

Dispositif de mesure des profils verticaux de CO₂ et de vapeur d'eau en forêt, avec étalonnage automatique de l'analyseur IRGA

Patrick Gross¹

Résumé. Un dispositif automatique de mesure de concentration de CO₂ et de vapeur d'eau à sept hauteurs différentes dans la forêt a été conçu pour estimer le stockage de CO₂ dans toutes les couches de la canopée. Un ensemble d'électrovannes et de pompes, couplé à un analyseur de gaz infrarouge (IRGA) LI840 pour le CO₂ et le H₂O et une centrale d'acquisition CR1000, mesurent séquentiellement la concentration de ces gaz aux sept hauteurs, sur un cycle de 2 min. Une séquence d'étalonnage automatique de cet analyseur a été ajoutée afin d'inter-calibrer ce dernier avec l'analyseur IRGA dédié à la mesure des flux par Eddy covariance.

Mots clés : mesure concentration CO₂ H₂O, IRGA, profil vertical, étalonnage automatique



Figure 1. Tour à flux en forêt domaniale de Hesse (57) (photo : P. Gross)

1. INRA, UMR 1137 Ecologie et Ecophysiologie forestières, F-54280 Champenoux, France ; gross@nancy.inra.fr

Introduction

Le flux gazeux de CO_2 mesuré au-dessus des forêts est la résultante de deux flux contraires : assimilation chlorophyllienne et respiration de l'écosystème. La mesure par la méthode Eddy covariance (EC) du flux nocturne de CO_2 permet d'évaluer la respiration de la forêt, à condition qu'une turbulence suffisante existe pour entraîner les gaz produits par le sol et les arbres vers le point de mesure, situé au-dessus de la forêt. Dans le cas contraire, le CO_2 est stocké dans les couches basses de la canopée ou entraîné par advection horizontale. C'est pour mesurer ce stockage et partiellement corriger ainsi les flux de CO_2 obtenus par EC, que nous avons développé ce système automatisé.

Dispositif de mesure

Le cœur du dispositif (**Figure 2**) est constitué d'un analyseur IRGA LICOR LI840 couplé à une centrale d'acquisition Campbell CR1000 par liaison RS232. L'échantillonnage séquentiel de chaque niveau est réalisé avec un jeu d'électrovannes NO (normalement ouvertes) et NC (normalement fermées) commandées par quatre sorties logiques (C1 à C4 de la CR1000) via une interface réalisée au laboratoire. On a ajouté au cycle de mesure, à un intervalle paramétrable, une séquence d'étalonnage automatique du LI840 (zéro et pente) par le passage d'azote gazeux (zéro), d'un mélange étalon $\text{N}_2/\text{O}_2/\text{CO}_2$ (pente CO_2) et d'un gaz issu d'un générateur de point de rosée (pente H_2O). Afin de réguler le débit du gaz circulant dans l'analyseur, on a conçu un ensemble de mesure et de régulation avec un débitmètre massique à faible coût et une pompe à membrane.

