

Mesure automatisée de la respiration du sol Caractérisation et comparaison de deux systèmes

Jean-Yves Goret¹, Benoit Burban⁹, Régis Burllett², Alexandre Bosc¹⁰ et Stéphane Ponton⁹

Résumé : Afin de mesurer en continu la respiration du sol, deux laboratoires de l'Inra ont développé deux systèmes automatiques basés sur des designs et automatismes très similaires. Le choix de la mesure des échanges gazeux s'est porté sur les deux principes bien connus des méthodes dynamiques, à savoir, le système ouvert ou fermé (Field et al. 1989). Ces deux méthodes présentent chacune leurs avantages et leurs inconvénients et chaque équipe a fait ses choix en fonction du matériel disponible, des conditions environnementales de mesure, des budgets ou des techniques maîtrisées. La prise en compte poussée (calculs préalables, vérification a posteriori) des problèmes potentiels de mesure rapportés dans la littérature a conduit à réaliser deux systèmes correctement dimensionnés.

Mots clés : CO₂, variabilité temporelle, automatisation, comparaison méthodologique



Photos 1 : chambres in situ des systèmes
SAMERESO (gauche, diamètre interne 52 cm) et ADOC (droite, diamètre interne 30 cm)

Introduction

Dans le contexte du changement global lié à l'accroissement anthropique du CO₂ atmosphérique, l'étude du cycle planétaire du carbone (C) mobilise un important effort de recherche. Le bilan de carbone des écosystèmes terrestres résulte (hors exploitation des ressources par l'homme) de la différence entre la fixation photosynthétique et les pertes gazeuses (CO₂, CH₄, VOC) dans l'atmosphère ou dans les eaux de drainage par dissolution.

¹ UMR ECOFOG Ecologie des Forêts de Guyane, Campus agronomique, BP 709, 97387 Kourou, Guyane Française ☎05 94 32 92 91 - goret@kourou.cirad.fr

² INRA EPHYSE, Écologie fonctionnelle et physique de l'environnement 69 route d'Arcachon, 33612, Cestas, France., ☎05 57 12 28 49 - Alexandre.Bosc@pierroton.inra.fr

Dans le cas des écosystèmes forestiers la respiration du sol (F_s) représente la principale sortie de C soit 60 à 80 % de la respiration totale.

La caractérisation de la respiration du sol pose des problèmes de mesures spécifiques. Outre sa forte variabilité spatiale qui nécessite une stratégie d'échantillonnage adaptée, ce flux peut être faussé par le système de mesure lui-même via des perturbations des conditions à la surface du sol (pression atmosphérique, turbulence, conductance).

Nous décrivons ici les principes de deux systèmes développés et/ou mis en œuvre par l'Inra pour mesurer les variations temporelles de F_s , puis nous discutons des précautions prises pour leur dimensionnement. Parmi les approches possibles (cf. **bibliographie**), nous avons retenu des méthodes dynamiques, par chambre ouverte ou fermée. L'automatisation permet un suivi quasi-continu de la respiration du sol.

1. Description des systèmes de mesure automatique de la respiration du sol

Le Système Automatique de MEsure de la REspiration du SOL (SAMERESO) a été installé par l'équipe ECOFOG à Kourou au cours du premier semestre 2005, en forêt tropicale guyanaise. Les chambres ont été réalisées par le laboratoire "Biometeorology – Soil physics" de l'Université de Colombie Britannique et sont identiques à celles qui équipent l'ensemble des sites du réseau Fluxnet-Canada. Le système de multiplexage d'analyse du gaz a été conçu par l'équipe Ecophysiologie de l'UMR ECOFOG.

Le système ADOC (Automated Dynamic Open Chamber) a été développé à l'Inra de Bordeaux³ en 2000-2001, d'après le design de Rayment et *al.* (1997). Une description détaillée peut être trouvée dans Roy et *al.* (2002).

