Figure 7) sur le terrain en décembre 2018, sous un arbre de *Faidherbia Albida* (Chambre 2) et en plein soleil (Chambre 1). Les valeurs maximales de respiration du sol de chaque jour sont nettement supérieures sous l'arbre qui représente un îlot de fertilité dans un champ de sable globalement très pauvre. Mais cette différence s'atténue dans le courant de la saison sèche, *i.e.* au moins jusqu'à juin (les données postérieures à cette date sont indisponibles en raison d'une panne). Une pluie unique, fin juin, a fait beaucoup augmenter la respiration du sol (d'un facteur 8 environ) et de façon très rapide, puis elle est entrée en récession dans le courant du mois de juillet. On voit donc que le système répond de façon cohérente aux modifications de

l'humidité du sol, à court et à moyen terme (Lankreijer et al., 2003).

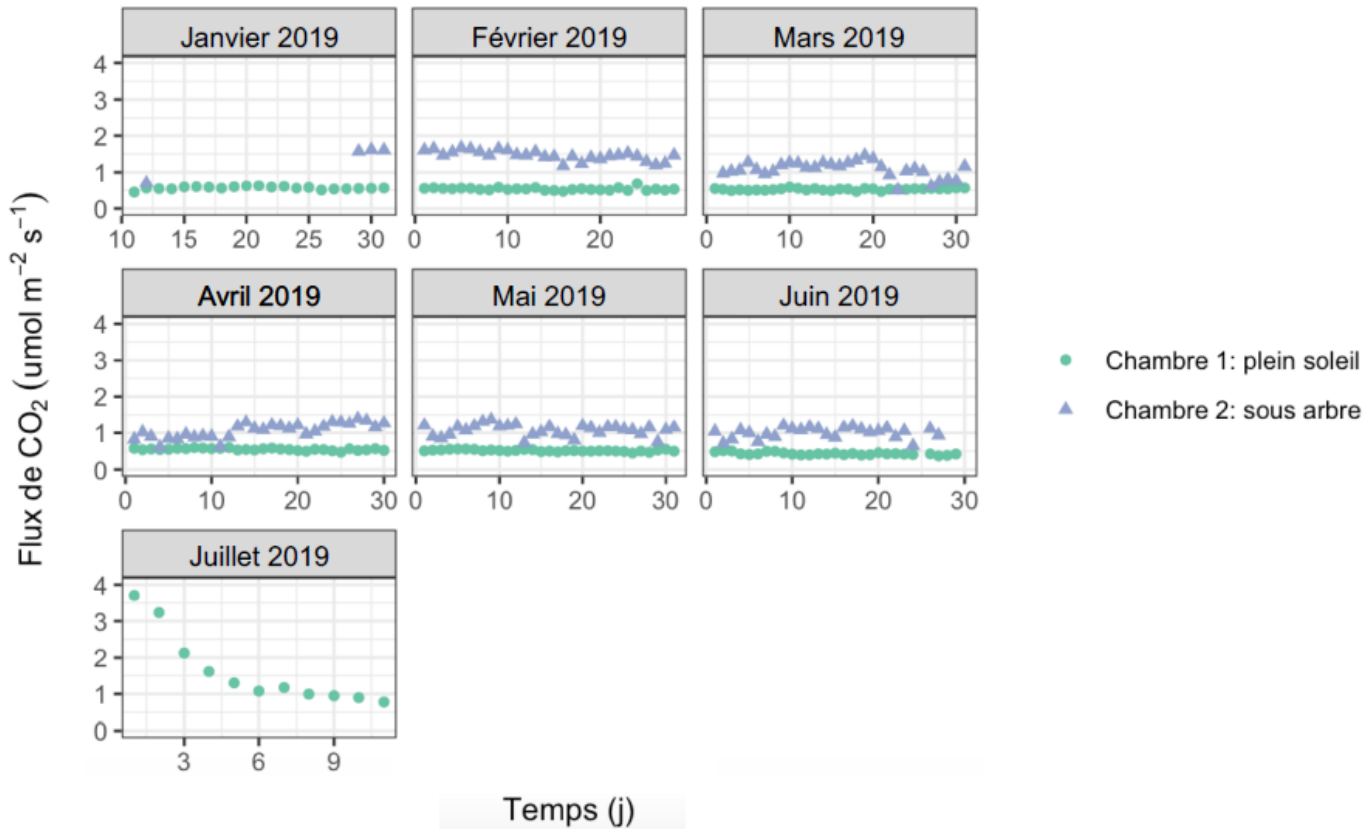


Figure 7. Comparaison des dynamiques saisonnières de deux chambres automatiques de respiration du sol, l'une sous un arbre de *Faidherbia* (représenté par des triangles - Chambre 2) et une autre chambre en plein soleil (représenté par des points -Chambre 1). Ces symboles correspondent aux moyennes journalières des valeurs de flux de CO₂ en µmol/mol/sec. Une pluie unique est survenue début juillet.