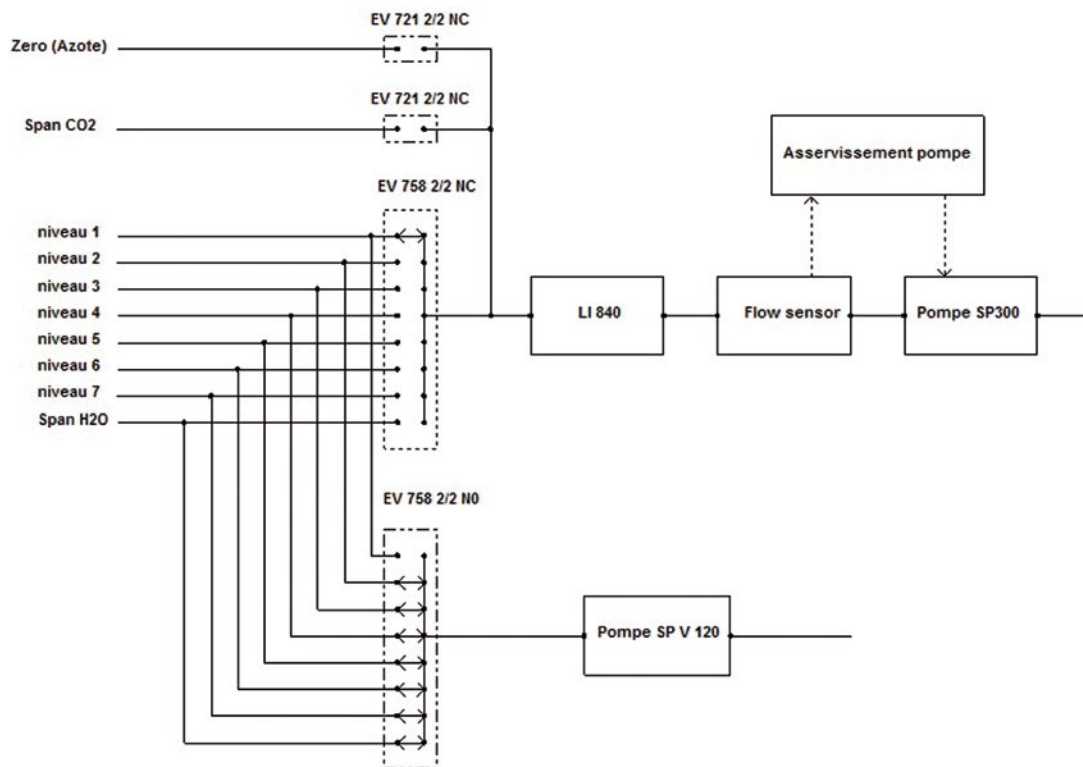


Figure 2. Schéma pneumatique du dispositif, avec le niveau 1 mesuré par l'analyseur.

La mesure de fraction molaire de CO_2 et H_2O aux différents niveaux s'effectue de manière séquentielle. Afin de minimiser le temps de réponse dû à la purge lors d'un changement de niveau, toutes les lignes qui ne sont pas en phase de prélèvement sont connectées à une seconde pompe simultanément (**Figure 2**).

Les électrovannes (EV) sont des modèles Matrix : BX 721 101 C 2 12, BX 758 8EV A2 12 et BX 758 8EV C2 12, avec respectivement 1 entrée-1 sortie NC, 8 entrées-1 sortie NO et 8 entrées-1 sortie NC, les deux dernières références sont optimisées pour un travail en dépression (**Figure 3**). La tension d'alimentation est de 12 V DC et la puissance de chaque bobine de 1,4 W.



Figure 3. De gauche à droite BX721 (*2), BX 758 NO et BX758 NC.
Tous les tuyaux ne sont pas raccordés (photo : P. Gross).



Figure 4. Filtre PALL ACRO 50
avec sa protection anti-pluie
(photo : P. Gross).

La sortie commune du groupe des huit EV normalement fermées (EV 758 2/2 NC) est connectée à l'analyseur LICOR LI840, placé en amont du débitmètre massique et de la pompe 1 (Schwarzer Precision SP 300) asservie, tous deux intégrés dans une régulation Proportionnelle-Intégrale. Seul le niveau sélectionné par les EV NC est mesuré. L'analyseur est protégé des poussières par un filtre PALL ACRO 50 membrane PTFE 0,2 μm .

La sortie du groupe des huit EV normalement ouvertes (EV 758 2/2 NO) est connectée à la pompe 2 (Schwarzer Precision SPV 120), plus puissante pour aspirer, en permanence, les six lignes de prélèvement des niveaux non sélectionnés pour l'analyse. Ainsi, seul le volume mort en aval des électrovannes NC est à purger à la commutation ; dix secondes suffisent pour cette opération. La dernière entrée du groupe NC (EV7) est utilisée pour l'étalonnage de l'analyseur LICOR LI840 avec un générateur de point de rosée (pente H_2O). Deux électrovannes simples (EV 721 2/2 NC) complètent le dispositif pour l'étalonnage avec le mélange $\text{N}_2/\text{O}_2/\text{CO}_2$ (pente CO_2) et l'azote pur (zéro).

Les tubes des lignes de prélèvement en SYNFLEX 1300 6 mm sont protégés de l'intrusion de poussières par des filtres à membrane PTFE 1 μm (PALL ACRO 50) en tête de ligne. Une protection anti-pluie a été ajoutée en utilisant un pilulier percé et taraudé 1/8 NPT (**Figure 4**). L'influence des variations des pertes de charge sur les mesures de concentrations dues aux différences de longueur des lignes

d'échantillonnage et d'encrassement des filtres en amont est minimisée par la régulation de débit dans l'analyseur LI840. La mesure de la pression et du débit de gaz dans cet analyseur, pour chaque niveau échantillonné, permet de suivre l'état des filtres et de les changer avant un colmatage excessif. Une dépression relative supérieure à 5 kPa est considérée comme critique.

