



**HAL**  
open science

## Détermination des flux de GES par une “ myriade ” de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)

Didier Jézéquel, Paul Dasi, Lionel Fichen, Viet TRAN KHAC, Antoine Guillot, Mickaël Beauverger, Philippe Quetin, Victorien Hosatte

► **To cite this version:**

Didier Jézéquel, Paul Dasi, Lionel Fichen, Viet TRAN KHAC, Antoine Guillot, et al.. Détermination des flux de GES par une “ myriade ” de chambres flottantes automatiques (MYRIADE). UMR CARRETEL INRAE & USMB. 2023. hal-04840765

**HAL Id: hal-04840765**

**<https://hal.science/hal-04840765v1>**

Submitted on 16 Dec 2024

**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.



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)		
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023
			<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>

<b>Responsables <sup>(1)</sup></b>	Porteur : Didier Jézéquel, MCF HDR, UPC-IPGP & INRAE <a href="mailto:jezequel@ipgp.fr">jezequel@ipgp.fr</a> Interlocuteurs DT : Lionel Fichen, IE, DT INSU Plouzané <a href="mailto:lionel.fichen@cnrs.fr">lionel.fichen@cnrs.fr</a> Paul Dasi, IE, DT INSU Plouzané <a href="mailto:paul.dasi@cnrs.fr">paul.dasi@cnrs.fr</a> Autres participants : Antoine Guillot, IR, DT INSU Plouzané <a href="mailto:antoine.guillot@cnrs.fr">antoine.guillot@cnrs.fr</a> Mickaël Beauverger, IE, Univ. Brest Viet Tran-Khac, IR, UMR CARTELE (INRAE & USMB) <a href="mailto:viet.tran-khac@inrae.fr">viet.tran-khac@inrae.fr</a> Philippe Quetin, IE, UMR CARTELE (INRAE & USMB) <a href="mailto:philippe.quetin@inrae.fr">philippe.quetin@inrae.fr</a> Victorien Hosatte, étudiant Lic. Pro Capteurs IUT Belfort-Montbéliard, UMR CARTELE (INRAE & USMB)
------------------------------------	--

	<b>Laboratoire <sup>(2)</sup></b>	<b>Instituts <sup>(3)</sup></b>	<b>RH <sup>(4)</sup></b>	<b>Contact <sup>(5)</sup></b>	<b>Expertises <sup>(6)</sup></b>
<b>Equipes</b>	IPGP			Didier Jézéquel <a href="mailto:jezequel@ipgp.fr">jezequel@ipgp.fr</a>	Conception, mécanique, tests de flux de CO <sub>2</sub> et CH <sub>4</sub>
	INRAE			Viet Tran-Khac <a href="mailto:viet.tran-khac@inrae.fr">viet.tran-khac@inrae.fr</a>	Intégration des capteurs CO <sub>2</sub> (K30 puis K33 Senseair) et CH <sub>4</sub> , pilotage servomoteurs et tests de flux
	DT INSU Plouzané			Lionel Fichen <a href="mailto:lionel.fichen@cnrs.fr">lionel.fichen@cnrs.fr</a>	Conception et réalisation des deux prototypes ; tests de flux de CO <sub>2</sub>
	DT INSU Plouzané			Paul Dasi <a href="mailto:paul.dasi@cnrs.fr">paul.dasi@cnrs.fr</a>	Conception et réalisation V2 ; tests de flux de CO <sub>2</sub>

	<b>Financeurs <sup>(7)</sup></b>	<b>Somme allouée (k€) <sup>(8)</sup></b>
<b>Budget</b>	DIIRO	14,3 k€*
	* 01/04/2021 : 20 k€ alloués sur 3 projets (UAR855) : MAE, CASPA-PICO et MYRIADE ; 27/06/22 : 2 <sup>ème</sup> tranche de subvention : 5,2 k€ à l'UAR855	

<b>Domaine(s) <sup>(9)</sup></b>	<input type="checkbox"/> AA	<input type="checkbox"/> OA	<input checked="" type="checkbox"/> SIC	<input type="checkbox"/> TS
	<input type="checkbox"/> Autre <sup>(10)</sup> :			

	<b>Thématiques</b>	<b>Technologiques</b>
<b>Mots clés <sup>(11)</sup></b>	Cycle du carbone – émissions de gaz à effet de serre (GES) par les systèmes aquatiques (lacs notamment)	Chambre flottante automatique – Capteurs low-cost CO <sub>2</sub> et CH <sub>4</sub> .



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)			
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022	<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023	

--	--	--

	<b>Initial</b>	<b>Final</b>	<b>Justification <sup>(13)</sup></b>
<b>TRL</b> <i>(12)</i>	<b>3</b>	<b>6 à 7</b>	Le principe de départ d'une chambre flottante automatique était déjà décrit dans la littérature, avec des variantes concernant la phase de remise à l'air. Nous avons proposé et démontré la possibilité d'utiliser un autre dispositif pour la ventilation de l'enceinte (registres), et nous avons validé le fonctionnement en conditions réelles (lac) en comparant les résultats à ceux issus d'un montage de référence.



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)			
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022	<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023	

## 1. Objectifs du projet :

L'étude du cycle du carbone représente un fort enjeu, car cet élément est au centre de très nombreuses réactions et interactions au sein de la zone critique. Il est notamment directement impliqué, via les formes CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> (dioxyde de carbone et méthane), dans le bilan radiatif à la surface du globe. L'augmentation des teneurs atmosphériques de ces deux gaz à effet de serre (GES) contribue ainsi largement au réchauffement climatique observé, et de surcroît pour le CO<sub>2</sub> à l'acidification des eaux de surface, à commencer par l'océan.

A l'échelle d'un système aquatique, qui peut être perçu comme un réacteur à carbone, il est important de comprendre son fonctionnement biogéochimique et le bilan de carbone associé.

Compte tenu de leur faible surface cumulée (environ 3% de la surface continentale), les hydrosystèmes continentaux ont été longtemps considérés comme négligeables dans le cycle du carbone par rapport à l'océan. Cependant ce paradigme a été remis en cause depuis une quinzaine d'années par de nombreuses études (e.g. Tranvik *et al.*, 2009). Les eaux continentales peuvent être perçues comme un réacteur transformant le carbone (fig. 2) : modèle du « tuyau réactif » ou active pipe proposé par Cole *et al.* (2007). Elles sont notamment responsables d'émission de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> vers l'atmosphère (l'émission de CO<sub>2</sub> serait du même ordre que le puits de CO<sub>2</sub> océanique).

### Détermination des flux de gaz à l'interface eau-air

Afin de mieux contraindre le cycle du carbone dans les systèmes aquatiques et notamment de préciser leur rôle dans le bilan d'émission des GES, il est important de déterminer les flux de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> à l'interface eau-air.

Plusieurs méthodes sont disponibles pour quantifier ces flux :

- méthode par le gradient de concentration (ou de pression partielle) entre l'eau de surface et l'air
  - méthode de la covariance des turbulences (ou EC pour Eddy Covariance) - méthode de la chambre flottante (CF)
- Chaque méthode a ses avantages et inconvénients, ses partisans et détracteurs. Les deux dernières méthodes (EC et CF) sont des méthodes directes alors que la première (basée sur le gradient) nécessite la connaissance d'un paramètre qui n'est pas toujours très bien contraint, le coefficient d'échange entre l'eau et l'air (ou coefficient de réaération).