1.1 Mesure des échanges gazeux : une méthode spécifique à chacun des deux systèmes

1.1.a SAMERESO : un système automatisé dynamique par chambre fermée

La mesure du flux de CO_2 du sol repose sur le principe de mesure des échanges gazeux dans un système fermé (Field et *al.* 1989) basé sur la mesure de l'accroissement linéaire de la teneur en CO_2 après fermeture de l'enceinte sur l'objet d'étude :

$$F_s = \frac{PV}{RT} \cdot \frac{\Delta \text{CO}_2}{\Delta t} \cdot \frac{1}{A}$$

Avec : P , la pression atmosphérique ; V , le volume de l'enceinte (m^3) ; R , la constante des gaz parfaits ; T , la température de l'air ($^\circ\text{K}$) ; A , la surface d'échange (m^2) et $\Delta \text{CO}_2/\Delta t$, la variation temporelle de la concentration en CO_2 dans l'enceinte ($\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$).

1.1.b ADOC : un système automatisé dynamique par chambre ouverte

La détermination de la respiration du sol est ici basée sur le principe des systèmes de mesure d'échanges gazeux de type ouvert (Field et *al.* 1989) reposant sur la mesure de la différence de concentration en CO_2 , en condition stationnaire, d'un flux d'air entrant et sortant de la chambre. Cette différence correspond à l'enrichissement induit par les émissions de CO_2 du sol qui s'exprime alors par la relation suivante :

$$F_{S_{stat}} = \frac{Q_{out} \cdot \text{CO}_{2_{out}} - Q_{in} \cdot \text{CO}_{2_{in}}}{A}$$

Avec: $\text{CO}_{2_{in/out}}$, les concentrations absolue en CO_2 à l'entrée et à la sortie de la chambre ($\mu\text{mol}_{\text{CO}_2} \cdot \text{mol}_{\text{air}}^{-1}$) ; $Q_{in/out}$, les débits molaires d'air à l'entrée et à la sortie de la chambre ($\text{mol}_{\text{air}} \cdot \text{s}^{-1}$) et A , l'aire de la surface de mesure (m^2).

³ Unité EPHYSE

1.2 Design et automatisme de la fermeture des chambres

Les deux systèmes possèdent un design similaire des chambres ; elles sont circulaires avec une embase de quelques centimètres de haut en permanence fixée sur le sol et un couvercle articulé referme la chambre de façon automatique durant la mesure.

Sur le système SAMERESO, le couvercle consiste en un dôme en acrylique transparent qui ferme hermétiquement la chambre. L'air de la chambre est alors brassé en continu par un ventilateur pour en assurer l'homogénéité. De la même façon, pour le système ADOC, un couvercle en aluminium se ferme avant la mesure grâce à un actionneur rotatif pneumatique à double effet (modèle CRB1 BW30-180S, SMC). Il est équipé d'un cylindre qui laisse entrer l'air dans la chambre et dimensionné de façon appropriée (cf. 2.1)

1.3 Multiplexage du système gazeux de mesure et cycle des mesures

Dans les deux systèmes, pour mesurer la cinétique de la respiration du sol, les chambres sont fixées au sol. Pour couvrir en partie la variabilité spatiale de F_s , la solution commune retenue a été de multiplexer plusieurs chambres sur un seul dispositif de mesure des teneurs en CO_2 permettant un gain de matériel et réduisant le biais instrumental possible. Les deux systèmes utilisent une pompe pour faire circuler l'air entre la chambre et le(s) analyseur(s) de gaz.

Pour le système SAMERESO l'air effectue un aller retour entre la chambre et l'analyseur (Li-840, Li-Cor, Lincoln, NE) avec un débit de $2\text{-}3 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. L'élévation de la concentration en CO_2 dans la chambre est mesurée toutes les secondes. La mesure dure 225 secondes de façon à permettre l'activation, tour à tour, de 8 chambres dans un cycle de 30 minutes. Un système d'acquisition des données (CR10X, Campbell Scientific, UK) enregistre une moyenne des concentrations en CO_2 toutes les 10 secondes, ainsi que les valeurs d'humidité (réflectomètre CS616, Campbell Scientific, UK) et de température du sol (sonde 107, Campbell Scientific, UK) avec un pas de temps semi horaire.