Les tubes en SYNFLEX sont regroupés dans une gaine isolante Armaflex XG de diamètre intérieur 28 mm et d'épaisseur 19 mm. Trois câbles pour thermocouple Cuivre-Constantan y sont également insérés : deux sont utilisés comme câble chauffant pour éviter des phénomènes de condensation, la soudure chaude du troisième, placée à mi-chemin dans la gaine est utilisée pour la mesure de la température effective dans celle-ci.

Déroulement de la mesure

Un profil vertical est effectué toutes les 15 min et ne dure que 2 min grâce au temps de purge réduit à chaque changement de niveau. L'évolution journalière montre bien la différence de concentration en CO₂ entre les différents niveaux (**Figure 5**). On remarque notamment la décroissance rapide de concentration des niveaux bas en début de matinée, lorsque le vent se lève et vient mélanger l'air du couvert avec l'air atmosphérique, ce qui correspond à un déstockage de CO₂.

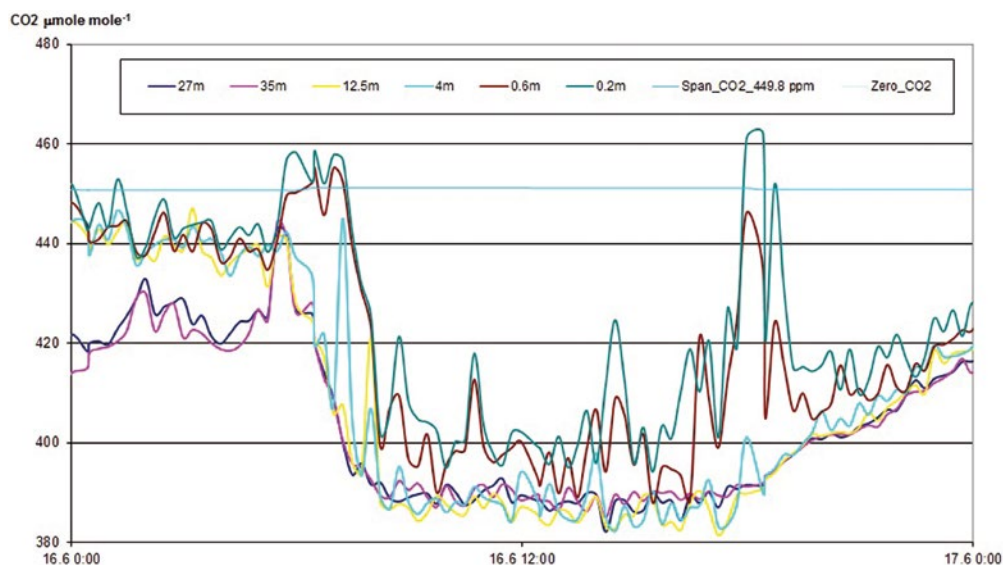


Figure 5. Evolution de la fraction molaire de CO₂ mesurée à 6 niveaux différents. La forêt a une hauteur moyenne de 18 m. L'analyseur Eddy covariance est installé à 27 m, c'est notre niveau de référence.

Correction des flux

L'intensité de la turbulence entraînant les flux de matière verticalement, de l'écosystème vers l'atmosphère, peut être caractérisée par la vitesse de friction u^* , calculée à partir des trois composantes du vecteur vent. D'une manière générale, la turbulence est réduite la nuit, favorisant (i) le stockage de CO₂ dans l'air du couvert et (ii) les phénomènes de stratification ou d'advection horizontale de CO₂ dans le cas de situation en pente ou de gradient thermique. L'étude de notre site nous a permis de définir un seuil critique de 0,11 m. s⁻¹ pour u^* , en dessous duquel l'advection latérale devient prépondérante : dans

|||||

ce cas, le CO_2 produit par le sol et les arbres est emporté latéralement et le stockage est faible, aucune correction n'est possible : ces données de flux seront repérées et éliminées lors du post-traitement. Heureusement, cette situation n'est pas systématique en période nocturne, les mesures de respiration de l'écosystème sont valides pour $u^* > 0,11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. La journée du 16 juin (**Figure 6**) est un exemple de succession de situations où les corrections sont possibles ou non. Par convention, un flux de CO_2 est compté positif s'il sort de l'écosystème (respiration) et négatif s'il est entrant (photosynthèse). En début de journée, u^* est inférieur au seuil critique, aucune correction ne peut être apportée, la donnée de flux est éliminée. Puis au lever du jour, la turbulence s'active : un stockage négatif est mesuré, correspondant à un déstockage de CO_2 de l'écosystème vers l'atmosphère. Ce flux sortant est en opposition avec le flux de photosynthèse entrant. La correction nous amène à diminuer la valeur algébrique du flux net FCO_2 :

$$\text{flux corrigé} = \text{FCO}_2 + \text{stockage CO}_2.$$

A contrario, en soirée, en l'absence de photosynthèse, un stockage positif apparaît, ce qui corrige à la hausse le flux respiratoire (positif). Cela permet ensuite les calculs des flux de respiration et d'assimilation de l'écosystème et d'affiner leur modélisation en réponse aux facteurs climatiques.