La méthode de la chambre flottante présente l'avantage d'être moins coûteuse que la méthode d'eddy covariance. Elle est également versatile, permettant de quantifier les flux de plusieurs gaz simultanément (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S...). C'est une méthode ancienne mais robuste et largement éprouvée (e.g. Matthews *et al.*, 2003, Lambert et Fréchette, 2005).

Une enceinte close est posée à la surface du lac, enfermant un volume d'air au contact de l'eau. Cette chambre est équipée de capteurs permettant de quantifier les teneurs en CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> dans l'air de la chambre. L'évolution de ces teneurs en fonction du temps permet de calculer un flux d'échange à l'interface eau-atmosphère. Cette méthode directe de détermination des flux présente néanmoins plusieurs inconvénients, notamment de nécessiter une surveillance permanente et de nombreuses manipulations. Elle est par conséquent chronophage et ne permet sous cette forme que des mesures ponctuelles, difficiles à répliquer en grand nombre. Les données de flux sont encore trop peu nombreuses pour un suivi représentatif et fiable des systèmes aquatiques. Certaines périodes ou épisodes présentant des contraintes humaines ou des dangers sont par ailleurs sous-représentées dans les jeux de données (périodes nocturnes, hivernales, week-end, épisodes de vent fort ou de pluie forte...). Or pour caractériser un milieu naturel dans sa variabilité à la fois spatiale et temporelle, il est nécessaire de multiplier les mesures.

Plusieurs situations nécessitent une meilleure connaissance des flux, tels que les grands lacs (Léman, lac du Bourget...), qui présentent des sous-parties contrastées (sous-bassins, zone littorale vs. pélagique, zones de deltas...). C'est le cas également des rivières, dont le fonctionnement et les caractéristiques dépendent du tronçon considéré.

### Présentation globale du projet et positionnement



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)			
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022	<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023	

Afin de répondre aux besoins de description d'un système aussi grand que le lac Léman par exemple, ou à des systèmes naturels ou artificiels en grand nombre (ex. macrocosmes), il est nécessaire de disposer de nouveaux outils. **Le projet proposé consiste à développer un système de chambres flottantes automatiques (CFA) en essaim** (projet MYRIADE : Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques).

Basées sur une technologie de capteurs à bas coût (contrairement au modèle manuel actuellement disponible) et d'une intégration « open source », ces chambres flottantes pourraient être réalisées en « grand » nombre (10 à 20), ce qui permettrait d'atteindre les objectifs précités. Ces CFA permettront de déterminer en continu et à « haute fréquence » les flux de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> (2 à 3 déterminations de flux par heure, jour et nuit) ainsi qu'un certain nombre de paramètres importants dans les échanges de gaz à l'interface eau-air (température de l'eau et de l'air, vitesse du vent, turbulence, pression...). Des systèmes similaires commencent à être décrits dans la littérature scientifique (Thanh Duc *et al.*, 2013, 2019 ; Martinsen *et al.*, 2018), mais restent des prototypes non commercialisés et répondant partiellement aux exigences énoncées plus haut.

Quant aux modèles commerciaux actuellement disponibles, ils sont d'une part d'un coût élevé (env. 40 k€ chez West Systems pour une chambre donnant les flux de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub>S, ce qui permet difficilement d'envisager de démultiplier ce système par ailleurs non automatisé), ou ne répondant que partiellement à la question (modèle eosFD de chez Eosense, env. 5 k€, mais pour le CO<sub>2</sub> seul et sans le flotteur ni l'alimentation électrique autonome, à rajouter et fabriquer par ailleurs car le système est prévu à la base pour les sols).

### Objectifs scientifiques :

Mieux quantifier les flux d'émission de GES carbonés (CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>) depuis les systèmes aquatiques, en améliorant la représentativité spatiale et temporelle des flux mesurés.

→ **Choix d'une méthode automatisable et à coût réduit afin de multiplier les mesures *in situ*.**

### Objectifs techniques :

Développer un prototype de **chambre flottante automatique (CFA)** utilisant des **capteurs low-cost** :

CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> + paramètres environnementaux (T eau, T air, Pression atm., agitation, vent, lumière...)

Autonomie ≥ 1 mois. Retransmission des données à distance (à terme).

NB : installation non-dérivante (lacs) ; évolution possible en mode dérivant (rivières...) → GPS

### Verrous techniques :

- Développer un système de ventilation de la chambre fiable, à faible consommation d'énergie
- Intégration complète à coût réduit et à consommation minimale d'énergie, léger (transportable à dos d'homme)
- Fiabilisation de la réponse des capteurs à gaz sur le long terme (notamment dérive du signal, résistance vis-à-vis de l'humidité)
- Résistance à des conditions environnementales rudes à moindre coût (marinisation, gammes de températures étendues)



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)			
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022	<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023	

## Niveau de TRL :

En 2021, la validation des composants sur une maquette en laboratoire nous a permis d'atteindre un niveau entre **TRL4 et TRL5**

Fin 2022, les essais réalisés dans un environnement représentatif correspondent à un niveau **TRL6**.

## 2. Résultats du projet :

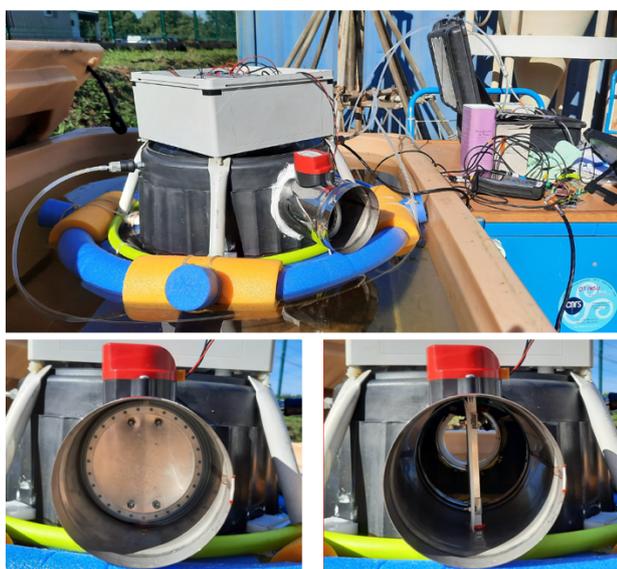
### Phase 1 (2021) : Conception et validation d'un premier prototype (V1) de chambre flottante automatique (CFA)

Après concertation sur les principes principaux (visio-conférence du 24/03/2021), le choix s'est porté sur une ventilation passive par ouverture de clapets, moins énergivore, plutôt qu'une circulation active utilisant en plus des clapets un ventilateur afin de renouveler l'air de l'enceinte entre deux phases de mesures.

Des essais réalisés à l'UMR CARRTEL de Thonon ont permis de valider ce principe d'une ventilation passive. Le premier prototype de CFA a donc été muni de 2 ouvertures à clapets ou registres (diamètre d'ouverture 125 mm), placés à l'opposé l'un de l'autre sur l'enceinte (Fig. 1).