Dans le cas du système ADOC l'air est pompé sur l'entrée pour la mesure de $\text{CO}_{2\text{in}}$ (LI800, LiCOR, USA) et dans la chambre pour assurer le flux d'air et mesurer le différentiel $\text{CO}_{2\text{out}} - \text{CO}_{2\text{in}}$ (LI6262, LiCOR, USA). Après fermeture du couvercle, 10 minutes de stabilisation sont nécessaires avant d'effectuer la mesure pendant les 5 minutes suivantes. Le système ADOC permet de mesurer 5 chambres successivement. Afin de pouvoir réaliser une mesure par chambre au pas de temps de 30 minutes, elles sont fermées successivement avec un décalage de 6 minutes, de façon à ce que les échanges gazeux d'une chambre soient en cours de mesure pendant que la chambre suivante est déjà fermée pour atteindre un état stationnaire des flux. Un jeu de deux électrovannes multivoies permet de gérer les flux de gaz entre la chambre en cours de mesure, celles en équilibre ou celles ouvertes et les analyseurs de gaz. Le système est conçu pour étalonner automatiquement ces deux analyseurs via les électrovannes et l'utilisation de 3 bouteilles étalon. L'acquisition des données et des écarts types, ainsi que le contrôle de l'automatisme se fait à l'aide d'une centrale (CR23X, Campbell, UK) et d'un contrôleur à relais (SDM-CD16AC, Campbell, UK).

2. Sources d'erreurs potentielles inhérentes aux techniques de mesure

Les perturbations liées à l'implantation des chambres diminuent d'autant plus que les chambres sont grandes car le ratio périmètre (contact au sol) sur surface mesurée décroît. De ce fait les systèmes ont mis en œuvre des chambres bien plus grandes que celles des systèmes de mesures ponctuelles portables du commerce. Mais celles-ci présentent des inconvénients liés à la mécanique, à l'irrégularité du sol, à la présence de végétaux... qui obligent à trouver des compromis.

2.1 Artefacts liés au différentiel de pression chambre-air ambiant

Pour toutes les chambres dynamiques, il est primordial que la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la chambre soit la plus petite possible, car ce différentiel entraîne un flux de masse d'air entre l'intérieur et l'extérieur de la chambre à travers la porosité du sol. L'effet de ce flux de masse est considérable face au flux diffusif de CO₂ lié au gradient de concentration que l'on souhaite mesurer. Ainsi Longdoz et al (2000) montre qu'une différence de l'ordre de 1 Pa entraîne une erreur sur la détermination de F_s de l'ordre de 50%.

Les chambres doivent donc être dimensionnées de sorte que :

- la fermeture ne provoque pas de surpression passagère (fermeture très douce) ;
- dans le cas du système ouvert, la circulation de l'air ne provoque pas de différentiel de pression. Pour cela l'ouverture à l'atmosphère doit être maximale, sans induire de perte de CO₂ par rétro diffusion. Rayment et al (1997) ont déterminé que la vitesse critique de diffusion du CO₂ dans le cas d'une chambre ouverte est de 48 mm.s⁻¹. On peut ainsi calculer la surface d'équilibration de pression maximum par un simple rapport entre le débit et cette vitesse de diffusion du CO₂. Pour la surface minimum, il est souhaitable de vérifier le différentiel de pression avec un manomètre précis (de l'ordre de 0.01 Pa).

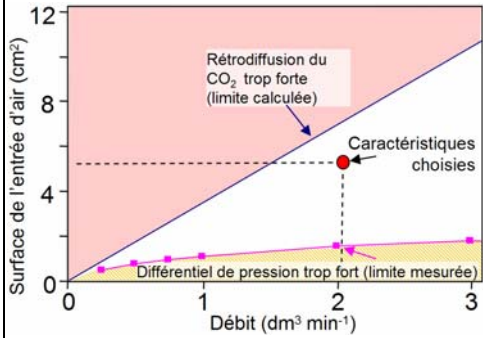
2.2 Artefacts liés à la turbulence

Des auteurs montrent que la vitesse du vent via la turbulence intervient dans la diffusion du CO₂ dans le sol en modifiant la conductance de surface du sol. Dans le cas des sols forestiers, la vitesse du vent au niveau du sol est en général assez faible. Le Dantec (1999) recommande une vitesse du vent inférieure à 0,4 m.s⁻¹ dans la chambre. Il est donc nécessaire de vérifier que les vitesses de vent dans la chambre sont comparables à celles constatées sur le sol à proximité. Pour les chambres fermées il faut choisir une vitesse du ventilateur appropriée, alors que pour les chambres ouvertes, la ventilation, induite par le pompage de l'air, nécessite de choisir un débit correct (**Figure 2** dans tableau ci-contre). Ces choix peuvent être faits de façon empirique sur la base de mesures de la vitesse du vent dans la chambre.