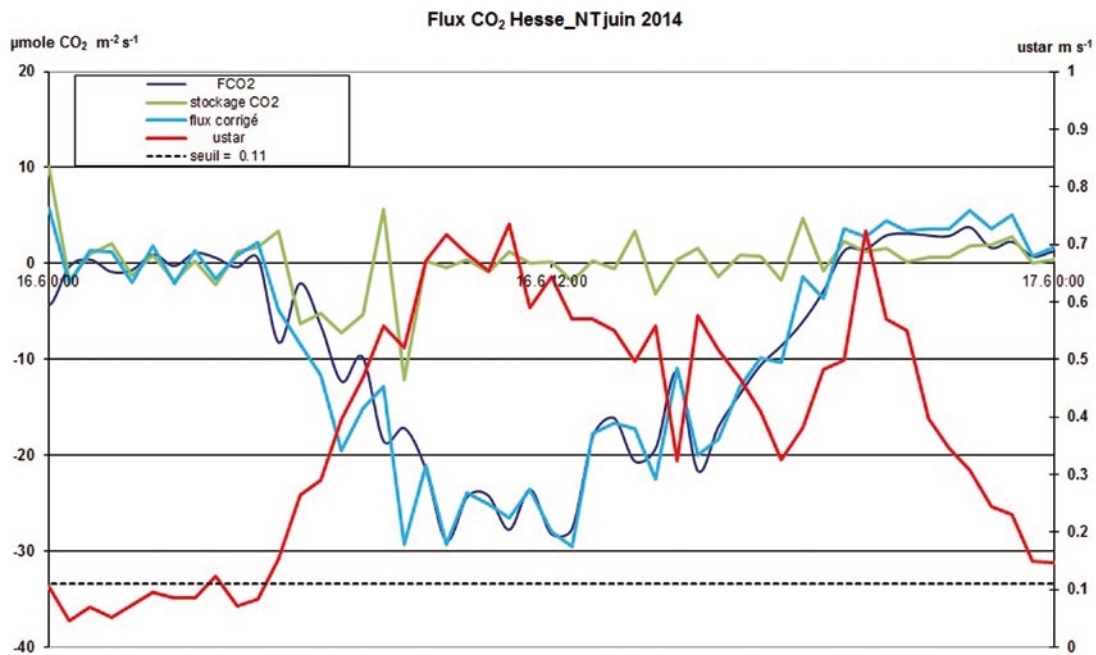


Figure 6. Evolution du flux journalier de CO_2 . La courbe bleu foncé correspond au flux mesuré par EC, la courbe bleu clair représente le flux corrigé. Le déstockage matinal est bien visible lorsque u^* (ustar) dépasse le seuil de 0,11. Le flux nocturne est valide pour la soirée.

Étalonnage de l'analyseur LI840

Un cycle de mesure pour le profil vertical sur sept niveaux dure 2 min. L'étalonnage automatique de l'analyseur LICOR LI840 est programmé à la suite toutes les 180 min et dure 11 min (cette période est paramétrable dans le logiciel de la centrale CR1000). La chronologie de la séquence d'étalonnage a été choisie afin d'en optimiser la durée : la réponse de l'analyseur aux variations de teneurs en H_2O est beaucoup plus lente que celle liée aux variations de teneurs en CO_2 (à cause de l'eau adsorbée dans

le système), le passage du mélange gazeux $N_2/O_2/CO_2$ permet de commencer à désorber l'humidité sur les parois des canalisations et de l'analyseur, ce processus se terminera ensuite lors du passage du gaz zéro (Figures 7 et 8).

A l'issue de l'étalonnage, aucun réglage n'est apporté à l'analyseur : les indications sont mémorisées et serviront à corriger les mesures de profil ultérieurement. Cette stratégie simplifie le suivi des dérives éventuelles du LI840, qui se sont avérées faibles, aussi bien pour l'offset que pour la pente.