On observe également au travers des fluctuations journalières une augmentation de la respiration de près de 25 % lors des heures les plus chaudes de la journée (10h-16h ; Figure 8). Il est important de noter que le flux net de CO₂ ici mesuré est toujours positif (émis par le sol ; Figure 8).

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (102)

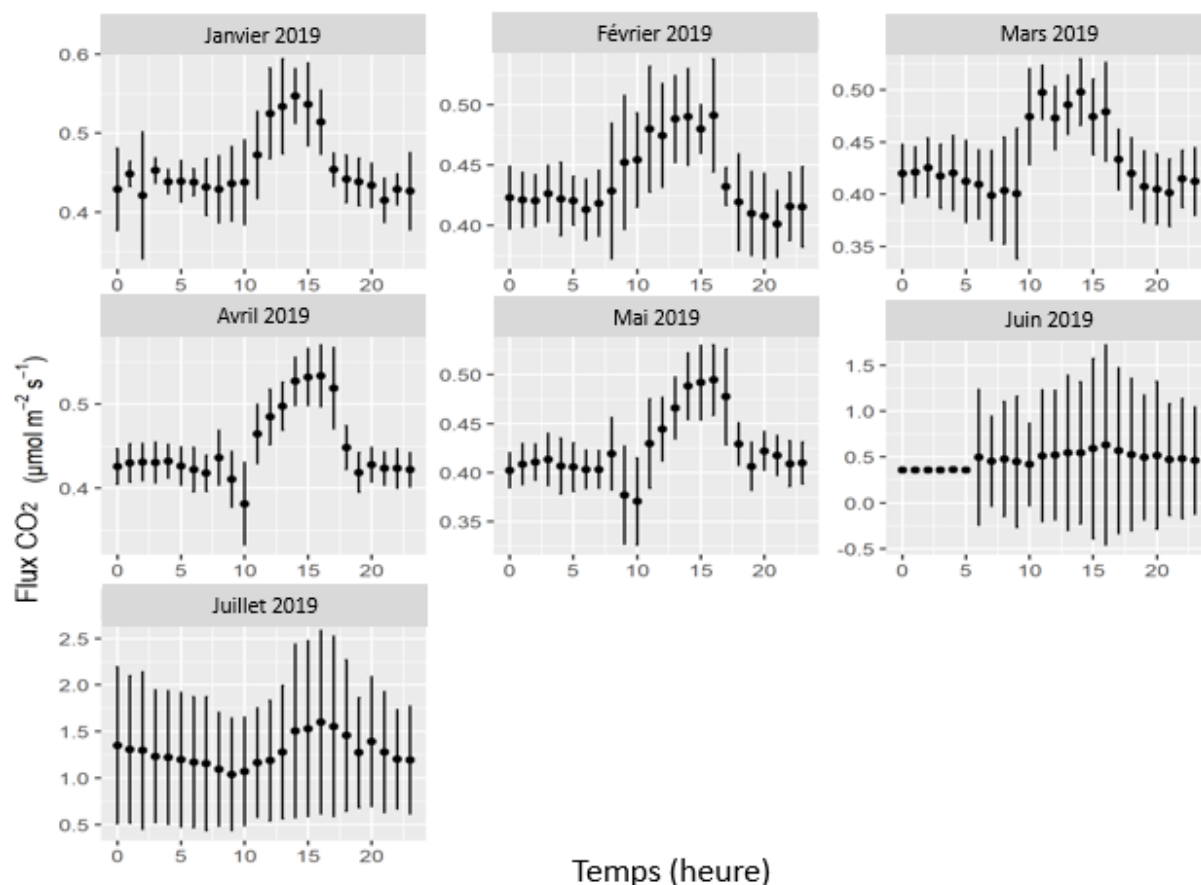


Figure 8. Fluctuations journalières des valeurs de respiration du sol pour chaque mois pour la chambre de mesure 1 plein soleil. Sur chacune des figures, les points correspondent aux moyennes des valeurs de flux de CO₂, les barres correspondent à leurs écart-types.