Une mission conjointe CARRTEL-DT INSU réalisée à Plouzané les 13-16 oct. 2021 a confirmé le bon comportement du système de ventilation passive, en réalisant des essais de mesures de flux de CO<sub>2</sub> sur un grand bac d'eau. Afin d'obtenir un flux sortant de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère, l'eau du bac (env. 1,1 m<sup>3</sup>) a été dopée au bicarbonate de sodium (NaHCO<sub>3</sub>) et ajout d'acide chlorhydrique (HCl) afin d'abaisser légèrement le pH et de favoriser l'émission de CO<sub>2</sub>. L'enceinte, d'une surface de 0,145 m<sup>2</sup> et posée sur la surface de l'eau, était munie d'un capteur low-cost à CO<sub>2</sub> K30 Senseair (placé directement dans l'enceinte) d'une part, et connectée d'autre part à un capteur de référence de type NDIR, un Licor LI820, via deux tuyaux (l'air de l'enceinte circulant entre celle-ci et le capteur Licor au moyen d'une pompe Alphapump). Les registres étaient actionnés manuellement à un rythme typique des déploiements de chambre (env. 10 min. de fermeture).

Pendant ces essais réalisés en extérieur, le vent était nul ce qui est un cas défavorable au renouvellement passif de l'air de l'enceinte lorsque les registres sont ouverts. Malgré cela, un retour à la valeur du CO<sub>2</sub> atmosphérique a été obtenu en 2 min. environ, validant l'utilisation des registres sans nécessiter de ventilation forcée (Fig. 2 haut).



**Registres fermés**

**Registres ouverts**

**Registres motorisés 12V Yinsheng (30 €)**

diam. 125 mm

joint silicone

moteur électrique (2 x 35 mA)

**Enceinte PE noir 30 L (h 30 Ø38-43 cm)**

+ flotteurs

**Capteurs CO<sub>2</sub> :**

K30 Senseair (100 €) (intérieur)

+ contrôle par LI 820 (extérieur

de l'enceinte, circulation par pompage)

**Bac d'eau douce ≈ 1100 L ; en extérieur**

+ NaHCO<sub>3</sub> + HCl → pCO<sub>2</sub> > atm.

→ flux CO<sub>2</sub> sortant

+ mesure T, pH et conductivité

**NB : vent nul lors des essais**

Fig. 1 : Prototype V1 de chambre flottante à ventilation passive par 2 ouvertures à clapet (registres).



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)			
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022	<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023	

Il est à noter que l'ouverture d'un seul des deux clapets n'a pas permis un renouvellement rapide de l'air, ce qui justifie l'utilisation de 2 registres.

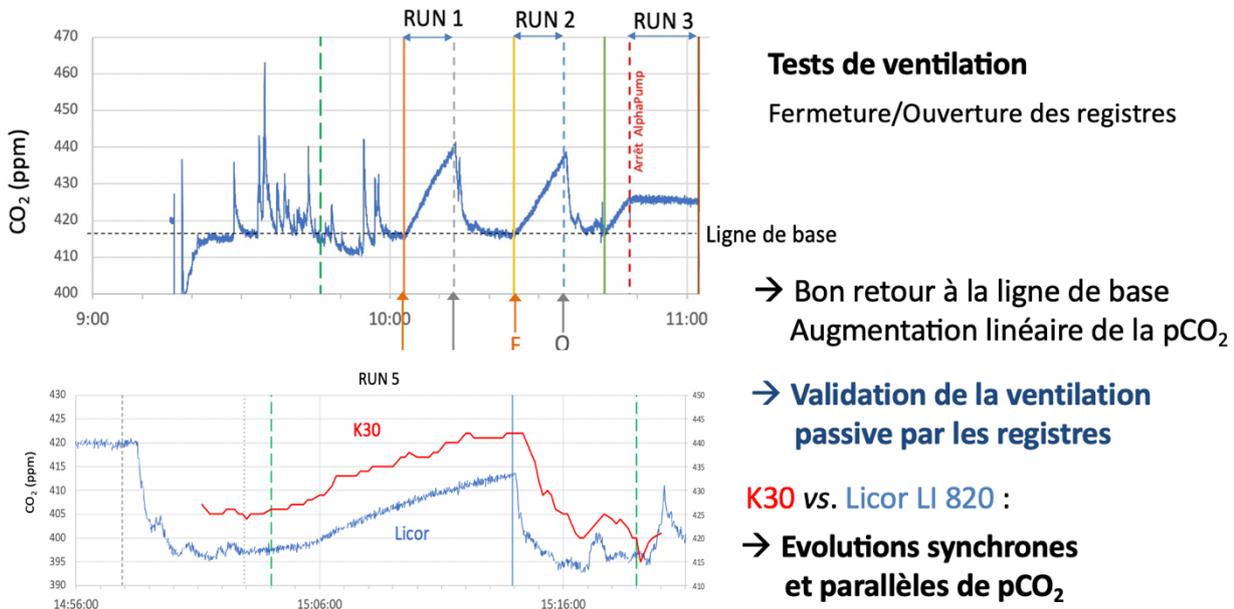


Fig. 2 : Exemples de cycles de fonctionnement de la chambre, alternant des phases d'env. 10 min où les registres sont fermés (« run ») et où la concentration en CO<sub>2</sub> augmente, et des phases où les registres sont ouverts, permettant le renouvellement passif de l'air de l'enceinte et où la teneur en CO<sub>2</sub> revient à la teneur atmosphérique.

Concernant le capteur low-cost K30, une réponse globalement proche de celle du capteur de référence LI820 a été obtenue sur la plupart des essais. Un exemple en est donné sur la fig. 2 (bas) ; bien que plus irrégulière que sur le capteur de référence LI820, l'évolution de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'enceinte est très proche de celle du LI 820. Sur une série de 4 runs, les flux déduits du K30 étaient ainsi de 92% de la réponse du LI 820.

Un essai complémentaire a consisté à tester l'étanchéité des registres en position fermée, simplement en soufflant sur le clapet ou les axes de rotation (Fig. 3). Cet essai a montré que les registres Yinsheng n'étaient malheureusement pas suffisamment étanches, et que d'autres modèles devraient être testés.