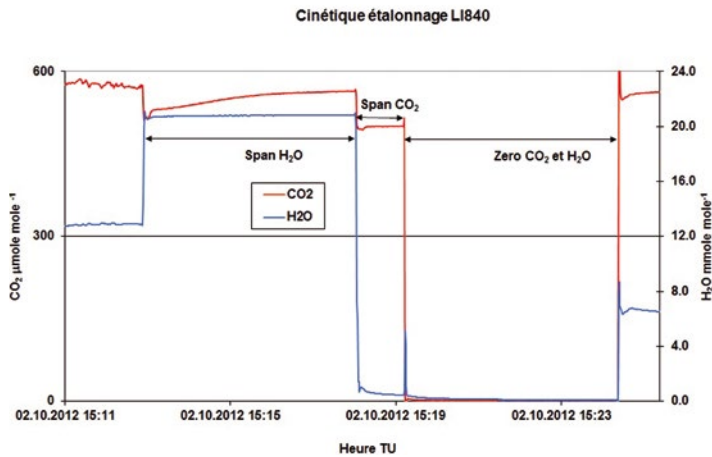


Figure 7. Cinétique d'étalonnage de l'analyseur LI840 : pente H_2O , pente CO_2 et zéro.

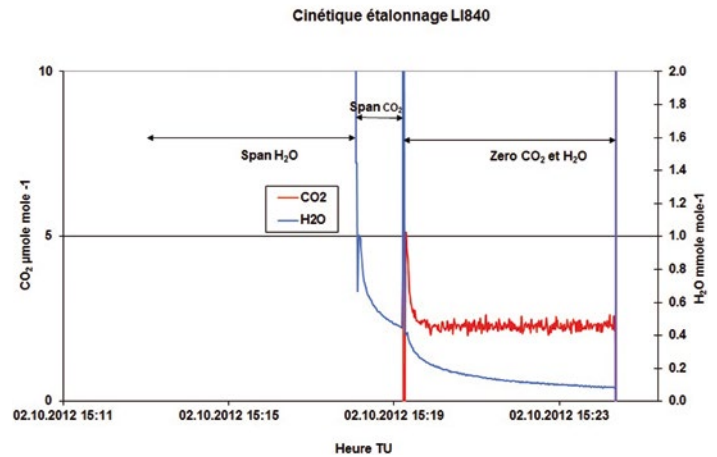


Figure 8. Zoom sur l'étalonnage du zéro.

Intercomparaison LI840 / LI7200

L'analyseur LICOR LI7200 utilisé pour la mesure des flux par la méthode Eddy covariance est installé sur une tour à 27 m de hauteur. L'étalonnage de cet appareil est possible pour la partie CO_2 en tirant une ligne acheminant les gaz étalons depuis les bouteilles situées dans un module au sol jusqu'à l'analyseur. Par contre, la vapeur d'eau nécessite beaucoup de précautions pour éviter des problèmes de condensation dans les tubes de transport, et il serait difficile d'installer un générateur de point de rosée sur la tour à flux. C'est pourquoi nous avons choisi de placer un point de prélèvement du profil à proximité de l'analyseur LI7200. La comparaison des mesures de fraction molaire de H_2O (courbes brune et violette Figure 9) a mis en évidence la nécessité de filtrer l'air et de chauffer le tube d'échantillonnage de l'analyseur LI7200, alors que le constructeur jugeait ces précautions superflues. Leur mise en place le 20 janvier 2014 a apporté une amélioration notable des mesures de fraction molaire en vapeur d'eau (Figure 9).



