



Institut de Physique du Globe de Paris
1 rue Jussieu
75005 Paris
France

Rapport d'activité PHRESQUES, IPGP, Années 2016-2018

Actions Renforcement IV.2.1 et Innovation VI.3.2

Auteurs : Arnaud Blanchouin, Alexis Groleau, Didier Jézéquel

Équipe Biogéochimie Environnementale. Institut de Physique du Globe de Paris.1
rue Jussieu, 75005 Paris, France.

Sommaire

I.	Actions et objectifs.....	2
II.	Renforcement IV.2.1 : Installation d'une nouvelle station de mesure à l'interface amont-estuaire.....	2
II. a.	Actions menées.....	3
II. a. 1.	Etude de marché	3
II. a. 2.	Localisation du site d'implantation	3
II. a. 3.	Appel d'offre	4
II. b.	Difficultés rencontrées et solutions.....	5
III.	Innovation VI.3.2.a : Test du capteur pCO ₂ dissous	7
III. a.	Effet du changement de la membrane semi-perméable.....	8
III. b.	Effet du milieu d'étalonnage	10
III. c.	Linéarité de l'étalonnage	11
III. d.	Dérive de la mesure	12
III. e.	Mesures comparatives de terrain	13
III. f.	Recommandations et conclusions.....	15

I. Actions et objectifs

Le projet PHRESQUES est un projet découpé en deux phases (2016-2018 et 2018-2020), qui s'articule autour de quatre grandes actions (harmonisation, renforcement, innovation et coordination) ; deux actions menées au sein de l'IPGP seront traitées dans ce rapport :

- Le renforcement du réseau existant des partenaires du projet, par l'installation d'une nouvelle station de mesure située à l'amont du barrage d'Amfreville sous les monts (dit barrage de Poses). Ce renforcement vise à comprendre l'influence à plus large échelle de l'agglomération parisienne sur l'écosystème Seine et à fournir les flux de matières entrants dans la zone estuarienne.
- La mise en place de capteurs innovants et le test de nouvelles technologies de capteurs permettant le suivi de nouveaux paramètres, notamment le suivi du cycle du carbone en continu via la mesure de la pression partielle de CO₂.

II. Renforcement IV.2.1 : Installation d'une nouvelle station de mesure à l'interface amont-estuaire

Cette tâche supervisée par l'IPGP est menée en partenariat avec le reste de l'équipe projet : GIP Seine-Aval, Piren-Seine, le M2C, l'Ifremer et l'UMR BOREA. Elle a pour objectif d'installer une nouvelle station de mesures en continu, dans le secteur Vernon-Poses. Cette station sera représentative de la Seine dans son domaine continental, géographiquement placée à l'interface amont-estuaire.

Cette partie du rapport décrit l'ensemble des tâches menées ainsi que les difficultés rencontrées. Les livrables de cette action sont le cahier des clauses techniques particulières (CCTP) visant à la mise en place de la station de mesure et le repérage des sites d'installations possibles.

II. a. Actions menées

II. a. 1. Etude de marché

Une étude de marché a été réalisée dans le but de mettre à jour les devis de l'ensemble des capteurs afin de réévaluer le coût des moyens de mesure.

Ces devis sont transmis en annexe de ce document.

Le chiffrage de l'infrastructure d'accueil est plus difficile à évaluer. Il dépendra du site d'installation, de sa configuration et des contraintes environnementales locales.

II. a. 2. Localisation du site d'implantation

La localisation du site d'implantation de la station dépend de critères techniques, scientifiques, administratifs et fonciers. Ainsi, le site d'implantation sera localisé en respectant les critères ci dessous:

- En berge,
- Sur un tronçon de rivière complet, ne comportant ni bras, ni île,
- Sur un tronçon ne comportant pas de perturbations autre que la circulation fluviale (pas de base de loisirs, pas de port de plaisance, pas d'activités nautiques etc.),
- Sur le domaine public,
- Près d'une source de courant électrique,
- Accès facile et pratique (notamment pour la mise en place de l'infrastructure),
- Localisé en amont du barrage d'Amfreville sous les Monts (Poses) et en aval de Vernon.

Une visite de terrain a été organisée avec l'ensemble de l'équipe du projet (13/07/2017) dans le but de trouver la localisation correspondant aux critères cités précédemment. Un site a été identifié, la commune de Porte-Joie 27430 (aujourd'hui Porte de Seine).

Une rencontre avec les élus a été organisée dans le but de présenter le projet et d'établir un accord de principe quant à la future installation de la station de mesure.

Les communes de Porte-Joie et Tournedos-sur-Seine se sont regroupées en janvier 2018. Le nouvel élu de ce regroupement ne souhaite plus participer au projet. La prospection d'un nouveau site d'implantation a donc du être réalisée.

Cinq sites répartis sur trois communes ont été identifiés (cf. Annexe Sites d'implantation). Actuellement, un seul contact a pu être établi avec la Mairie de Vernon 27200 (Corinne LAZZARI, responsable du pôle administratif) où un site d'intérêt a été identifié (cf. Annexe Site d'implantation).