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)			
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022	<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023	

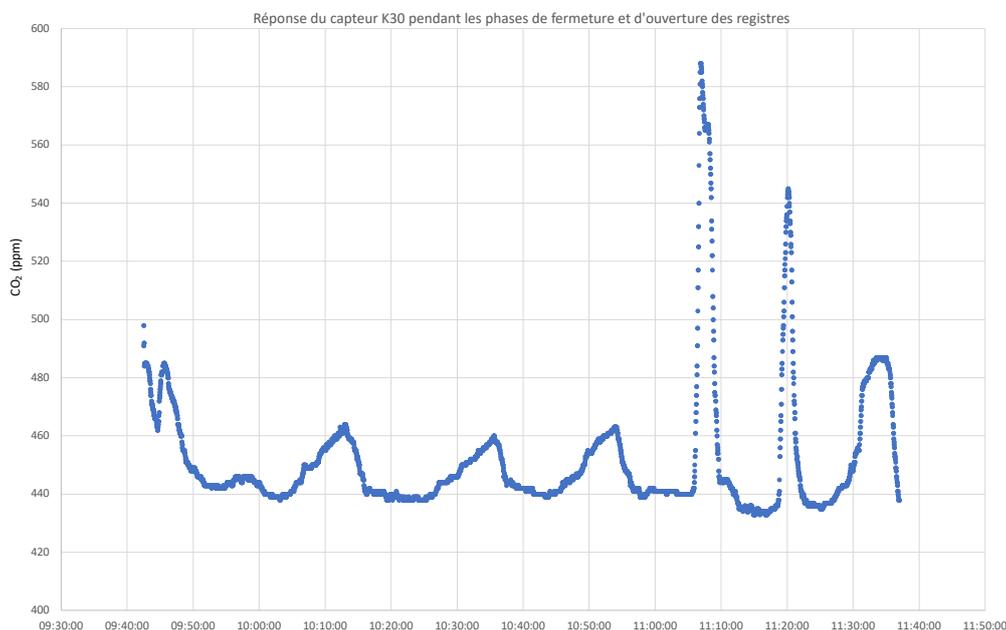


Fig. 3 : Essais du 15/10/21 donnant la réponse du capteur K30 : de 10:00 à 11:00 : fonctionnement standard (phases de fermeture suivies de phases d'ouverture des registres (triplicat). Données après 11:00 : fonctionnement perturbé en soufflant sur les registres (apport de CO<sub>2</sub>).

## Phase 2 (2022) : Conception et validation d'un prototype « complet » (V2)

Suite aux essais réalisés sur la V1 du prototype, il a été décidé de changer les registres par des modèles en PVC de la marque Belimo, à la fois plus simple à intégrer au montage par collage, et supposés plus étanches que les précédents car plus rigides et avec un joint de meilleure qualité. Les inconvénients sont par contre un prix plus élevé (250 € vs. 30 €) et une tension d'alimentation de 24 V contre 12 V pour le modèle Yinsheng.

L'enceinte a été remplacée par un modèle plus grand (diam. 50 cm à la base contre 43 cm pour le précédent) de façon à pouvoir accueillir le boîtier des composants électroniques et les batteries du montage (2 x Batteries Yucel 12V 12Ah C20 151x98x95 mm 3,8 kg). Le capteur à CO<sub>2</sub> K30 a été remplacé par un modèle K33 Senseair donnant en plus la température et l'humidité de l'air, et un capteur à CH<sub>4</sub> (Figaro NGM2611-E13) a été intégré au montage (Arduino UNO Rév. 3, Data Logger Shield compatible avec Arduino et carte SD SDHC 16 Go). Enfin un panneau solaire de 55 W Uniteck et un contrôleur de charge Steca PR 1010 sont placés sur le haut de la chambre. Un flotteur de plus grande surface a également été utilisé pour garantir une plus grande stabilité de la chambre sur un plan d'eau naturel potentiellement soumis au clapot voire aux vagues. Cette version 2 est montrée dans la figure 4.

Ce prototype V2 a été conçu et fabriqué à la DT INSU de Plouzané, puis expédié à Thonon où il a été testé en milieu artificiel au cours d'une mission réalisée par Paul Dasi à l'UMR CARTELL du 28 au 30 nov. 2022. Nous avons comme lors des premiers essais de la V1 utilisé un grand bac d'eau, contenant ici 2,2 m<sup>3</sup> d'eau du Léman pompée à 51 m de profondeur et dopée comme précédemment par NaHCO<sub>3</sub> et HCl (pH abaissé à 7,06). En parallèle du fonctionnement du prototype V2 a été déployé le modèle de chambre flottante manuelle connecté à un LI 820 et capteur à CH<sub>4</sub> Panterra Neodym (Fig. 4) ; la circulation en boucle de l'air entre la chambre et ces capteurs est assurée par une pompe étanche aux gaz Alphapump. Cette chambre sert de référence par rapport au prototype V2.



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)		
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023
			<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>

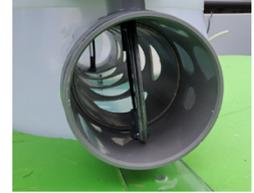


### Nouvelle enceinte

Gilac PE blanc 55 L (h 33 Ø40-50 cm)  
 $V = \sim 36 \text{ L}$   $S = 0,172 \text{ m}^2$   $V/S = 0,209$

### Nouveaux registres + servomoteurs

Belimo PVC 24 V (250 €)  
 (+ rigide, collable...)



### Capteur K33 Senseair 139 € TH Ind.

CO<sub>2</sub> 0-5000 ppm + T(°C) + RH(%)

### Flotteur changé

Plus grand, plus stable

### Panneau solaire

55 W (50 x 50 cm)

Fig. 4 : Prototype V2 de CFA, avec son grand flotteur vert, comparé à un modèle de chambre flottante manuelle (connectée à un LI 820), fonctionnant tous les deux en parallèle sur un bac de 2,2 m<sup>3</sup> (UMR CARRTEL).

Contrairement aux essais de la V1 en 2021, les phases d'ouverture (4 min.) et fermeture (10 à 15 min.) des registres étaient complètement automatisées sur la V2 (programmation sur Arduino, via des relais actionnant les registres). Cette programmation permet ainsi de déterminer 4 valeurs de flux par heure. Un exemple de réponse est donné fig. 5.

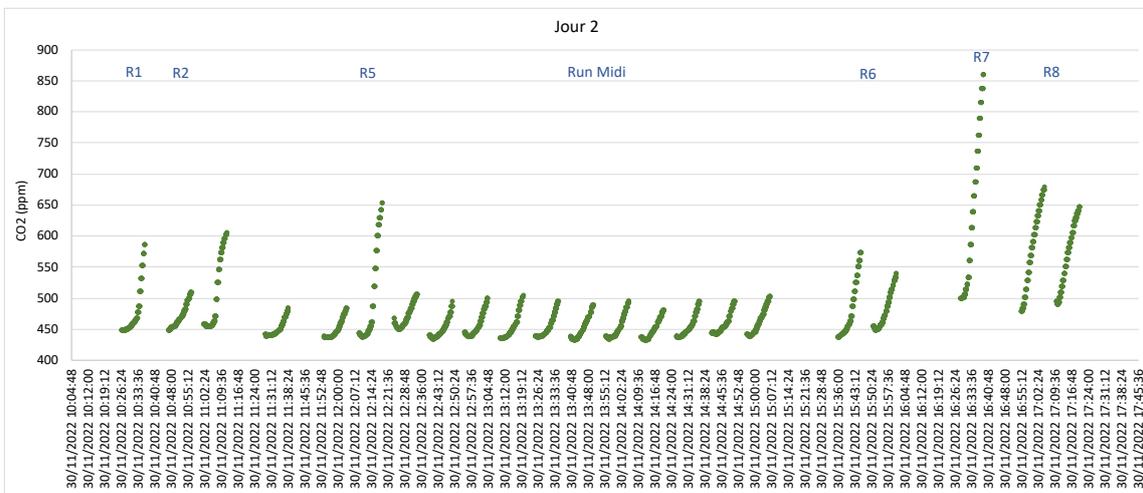


Fig. 5 : Réponse du capteur K33 lors d'une succession de phases de fermeture et ouverture des registres.