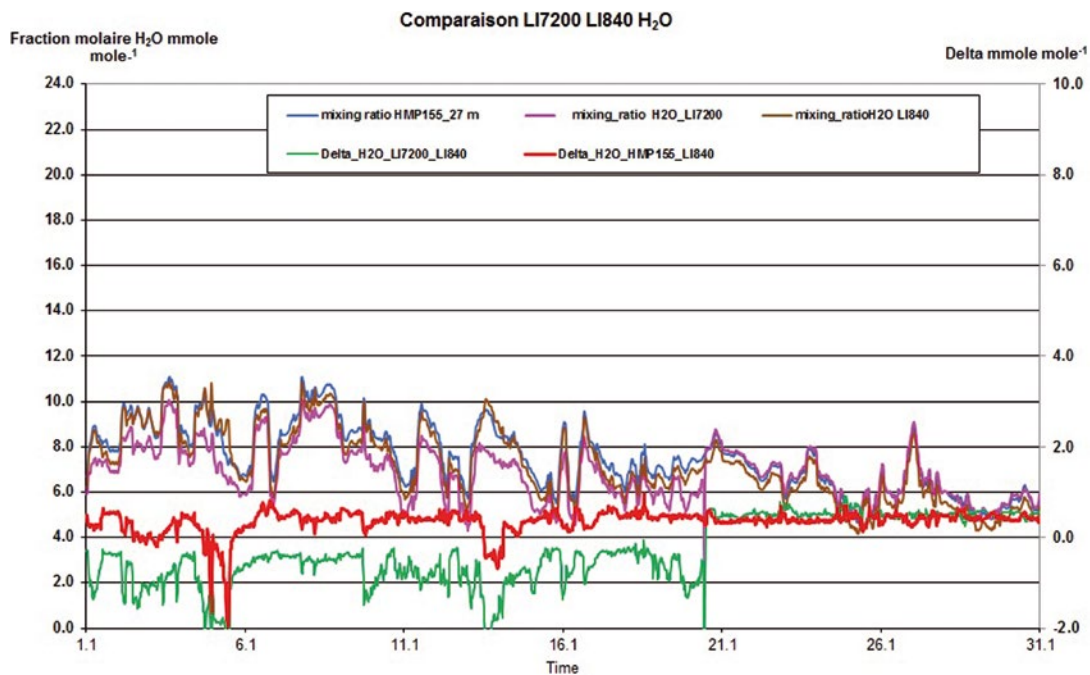


Figure 9. Comparaison des indications des analyseurs LI7200 et LI840 et d'un hygromètre Vaisala HMP155 pour la mesure de fraction molaire de vapeur d'eau ; le chauffage et la filtration pour le LI7200 ont été mis en service le 20 janvier 2014.

Conclusion

Ce dispositif, en fonctionnement en forêt depuis juillet 2012, a bien répondu aux objectifs visés et nous autorise à réévaluer environ 50 % des flux nocturnes de CO₂. La comparaison des mesures LI7200-LI840 est maintenant systématique, afin de corriger les flux de CO₂ et de vapeur d'eau calculés en cas de dérive de l'analyseur LI7200. Les dysfonctionnements sont repérés et solutionnés beaucoup plus rapidement.

Références bibliographiques

Bonnefond JM, Berbigier P, Nouvellon Y, Rouspard O (2002) La mesure des flux de gaz par la méthode des covariances turbulentes ou « Eddy covariance ». www.inra.fr/j2m

Gross P (2002) Etalonnage des capteurs d'humidité à l'aide d'un générateur de point de rosée. www.inra.fr/j2m

Annexe technique

Commande électrovannes profils CO₂ et H₂O

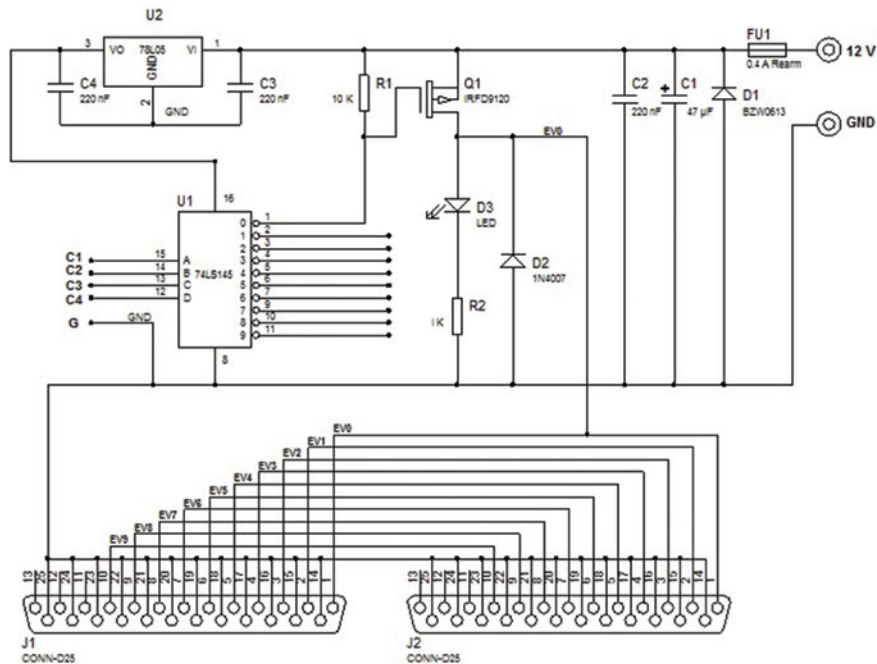


Figure 10. Schéma de principe de la commande des électrovannes. Pour ne pas alourdir la figure, l'ensemble R1, R2, Q1, D2 et D3 n'a été représenté qu'une seule fois, il faut le répéter autant de fois que d'électrovannes supplémentaires : dans notre cas, 10 au total.