Analyse financière

Tableau 1. Liste des composants, fournisseurs et prix indicatifs HT en France et au Sénégal en 2019

Tableau récapitulatif du coût du dispositif							
	Composants	Désignations / Références	Fournisseurs	Quantité	Prix Unitaire HT (€)	Prix HT (€)	
Commun Acquisition et Pilotage	Centrale d'acquisition	CR1000	Campbell sci	1	1569	1569	
	Contrôleur 16 voies	SDM CD16AC	Campbell sci	1	817	817	
	Analyseur CO ₂ /H ₂ O	LI-840	Licor	1	6650	6650	
	Electrovannes	MATRIX BX 758.8EVC212	BIBUS	2	155	310	
	Accessoires électrovannes	Gaine 1m IP65		BIBUS	2	24,5	49
		Raccord D6-M5		BIBUS	2	8,9	17,8
		Raccord D6-G1/4		BIBUS	2	8,8	17,6
	Pompe à membrane	NMP830KNDC	KNF	1	147,2	147,2	
	Panneau solaire	PV 30WATT / 904-6134	Radiospare	1	392,2	392,2	
	Coffret acquisition	Coffret mural / 775-5322	Radiospare	1	64,47	64,47	
Batterie	Batterie 12V - 120Ah / 727-0433	Radiospare	1	299	299		
					TOTAL COMMUN =	10333	
1 chambre	Thermocouple - type T	100m - Bobine câble / 818 - 528	TCSA	1	70	70	
	Capteur T°C et HR	TDR CS655	Campbell sci	1	264	264	
	Moteur lève vitre	Lève vitre hyundai Lantra/8216261	Cote auto pieces	1	50	50	
	Plaque métal	Feuille acier inoxydable - 2mm	Prollians Baures	1	143,5	143,5	
	Tube Polyuréthane	100m - PU Legris 6x4 / 144-7897	Radiospare	1	76,42	76,42	
	Profile en L	Profile 20x20 / 770-620	Radiospare	3	28,79	86,37	
	Roulettes	Poulie / 352-0636	Radiospare	4	2,37	9,48	
	Joint de portière de voiture	Joint étanchéité / 170-6147	Radiospare	4	4,57	18,28	
	Plaque polyéthylène	Plaque 1,2mx620mmx2mm / 334-6450	Radiospare	1	33,28	33,28	
					TOTAL PAR CHAMBRE =	751	

Le coût du dispositif présenté ci-dessus et installé sur le site de « Faidherbia-Flux » est explicité dans le Tableau 1. Il récapitule chacun des composants utilisés, son fournisseur ainsi que son prix (à titre indicatif (HT) en France et au Sénégal en 2019). Le coût est à adapter en fonction du nombre de chambres multiplexées. Typiquement le prix du dispositif avec :

- 1 chambre = $10333 \text{ €} + 751 \text{ €} = 11085 \text{ €}$
- 2 chambres = $10333 \text{ €} + (751 \text{ €} \times 2) = 11835 \text{ €}$
- 3 chambres = $10333 \text{ €} + (751 \text{ €} \times 3) = 12586 \text{ €}$
- 4 chambres = $10333 \text{ €} + (751 \text{ €} \times 4) = 13337 \text{ €}$
- 5 chambres = $10333 \text{ €} + (751 \text{ €} \times 5) = 14088 \text{ €}$

Reconnu aujourd'hui comme une référence mondiale pour les mesures de flux de gaz du sol car choisie par les principaux réseaux de flux tels que ICOS (Integrated Carbon Observation System), le système commercial LI-COR (Li-Cor Inc., Lincoln, NE) propose son analyseur LI-8100A avec son multiplexeur LI-8150 et ces 16 chambres « long terme » Ø 20 cm, pour un prix avoisinant 120 000€.

Conclusion

Le but de cette expérience était de concevoir, développer et tester un système automatisé « maison » de chambres automatiques au sol pour la mesure en continu d'échanges gazeux pendant de longues périodes avec une facilité de mise en place, un impact minimal sur l'environnement et un coût amoindri en équipement.