En comparant les réponses des capteurs K33 et LI 820, montés respectivement sur le prototype CFA V2 et sur la chambre flottante manuelle, on constate une relativement bonne cohérence des données (Fig. 6). La transformation en flux de CO<sub>2</sub> est donnée sur la figure 7 : les valeurs sont du même ordre de grandeur entre les 2 dispositifs, et se rapprochent encore si l'on considère le dernier tronçon de la réponse des capteurs (parties linéaires entourées d'un ovale rouge dans la figure 6).

On remarque toutefois un temps de latence relativement long (2 à 4 min.) sur la fig. 6 à gauche (CFA V2), quasiment absent sur la réponse de la chambre manuelle. Suite à ces essais du 29/11/22, il a été rajouté le lendemain un petit ventilateur à l'intérieur de la CFA V2 afin de brasser l'air de l'enceinte et de l'homogénéiser. Ces essais étant concluants (cf. fig. 5) le ventilateur a été installé ensuite à demeure dans la chambre, à côté des capteurs.



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)		
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023
			<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>

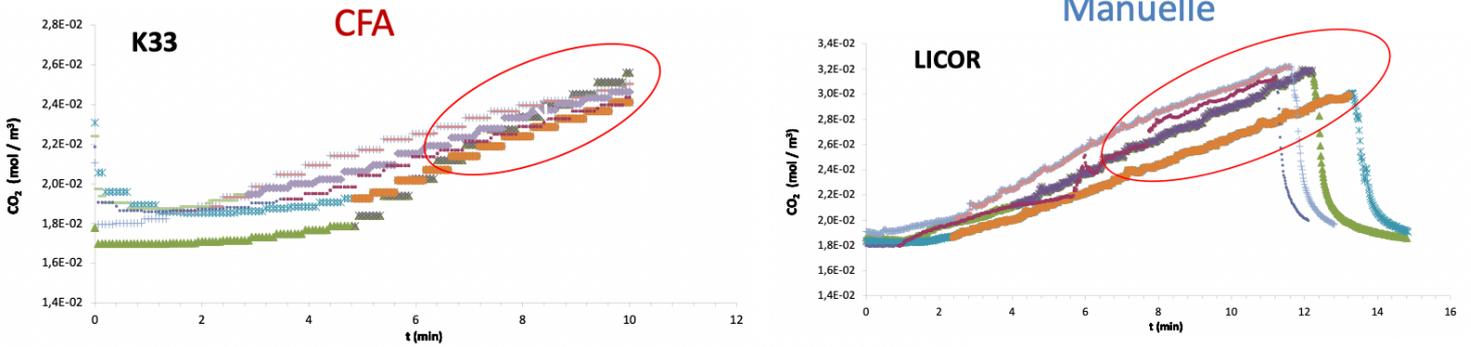


Fig. 6 : Réponses comparée des capteurs K33 (sur prototype V2 de CFA) et LI 820 (sur chambre manuelle).

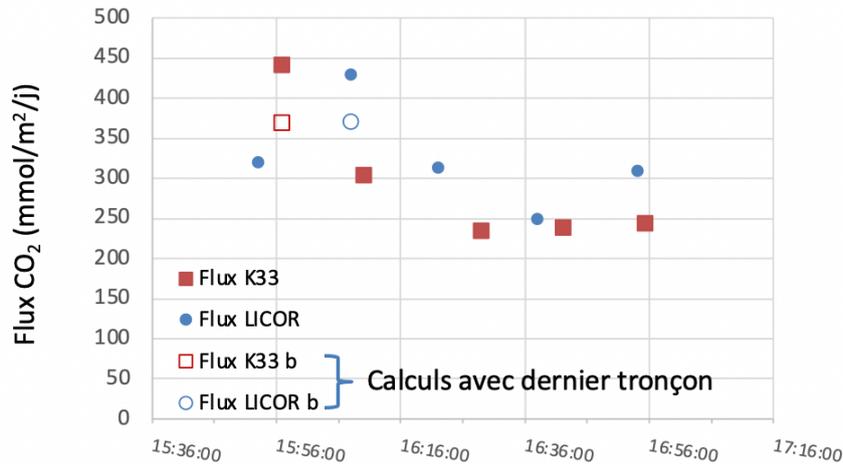


Fig. 7 : Flux de CO<sub>2</sub> calculés pour les deux chambres flottantes (CFA V2 et manuelle).

### Phase 3 (2023) : Tests et utilisation du prototype CFA V2 en conditions réelles

Suite aux essais en bac, le prototype a été légèrement modifié (ajout de stabilisateurs latéraux) afin de l'utiliser sur un lac naturel (lac de Chavoley, Ceyzérieu, Ain). Le premier déploiement a été effectué le 15/06/2023, puis tous les mois, le plus récent étant le 24/01/2024. A chacune de ces campagnes ponctuelles, la CFA V2 était déployée pendant 5 à 6 h sur une ou deux stations de la zone profonde (Fig. 8). Les conditions météo ont été variables sur cette période, allant de temps calmes et ensoleillés à des temps agités et pluvieux, des temps chauds ou froids. Par ailleurs des essais complémentaires ont été réalisés sur une plus longue période (3 et 4 j) dans le port du laboratoire, et qui ont permis de valider l'autonomie électrique des batteries avec recharge par panneau solaire dans la journée.

Au cours du 1<sup>er</sup> déploiement en lac (15/06/2023), l'option avec ou sans ventilateur interne brassant l'air de l'enceinte a de nouveau été testée, ce qui a permis d'écarter définitivement le mode de fonctionnement sans ventilateur.

Un exemple de réponse considérée comme satisfaisante est montré dans la figure 9 (19/12/2023) : alternance de phases croissantes de la teneur en CO<sub>2</sub>, quasi linéaire, pendant la fermeture des registres (durée 15 min.), suivies d'un retour à la ligne de base peu après l'ouverture des registres (durée 4 min.). On notera également sur cet exemple que l'humidité relative dans l'enceinte est le plus souvent située vers 85%, avec une baisse lorsque les registres sont



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)			
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022	<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023	

ouverts. Ce fonctionnement type a été obtenu en journée lorsque les conditions météo étaient ensoleillées ou avec ciel couvert mais sans pluie.



Fig. 8 : Prototype CFA V2 sur le lac de Chavoley (Ain), station centrale, en août 2023.