Un décodeur BCD vers décimal 74LS145 sélectionne une seule électrovanne parmi les dix possibles, suivant le code binaire en entrée, voir **Tableau 1**. La sortie collecteur ouvert facilite l'interfaçage avec les transistors MOSFET canal P IRFD9120. Pour d'autres utilisations, ne pas dépasser un courant de 1 A dans ces transistors, en modifiant éventuellement le calibre du fusible réarmable.

Tableau 1. Table de vérité

Entrées				Electrovannes sélectionnées	Broches DB25 + -
C4	C3	C2	C1		
0	0	0	0	EV0	1-14
0	0	0	1	EV1	2-15
0	0	1	0	EV2	3-16
0	0	1	1	EV3	4-17
0	1	0	0	EV4	5-18
0	1	0	1	EV5	6-19
0	1	1	0	EV6	7-20
0	1	1	1	EV7	8-21
1	0	0	0	EV8	9-22
1	0	0	1	EV9	10-23

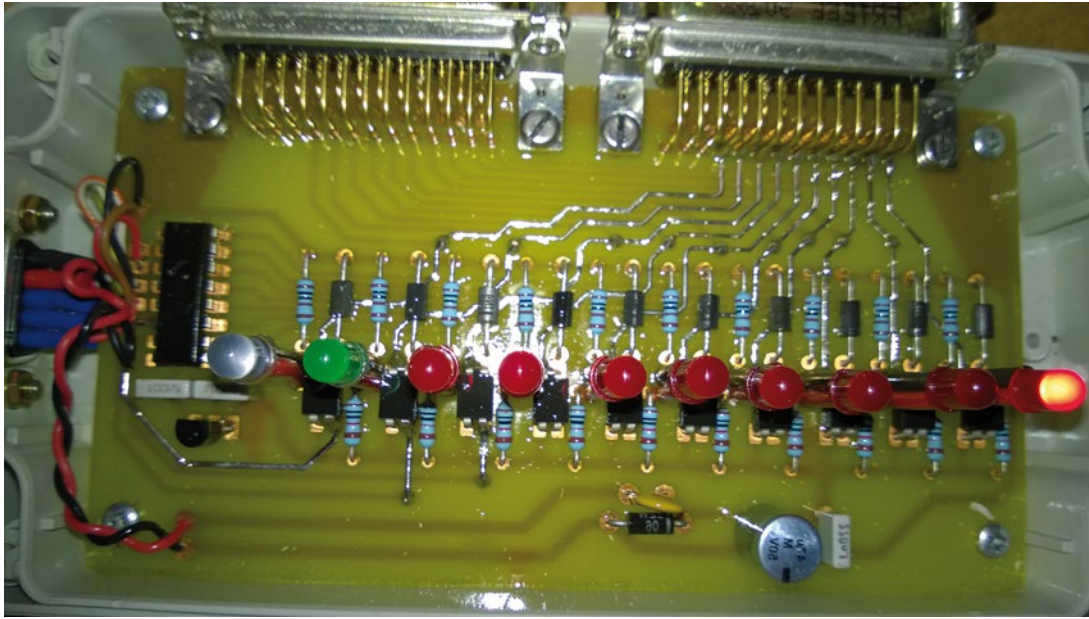


Figure 11. Implantation des composants de la carte de commande des électrovannes (photo : P Gross).

Régulation de débit dans l'analyseur LI840

Nous avons choisi un capteur de débit faible coût : First Sensor WBAL001DU, la réponse n'est pas linéaire, mais sans conséquence pour fonctionner à un seul point de consigne (0,85 l. min⁻¹). Ce capteur est alimenté en + 10 V par IC3 MAX 666. L'action Proportionnelle-Intégrale est réalisée par les deux amplificateurs IC1 et IC2, le transistor MOSFET Q1 effectue l'interface avec la pompe à membrane. L'alimentation secteur classique a été remplacée récemment par un module convertisseur 12 V en entrée et ± 12 V en sortie pour fonctionner sur batterie+panneau solaire.