Toutes ces conditions ont été remplies, nous proposons des chambres de mesure beaucoup moins coûteuses que les appareils commerciaux : pour notre système, compter environ 14 k euros pour un système complet de cinq chambres multiplexées pour la mesure de respiration du sol ; ce qui apparaît être un avantage déterminant pour la communauté scientifique. La fermeture horizontale est un choix intéressant pour minimiser la surpression (Lund et al., 1999) à la fermeture et/ou pour fonctionner sous des branches basses. D'autres systèmes de fermeture devraient pouvoir atteindre un prix équivalent, avec le même système de pilotage.

De plus, ces chambres ont l'avantage de pouvoir être fabriquées sur place et ainsi d'ajuster les dimensions aux besoins du système étudié, avec une main d'œuvre locale en évitant les complications de transport et d'importation/exportation qui peuvent exister dans certains pays.

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).

Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (102)

Bibliographie

Courtois, E. A., Stahl, C., Burban, B., Van den Berge, J., Berveiller, D., Bréchet, L., Soong, J., Arriga, N., Penuelas, J., Janssens, I. A. (2019). Automatic high-frequency measurements of full soil greenhouse gas fluxes in a tropical forest. *Biogeosciences*, 16(3), 785-796.

Creelman, C., Nickerson, N., Risk, D. (2013). Quantifying lateral diffusion error in soil carbon dioxide respiration estimates using numerical modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 77(3), 699-708.

Fick, A. (1855). *Ueber diffusion*. *Annalen der Physik*, 170(1), 59-86.

Field, C. B., Ball, J. T., & Berry, J. A. (2000). Photosynthesis: principles and field techniques. In : *Plant physiological ecology*, 209-253, Springer, Dordrecht.

Gross P. (2016). Dispositif de mesure des profils verticaux de CO₂ et de vapeur d'eau en forêt, avec étalonnage automatique de l'analyseur IRGA. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, Les Numéros Spéciaux Mesure et Métrologie, p 36-45

Hutchinson, Gordon L., and Gerald P. Livingston (2002) 4.5 Soil–Atmosphere Gas Exchange. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods* 5: 1159-1182.

IPCC (2018) Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].

Lankreijer, H., Janssens, I. A., Buchmann, N., Longdoz, B., Epron, D., & Dore, S. (2003). Measurement of soil respiration. In : *Fluxes of carbon, water and energy of European forests* (pp. 37-54). Springer, Berlin, Heidelberg.

Livingston, G.P., Hutchinson, G.L. (1995) Enclosure-based measurement of trace gas exchange: applications and sources of error. In: Matson, P.A., Harriss, R.C. (Eds.), *Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water*. *Blackwell Scientific Publications*, Oxford, 14–51

Longdoz, B., Yernaux, M., & Aubinet, M. (2000). Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. *Global Change Biology*, 6(8), 907-917.

Lund, C. P., W. J. Riley, L. L. Pierce, and C. B. Field (1999) The effects of chamber pressurization on soil-surface CO₂ flux and implications for NEE measurements under elevated CO₂. *Global Change Biology*, 5(3) 269-281.

Moffat, A. M., & Brümmer, C. (2017) Improved parameterization of the commonly used exponential equation for calculating soil-atmosphere exchange fluxes from closed-chamber measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 240-241, 18-25.

Norman, J. M., Garcia, R., & Verma, S. B. (1992) Soil surface CO₂ fluxes and the carbon budget of a grassland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D17), 18845-18853.

Pumpanen, J., Kolari, P., Ilvesniemi, H., Minkkinen, K., Vesala, T., Niinistö, S. & Janssens, I. (2004). Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123(3-4), 159-176.

Roupsard, O., Audebert, A., Ndour, A. P., Clermont-Dauphin, C., Agbohessou, Y., Sanou, J., ... & Le Maire, G. (2020). How far does the tree affect the crop in agroforestry? New spatial analysis methods in a Faidherbia parkland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 296, 106928.