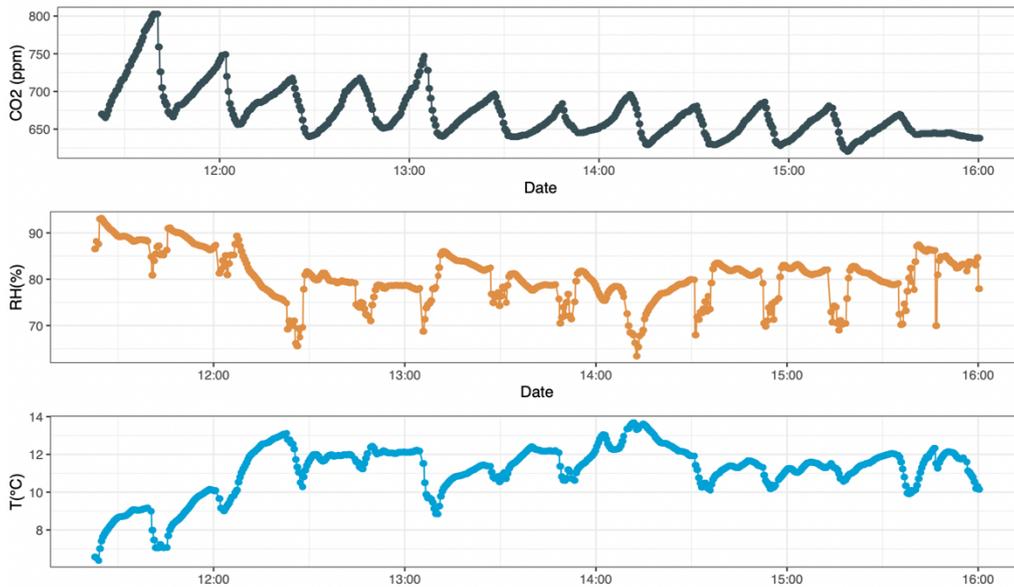


Figure 9 : Évolution de la teneur en CO<sub>2</sub> (capteur K33) dans la CFA V2, humidité relative et température de l'air de la chambre (19/12/2023).

Par contre, lorsque l'humidité relative était très élevée dans l'enceinte, la réponse du capteur n'était pas toujours conforme au schéma standard : augmentation du CO<sub>2</sub> moins visible et/ou non linéaire, mauvais ou absence de retour à la ligne de base. Dans ces conditions de forte humidité (observées en fin de journée, la nuit ou par temps de pluie), le taux d'humidité dans l'enceinte dépasse 95% et peut atteindre la condensation. Or le capteur K33 est donné pour fonctionner jusqu'à 95%RH maximum et en conditions non condensantes, ce qui représente une limite sérieuse du montage dans sa conception actuelle.

Il est à préciser que le montage des capteurs connectés à la chambre flottante manuelle intègre une cartouche dessiccante (Silicagel), ce qui permet de s'affranchir du problème d'humidité trop forte. Ce dispositif n'est pas pour le moment intégré à la CFA en raison de la saturation rapide de ce type de cartouche d'une part, et de la façon dont sont disposés les capteurs d'autre part (directement dans la chambre). Pour pallier à ces problèmes de forte humidité, les capteurs devraient probablement être inclus dans une boucle de circulation d'air (et donc avec utilisation d'une



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)			
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022	<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023	

pompe, ce qui entrainera un surcroît de consommation électrique) et qui intégrerait un système dessiccant (Silicagel, Drierite...), avec une limite d'efficacité liée à la quantité de produit dessiccant mise en œuvre, au taux d'humidité de l'air (souvent très élevé dans l'enceinte par nature puisque située juste au-dessus de l'eau) et au débit d'air circulant. En raison de ces difficultés, la CFA n'a pour le moment pas été utilisée en continu en conditions réelles sur le lac (excepté les essais dans le port du laboratoire, sur deux périodes de 3-4 jours, qui ont précisément montré les limites du prototype).

### Comparaison des flux obtenus avec la CFA V2 vs. chambre flottante manuelle.

La comparaison des flux de CO<sub>2</sub> est possible sur 7 des 8 campagnes réalisées entre juin 2023 et janvier 2024 et pendant lesquelles les deux types de chambres ont été utilisés en parallèle. Au cours de cette période, les flux d'émission de CO<sub>2</sub> ont présenté des valeurs très contrastées, comprises entre 5,5 et 77,9 mmol m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup> (sep. et nov. 2023 resp. ; valeurs tirées du montage de référence). La figure 10 est une corrélation entre les flux obtenus entre les deux types de chambre. Chaque point correspond à une moyenne de 3 ou 4 déploiements pour la chambre manuelle (sauf en nov. 2023, un seul déploiement utilisable sur la station centrale) et 3 à 6 cycles pour la CFA, pris simultanément sur la même station (station centrale du lac, sauf pour juin 2023 où la CFA était déployée sur une autre station mais très proche néanmoins de la station centrale). Les résultats montrent une bonne corrélation entre les 2 montages ( $R^2 = 0,934$ ), et une pente de 0,98 soit très proche de 1. Les flux obtenus par la CFA peuvent donc être considérés comme tout à fait représentatifs des flux d'émission de CO<sub>2</sub> par rapport au montage de référence.

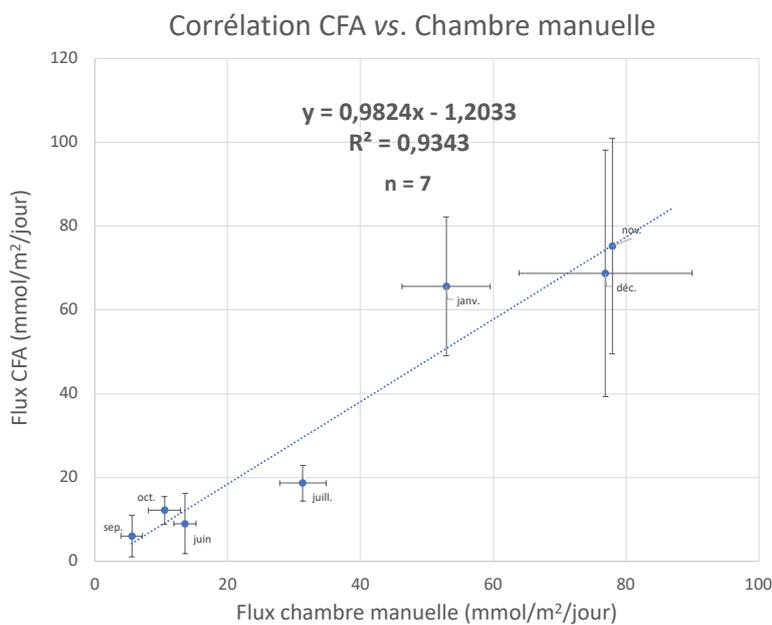


Figure 10 : Flux de CO<sub>2</sub> comparés entre la chambre flottante automatique et la chambre manuelle, obtenus lors des différentes campagnes sur le lac de Chavoley (Ain).

L'avantage principal de la chambre automatique est la possibilité de réaliser un suivi en continu, effectué dans ces essais sur plusieurs heures (3h46 à 7h52). Ceci est illustré dans la figure 11 qui correspond au déploiement de la CFA sur la station centrale du lac de Chavoley le 24/01/2024 pendant 3h46. Les données de flux tirés de la chambre manuelle sont représentées également (3 déploiements). On remarque que, si les flux sont bien du même ordre de grandeur (*cf.* aussi fig. 10 pour la moyenne des 3 déploiements) et présentent la même tendance (baisse pendant cette heure de déploiement) entre les deux dispositifs, le flux de CO<sub>2</sub> évolue très significativement entre le début et la fin de l'utilisation de la CFA. Ceci démontre clairement la nécessité de réaliser un suivi temporel des émissions de CO<sub>2</sub>



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)			
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022	<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023	

pour en tirer une valeur représentative du milieu, et que des mesures en nombre limité ne conduisent pas à une estimation robuste des flux.