Conclusion

Dimensionnement et solutions mises en œuvre par les systèmes

Nous comparons dans le tableau ci-après comment chaque système par des options techniques et un dimensionnement soigné a pris en compte les contraintes liées à la mesure de la respiration du sol.

Sources de biais potentiels	Système fermé SAMERESO	Système ouvert ADOC
Perturbation microclimatique du sol par la chambre	* Chambres ouvertes entre les mesures (87.5% du temps)	* Chambres ouvertes entre les mesures (50% du temps)
Variabilité spatiale de l'écosystème	* Grande chambre : 0.216 m ² , 55 litres * Multiplexage de 8 chambres	* Chambre de taille moyenne: 0.071 m ² , 5 litres * Multiplexage de 5 chambres
Fuites d'air dans la chambre et les circuits de mesure	* Raccords adaptés (type Swagelok)	* Fuite vers la chambre sans effet dans un système ouvert avec aspiration * Raccords adaptés sur le circuit gazeux
Absorption du CO ₂ par les matériaux, (critique pour le système fermé)	* Utilisation de matériaux avec faible absorption (tube Synflex - Dekoron,)	* Utilisation de matériaux avec faible absorption (Aluminium, téflon)
Turbulence au niveau du sol	* Ventilation appropriée	* Débit d'air approprié (Vitesse <0.6 m s ⁻¹)
Fiabilité des mesures de [CO ₂]	* Ne nécessite pas un analyseur de gaz très précis, vu la méthode de calcul du flux * Etalonnage 1/mois manuellement	* Etalonnage des analyseurs automatique
Altération du gradient de CO ₂ au dessus du sol	* Temps de mesure assez courts (225 secondes)	* Débit assez fort (2L min ⁻¹) pour obtenir un différentiel de CO ₂ faible à l'état stable
Différentiel de pression chambre/atmosphère pendant la mesure	* <0.02 Pa. * Ouverture à l'air pour l'équilibrage (sans débit)	* <0.016 Pa . * Figure 2 : ouverture à l'air dimensionnée pour éviter la rétrodiffusion du CO₂  * Fermeture lente de la chambre.
Délai dans la mesure	* Attente de l'état stationnaire très courte (40 secondes)	* Attente de l'état stationnaire avant de commencer les mesures
Incertitude liée à la mesure du volume d'air de la chambre	* Mesuré. Mais biais possible lié à la complexité de l'interface sol-air (épaisseur exacte de la litière)	* Pas d'effet sur un système ouvert
Condensation dans la chambre et les tuyaux	* Débit assez fort dans les tuyaux * Ventilation	* Débit assez fort dans les tuyaux * Utilisation d'un filtre coalesceur * Pompage permanent sur les tuyaux NB: Chauffer les tuyaux permettrait d'éviter la condensation, même dans les conditions extrêmes

Bibliographie

- Davidson E, Savage K, Verchot L, Navarro R (2002) Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration *Agr.For. Met.* 113, (1) 21-37.
- Field CB, Bal JT, Berry JA (1989) Photosynthesis: principles and field techniques – In: *Plant Physiol. Eco.: Field methods and instrumentations*: 209-253.
- Hutchinson GL, Livingston GP (2001) Vents and seals in non-steady-state chambers used for measuring gas exchange between soil and the atmosphere. *European J. Soil Sci.* 52 (4), 675-682.
- Kutsch L, Staack A, Wötzel J, Middelhoff U, Kappen L (2001) Field measurements of root respiration and total soil respiration in an alder forest. *New Phytol.* 150 (1), 157-168.
- Le Dantec V, Epron D, Dufrêne E (1999) Soil CO₂ efflux in a beech forest: comparison of two closed dynamic systems. *Plant and Soil*, 214, 125–132.
- 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 Biol.* 6 (8), 907-917
- Rayment MB, Jarvis PG (1997) An improved open chamber system for measuring soil CO₂ effluxes in the field. *J. Geophys. Res. Atmosph.*, 102, 28779–28784.
- Roy C, Burrett R, Bosc A, Loustau D (2002) Un Système ouvert dynamique pour la mesure automatisée du flux de CO₂ du sol. Le système ADOC (Automated Dynamic Open Chamber). In Les journées de la mesure, INRA, La Bresse.