ANNEXES

L'ensemble des annexes sont à télécharger sur le lien :

➤ https://github.com/maximeduthoit/Article_Technique_Chambre

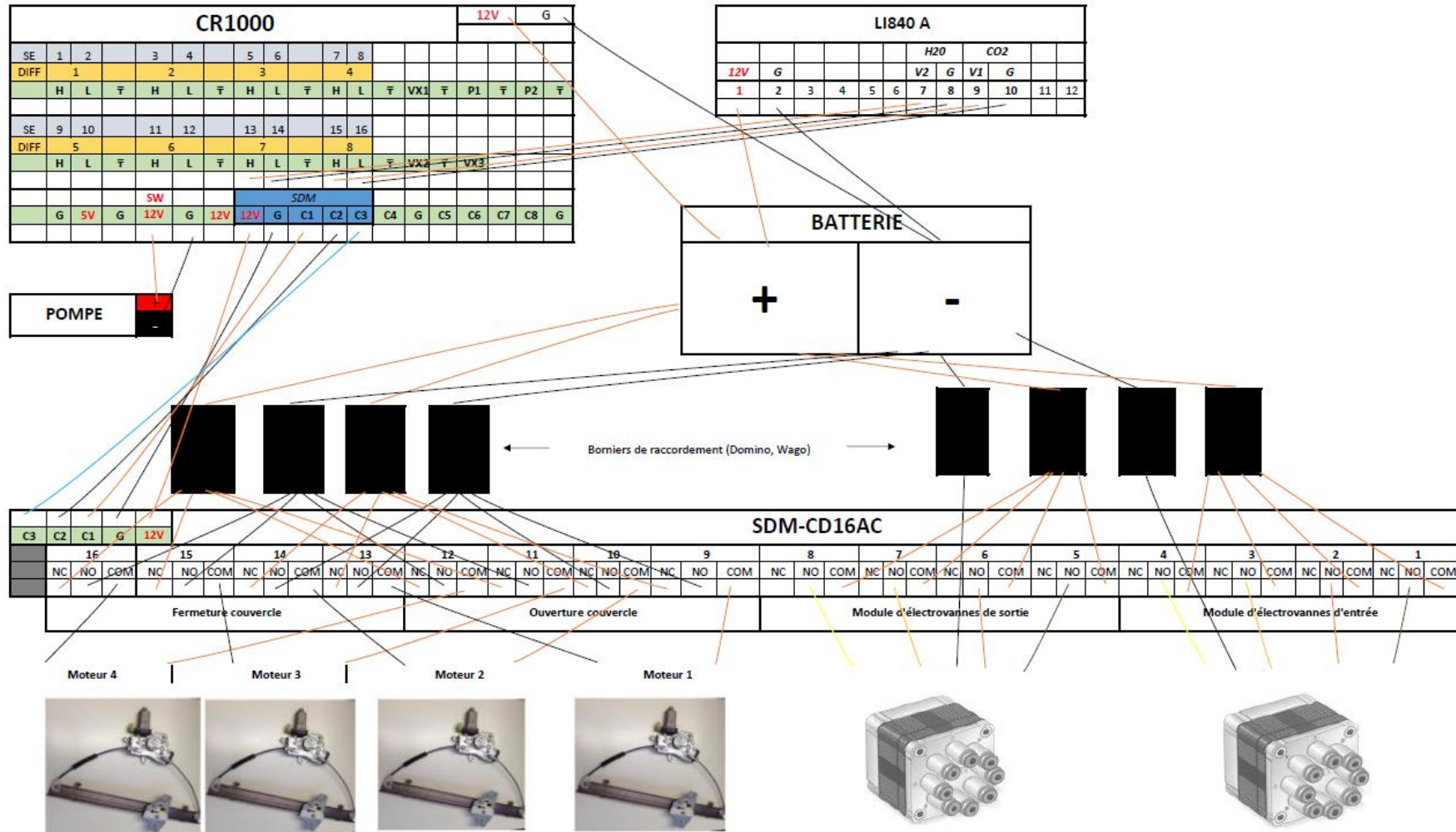
Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (102)