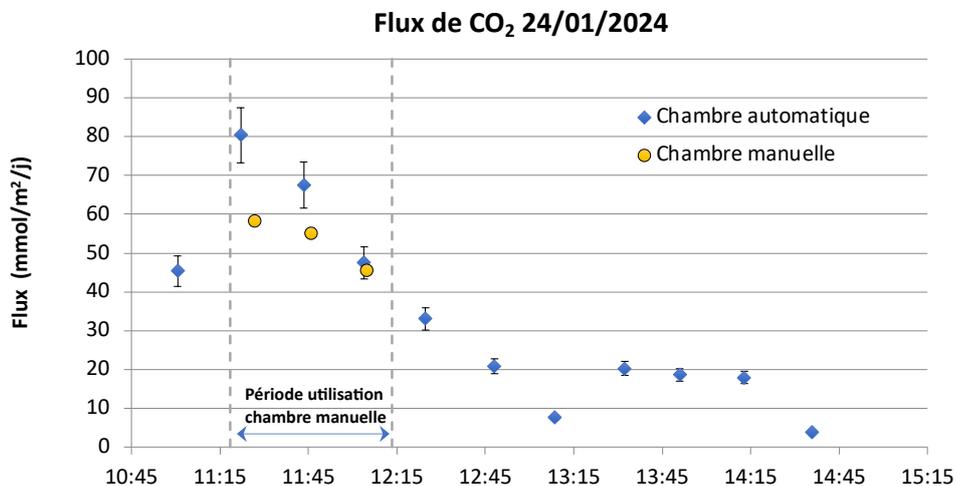


Figure 11 : Flux de CO<sub>2</sub> sur la station centrale du lac de Chavoley le 24/01/2024, par chambre flottante automatique (CFA) et par chambre manuelle.

L'objectif de valider le niveau **TRL7** d'une enceinte en environnement opérationnel (lacs) en 2023 est partiellement atteint : bon fonctionnement en journée, mais limitation par temps très humide ou en conditions condensantes (nuit).



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)			
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022	<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023	

### 3. Difficultés rencontrées lors du projet :

Au cours d'une des 8 campagnes (août 2023), le capteur à CO<sub>2</sub> K33 de la CFA a présenté un fonctionnement atypique (fig. 11) et il n'a pas été possible d'en extraire un flux. Lors de cette journée, le signal augmentait fortement dès que les registres se refermaient (repéré par la remontée rapide de l'humidité jusqu'à env. 97% ou par la remontée de température), puis rediminuaient plus ou moins rapidement alors que l'enceinte était close. Les flux tirés de la chambre de référence étaient de  $14,2 \pm 2,3$  mmol m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup> (n = 3 déploiements) et auraient donc dû être parfaitement quantifiés par la CFA. Le signal de méthane évoluait quant à lui d'une façon cohérente (phase d'augmentation à la fermeture des registres suivie d'un retour vers la ligne de base à l'ouverture). Sur certains cycles comme celui situé peu après 14:00 (fig. 11 en bas), une brusque augmentation du signal trace l'arrivée d'une bulle de CH<sub>4</sub> dans l'enceinte, phénomène classique pour ce gaz et qui correspond au processus d'émission ébullitif, plus particulièrement observé à certaines périodes de l'année. Le fonctionnement global de la CFA V2 n'est donc pas en cause, mais le capteur à CO<sub>2</sub> K33 a présenté à ce moment une défaillance, peut-être lié à une humidité excessive.

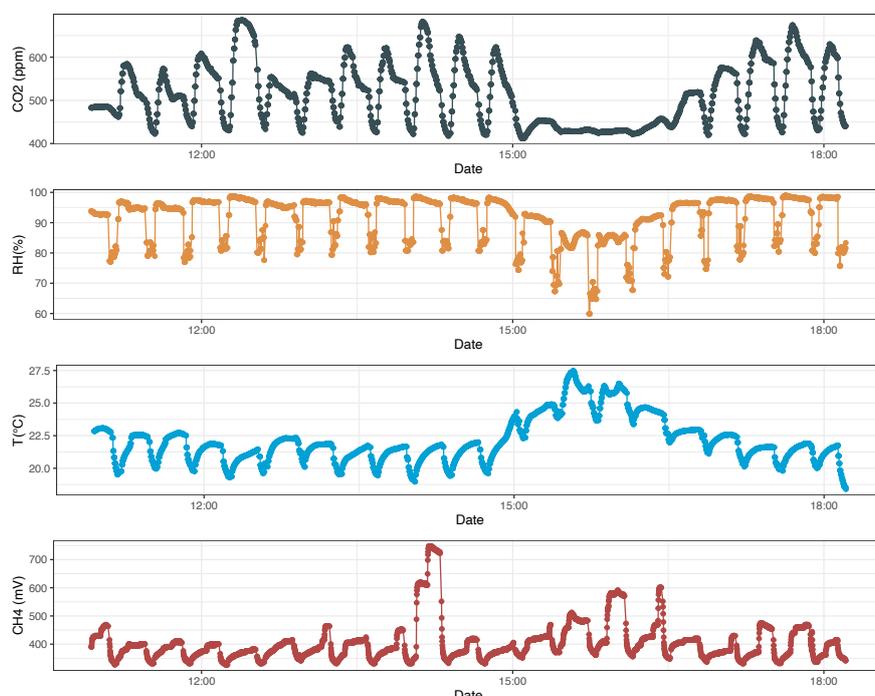


Figure 11 : Valeurs des capteurs CO<sub>2</sub>, humidité, température et CH<sub>4</sub> obtenus en août 2023, lac de Chavoley, station centrale.

Cependant ce même capteur a donné des résultats satisfaisant en novembre 2023 (cf. point correspondant sur la Fig. 10) alors que l'humidité était à 100% en permanence (même lors de l'ouverture des registres car il pleuvait abondamment ce jour-là ; la température dans l'enceinte oscillait entre 5,5 et 7,75°C ; résultats non montrés). Un fort taux d'humidité à lui seul ne semble pas toujours la seule raison pour expliquer le dysfonctionnement observé en août 2023. Mais ce paramètre est néanmoins critique comme l'ont montré des essais réalisés dans le port du laboratoire, en fin de journée et la nuit (résultats non montrés).

A ce stade et comme indiqué plus haut, un dispositif permettant de limiter l'humidité sur les capteurs n'a pas encore été implémenté sur la CFA, en raison d'une autonomie jugée insuffisante par rapport à l'objectif initial (fonctionnement en autonomie pendant plusieurs semaines voire plusieurs mois). Une autre piste serait le doublement du capteur à CO<sub>2</sub>, de façon à limiter les dysfonctionnements comme ceux observés en août 2023 (Fig. 11).



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)			
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022	<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023	

#### 4. Eco-responsabilité :

Cette estimation n'a pas encore été réalisée.