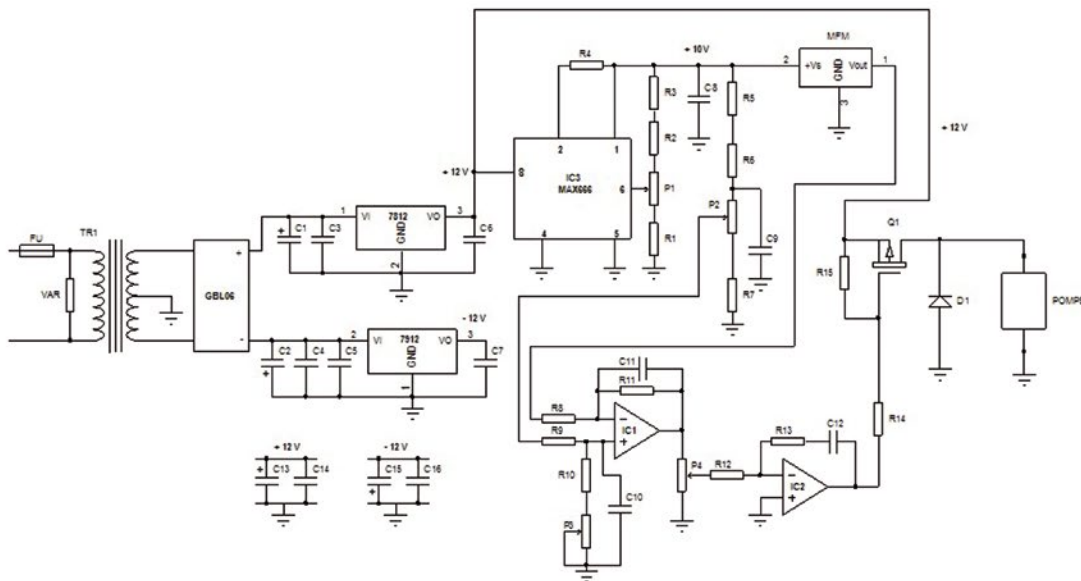


Figure 12. Schéma de principe de la régulation de débit.

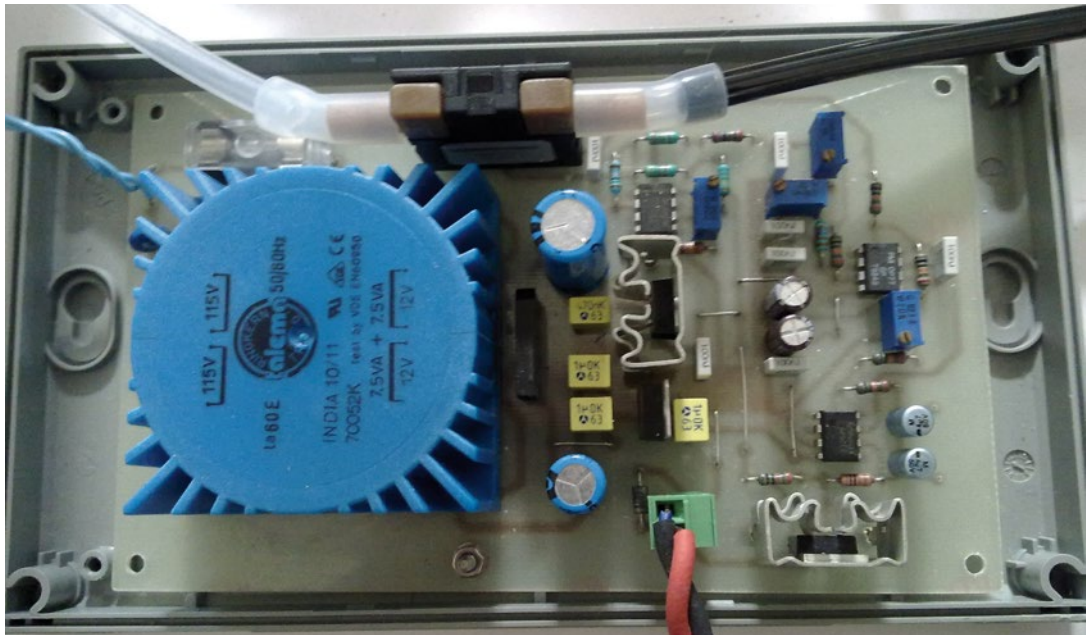


Figure 13. Implantation des composants de la carte de régulation de débit (photo : P Gross).