Annexe 1 : Programme CR1000

Extrait du programme CR1000 :

```
1 'CR1000 Datalogger
2 'Maxime DUTHOIT for FaidherbiaFlux (O.Roupsard)
3 'Version for max = 5 chambers
4
5 '%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Parameters
6
7 Const total_chambers = 2 'You can change the total chambers here (de 1 a 5)
8
9 'Declare Public Variables
10 'CR1000
11 Public BattV 'CR1000 battery
12 Public TRef 'CR1000 temperature
13
14 'SDM initialisation
15 Public SDM(16) As Long = 0 'for controlling the SDM-port (solenoids and lids), all values of SDM = 0
16 Public Active_Chamber As Long = 1 'Chamber selection / The first 5 ports on the SDM control solenoids to open or close : 1 to 5
17 Public Lid_close As Long = 6 'Lid selection for closing / The next 5 ports on the SDM force lids to close : 6 to 10
18 Public Lid_open As Long = 11 'Lid selection for opening / The last 5 ports on the SDM force lids to open : 11 to 15
19 Public X As Long = 0 'X is to store data (X=1) or not( X=0)
20
21 Alias SDM(1) = Solenoid1
22 Alias SDM(2) = Solenoid2
23 Alias SDM(3) = Solenoid3
24 Alias SDM(4) = Solenoid4
25 Alias SDM(5) = Solenoid5
26 Alias SDM(6) = Lid1_close
27 Alias SDM(7) = Lid2_close
28 Alias SDM(8) = Lid3_close
29 Alias SDM(9) = Lid4_close
30 Alias SDM(10) = Lid5_close
31 Alias SDM(11) = Lid1_open
32 Alias SDM(12) = Lid2_open
33 Alias SDM(13) = Lid3_open
34 Alias SDM(14) = Lid4_open
35 Alias SDM(15) = Lid5_open
36 |
37 'LI_840
38 Public CO2
39 Public H2O
40 'Temp and moisture
41 Public Tfield(total_chambers) 'chamber temperatures
42 Public VW(total_chambers) ' CS655 TDR soil moisture measurements (int)
43 Public PA_uS(total_chambers) ' CS655 TDR soil moisture measurements (in time)
44
45 'Declare Units
46 Units BattV = Volts
47 Units TRef = Deg C
```

Annexe 2 : Câblage



Le Cahier des Techniques de l'Inra 2020 (102)

Annexe 3 : Traitement de données issues de chambres automatiques à fermeture horizontale pour les échanges gazeux du sol (CO₂, H₂O, N₂O, CH₄) avec le logiciel R, présenté sous Rmarkdown

Extrait du traitement de données avec le logiciel R présenté sous Rmarkdown :

Traitement de données issues de chambres automatiques à fermeture horizontale pour les échanges gazeux du sol (CO₂, H₂O, N₂O, CH₄) avec le logiciel R

Créqy Nathan, Van den Meersche Karel

27/04/2020

- 1 Initialisation des constantes
- 2 Calcul de la respiration du sol à partir d'un fichier brut
 - 2.1 Uniformisation des heures d'enregistrement
 - 2.2 Séparation de chaque série de mesures
 - 2.3 Calcul du flux de CO₂
- 3 Visualisation des résultats
 - 3.1 Chargement des données stockées dans *fichierfinal.csv*
 - 3.2 Tri des données selon le coefficient de détermination R² du modèle linéaire
 - 3.3 Respiration du sol en fonction de l'exposition soleil/ombre
 - 3.4 Concentration de l'air en CO₂ au niveau de l'interface sol-atmosphère
 - 3.5 Fluctuations journalières de la respiration du sol
 - 3.6 Respiration du sol maximale journalière
- 4 Traitement du dernier fichier de données brutes disponible

1 Initialisation des constantes

```
# Cleaning the Workspace
Sys.setenv(TZ="GMT")
rm(list=ls()) #cleans every object

#we initialize the constant parameters
pressure <-101300 #air pressure (Pa)
R <- 8.3144598 # gas constant, m3 Pa K-1 mol-1
chamberareas <- c(0.395, 0.355) # (m2, around 0.7 *0.5 m, area oh1, area oh2)
chambervolumes <- c(0.063894525, 0.064725313) #Volume Chambre 1, Chambre 2

#details chamber dimensions:
#oh1: 71*55*16.3611 (mean of 18 values)
#oh2: 71*50*18.2308 (mean of 13 values)
#details tubing lengths (go and back chamber/ analyser, meters):
#oh1: chamber to solenoid valve: 33.6 + solenoid valve to analyser: 0.8 + inside the analyser: 0.5
#oh2: chamber to solenoid valve: 47.1 + solenoid valve to analyser: 0.8 + inside the analyser: 0.5
#tubing radius: 0.2 mm => we multiply total tubing length by (pi*0.2?) to get the tubing volume
```

2 Calcul de la respiration du sol à partir d'un fichier brut

A partir d'un fichier de données brutes, c'est à dire des enregistrements de la température et de la concentration en CO₂ de l'air au cours du temps, la fonction `soilrespi` renvoie un fichier `.dat` composé de 5 variables: le numéro de la chambre active, l'heure du début de l'enregistrement, le flux de CO₂ en micromol/m²/s, la concentration initiale de l'air en CO₂ (en ppm) et le R² du modèle linéaire servant à calculer le flux de CO₂.