#### 5. Transversalité du projet :

- Intérêt de la mise à disposition de crédits entre trois projets de maturité différente
- Réflexion intra DT permettant de valider des choix techniques (01/03/2021)
- Myriade, Caspa-Pico et MAE : 3 projets de développement instrumental à base d'éléments du commerce facilement reproductibles par une communauté.
- Code Arduino ouvert

#### 6. Valorisation du projet :

##### Selon succès du prototype V2 :

- Industriel/PME à contacter (1<sup>ers</sup> contacts pris avec SYERA dès 2020)
- Envoi d'une annonce à des scientifiques potentiellement intéressés, et sur les réseaux (ex. réseaux de métiers orientés capteurs et mesures *in situ*, plateformes instrumentales)
- Site web ?
  - Participation à des colloques/workshop  
Atelier Expérimentation et Instrumentation (AEI)  
28/06 au 01/07 2022 - Montpellier

#### 7. Perspectives :

##### Perspectives :

- Doublage du capteur low-cost K33 (afin d'éliminer d'éventuels artéfacts liés à l'utilisation d'un unique capteur)
- Essais de plus longue durée (> 7 j)
- Étalonnage au capteur CH<sub>4</sub> Figaro
- Réalisation d'une première série (n≈10) par une PME
- Création d'un réseau d'utilisateurs potentiels  
dont projet avec PLANAQUA / CEREEP (16 macrocosmes 750 m<sup>3</sup>)
- Traitement automatisé des données de flux – Stockage / partage des données
- Télétransmission des données

#### 8. Mise à disposition des résultats du projet :

Contactez les porteurs du projet par mail ([jezequel@ipgp.fr](mailto:jezequel@ipgp.fr) et [viet.tran-khac@inrae.fr](mailto:viet.tran-khac@inrae.fr)).



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)		
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023
			<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>

## Références :

Cole J.J., Y. T. Prairie, N. F. Caraco, W. H. McDowell, L. J. Tranvik, R. G. Striegl, C. M. Duarte, P. Kortelainen, J. A. Downing, J. J. Middelburg, and J. Melack (2007). "Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget." *Ecosystems* 10 171–184

Duc, N. T., S. Silverstein, L. Lundmark, H. Reyier, P. Crill and D. Bastviken (2013). "Automated Flux Chamber for Investigating Gas Flux at Water–Air Interfaces." *Environmental Science & Technology* 47(2): 968-975.

Duc, N. T., S. Silverstein, M. Wik, P. Crill, D. Bastviken and R. K. Varner (2019). "Greenhouse gas flux studies: An automated online system for gas emission measurements in aquatic environments." *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/hess-2019-83>

Lambert, M. and J.-L. Fréchette (2005). Analytical techniques for measuring fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from hydroelectric reservoirs and natural water bodies. *Greenhouse Gas Emissions—Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments*, Environ. Sci. Ser. A. Tremblay, L. Varfalvy, C. Roehm and M. Garneau (Eds). Berlin, Springer.

Martinsen K. T., Kragh T., and Sand-Jensen K. (2018). "Technical note: A simple and cost-efficient automated floating chamber for continuous measurements of carbon dioxide gas flux on lakes." *Biogeosciences*, 15, 5565–5573, 2018

McGinnis, D. F., G. Kirillin, K. W. Tang, S. Flury, P. Bodmer, C. Engelhardt, P. Casper and H.-P. Grossart (2015). "Enhancing Surface Methane Fluxes from an Oligotrophic Lake: Exploring the Microbubble Hypothesis." *Environmental Science & Technology* 49(2): 873-880

Tranvik, L. J, John A. Downing, James B. Cotner, Steven A. Loiselle, Robert G. Striegl, Thomas J. Ballatore, Peter Dillon, Kerri Finlay, Kenneth Fortino, Lesley B. Knoll, Pirkko L. Kortelainen, Tiit Kutser, Soren Larsen, Isabelle Laurion, Dina M. Leech, S. Leigh McCallister, Diane M. McKnight, John M. Melack, Erin Overholt, Jason A. Porter, Yves Prairie, William H. Renwick, Fabio Roland, Bradford S. Sherman, David W. Schindler, Sebastian Sobek, Alain Tremblay, Michael J. Vanni, Antonie M. Verschoor, Eddie von Wachenfeldt, and Gesa A. Weyhenmeyer (2009). « Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate." *Limnol. Oceanogr.* 54 (6, part 2), 2298–2314



<b>Titre et acronyme du projet :</b>	Détermination des flux de GES par une « myriade » de chambres flottantes automatiques (MYRIADE)		
<b>Référence :</b>	DIIRO-0x	<b>Période :</b>	2021-2022
<b>Date de début :</b>	02/2021	<b>Date de fin :</b>	06/2023
			<b>Version</b> <b>DIIRO/CSIIT</b>

- (1) Donner les prénoms et noms des porteurs, leur grade, leur laboratoire, leur adresse email.
- (2) Donner l'acronyme du partenaire/service impliqué.
- (3) Donner l'institut principal d'appartenance, puis secondaire(s).
- (4) Sommer l'implication totale du personnel par partenaire impliqué dans le projet, à exprimer en **Homme.mois**.
- (5) Donner le prénom, le nom et email d'un contact dans le laboratoire ayant participé au projet.
- (6) Lister les expertises apportées par le partenaire pour le projet.
- (7) Lister les (co-)financeurs du projet (Institut, programme national...).
- (8) Donner le financement obtenu par financeur pour la réalisation du projet, à exprime en k€.
- (9) Préciser les domaines thématiques INSU associés au projet (choix multiple possible).
- (10) Préciser le(s) domaine(s) thématique (s) autre(s).
- (11) Donner les mots clés thématiques et technologiques en lien avec le projet.
- (12) Merci de préciser les niveaux de maturité technologique (Technology Readiness Level TRL) en début et fin de projet selon le tableau suivant (d'après L'échelle TRL – CEA, Les défis du CEA, N°188, Avril 2014).

Niveau	Définition
9	Validation du système dans un environnement réel
8	Qualification du système complet dans un environnement opérationnel
7	Démonstration dans un environnement opérationnel
6	Démonstration dans un environnement réel simulé
5	Validation de la technologie en environnement représentatif
4	Validation des fonctions clés du concept en laboratoire
3	Preuve expérimentale du concept
2	Formulation du concept technologique
1	Observation du principe de base

- (13) Argumenter la montée en TRL et donner si possible les métriques qui ont permis de valider la montée en TRL.

#### Quelques informations :

- i) Merci de remplir les 8 sections du rapport de fin de projet (les indications surlignées peuvent être supprimées). Ce rapport sera étudié en détail par la CSIIT et la DIIRO. Des précisions tant sur les développements réalisés, les difficultés rencontrés, les protocoles d'étalonnage, ou encore sur l'auto-évaluation en montée de TRL pourront être demandées si nécessaire.
- ii) Le nombre de pages est indicatif, merci d'essayer de suivre le gabarit proposé. Toutefois des annexes peuvent être ajoutées si elles vous paraissent importantes. Des compléments pourront vous être demandés par la CSIIT ou la DIIRO qui pourront si nécessaire être annexés au rapport.
- iii) Le rapport sera à fournir au format *pdf* en déposant sur un serveur de fichiers et dont le lien est à fournir au bureau de la CSIIT ([insu.bureau-csiit@cnrs.fr](mailto:insu.bureau-csiit@cnrs.fr)) le 1<sup>er</sup> février 2024 au plus tard.
- iv) Une fois le contenu du rapport validé par la CSIIT et la DIIRO, une version moins détaillée du rapport vous sera demandée pour une mise à disposition à la communauté (open access).