II. a. 3. Appel d'offre

Le cahier des clauses techniques pour la réalisation de la station a été rédigé par lot, en séparant la partie instrumentale, de la partie infrastructure. L'appel d'offre a été publié le 29 décembre 2017 sur le site de publication www.achatpublic.com.

Trois fournisseurs ont répondu à l'appel d'offres (Tableau 1).

Répondant	Lot(s) concerné(s)	Coût estimé (€ HT)
Nke	Totalité de l'appel d'offre	322 820
Xylem	Sonde multi-paramètres	15 178
	Sonde de mesure du COD	17 945
S::CAN	Sonde de mesure du COD	19 948

Tableau 1 Répondant à l'appel d'offre

Suite à l'étude des réponses fournies par les industriels, les partenaires PHRESQUES ont décidé de classer, en février 2018, l'appel d'offre infructueux pour cause de dépassement budgétaire. En effet, le budget alloué à cette tâche est de 160k€, or le répondant Nke estime le coût d'une telle installation à 322k€, soit plus du double du budget disponible. Ce sont lots 1 et 2 qui présentent un coût nettement supérieur au budget prévisionnel.

Un second CCTP a été rédigé, il constitue le livrable de cette tâche (Annexe CCTP PHRESQUES). Des ajouts devront être faits au moment de sa publication qui

concernent des parties qui ne peuvent être rédigées à ce jour (partie Planning, site d'installation).

II. b. Difficultés rencontrées et solutions

Un site d'implantation avait été localisé au sein de la commune de Porte-Joie (27430). Suite à l'appel d'offre, le coût d'aménagement du site s'avère être très supérieur au budget alloué, ce qui a bloqué le processus d'installation de la station pour cette phase 1. Par ailleurs, courant janvier 2018, les communes de Porte-Joie et Tournedos-sur-Seine ont fusionné pour donner la commune nouvelle Porte-de-Seine. Le nouvel élu de Porte-de-Seine ne souhaite plus être lié au projet, la localisation du site d'implantation n'est toujours pas établie.

Nous avons cherché au cours de cette phase 1 à prendre contact avec VNF pour bénéficier de leur expertise sur les questions techniques et administratives. En dépit de nos sollicitations, nous n'avons pas encore identifié un correspondant référent chez VNF.

Suite à l'appel d'offre, il s'est avéré que le budget initial pour la station de mesure ait été sous estimé. Deux facteurs sont ici identifiés :

1- le coût de l'infrastructure, telle qu'elle a été imaginée et proposée par l'unique répondant à l'appel d'offre, est élevé et dépasse nettement le budget. Cela se justifie par le contexte d'installation. Une installation en berge nécessite de déployer des moyens coûteux (barge, grue, marteau hydraulique pour le battage des pieux dans le lit de la rivière) afin que la station de mesure soit robuste et stable. La station sera soumise à des débits pouvant être important, mais aussi aux embâcles charriés par la Seine. Ces paramètres génèrent des coûts de conception et d'ingénierie important.

2- le coût d'un automate, concentrateur et émetteur de données, n'est pas négligeable. Le développement des protocoles de communication entre les capteurs et la centrale d'acquisition est coûteux au vu du nombre de capteurs prévus, de la quantité de données à enregistrer et à émettre pour cette station. La centrale d'acquisition COSTOF2, développée par Ifremer et distribuée par RTsys représenterait une solution avantageuse. L'un de ses intérêts est que les protocoles

de communications sont prévus pour être mutualisés, ce qui diminue les coûts de développement. Cette solution serait réellement avantageuse, si plusieurs stations au sein du projet PHRESQUES optaient pour cette centrale d'acquisition avec des capteurs identiques.

III. Innovation VI.3.2.a : Test du capteur pCO₂ dissous

La pression partielle de CO₂ est un paramètre clé pour mieux quantifier les flux exportés de carbone, et comprendre les processus à l'œuvre dans le système aquatique. Il n'existe à ce jour aucun retour d'expérience sur la pertinence de ce type de capteur pour réaliser un suivi en continu en milieu naturel. Cette action vise donc à tester un capteur de CO₂ dissous, dans le but d'évaluer sa performance en eau continentale.

La sonde Contros HydroC CO₂ acquise par la ZA Seine et l'IPGP a été utilisée et testée à partir d'avril 2016, dans différentes conditions au laboratoire et sur le terrain.

Le principe de fonctionnement de la sonde, ainsi que les protocoles d'étalonnage en phase gazeuse et aqueuse sont décrits dans le livrable VI.3.2.a d'avril 2017 (Fonctionnement nominal et procédure de contrôle de calibration des données de CO₂ et DOC en laboratoire selon différentes approches).

Quatre calibrations ont été réalisées au laboratoire en phase gazeuse et en phase aqueuse.

Ces étalonnages ont permis de tester la robustesse, la précision de l'appareil, mais aussi différents paramètres pouvant avoir un impact sur les valeurs mesurées :

- III.a. La membrane semi-perméable a-t-elle un impact sur la mesure ?
- III.b. Le milieu d'étalonnage (gazeux ou aqueux) a-t-il un impact sur la mesure ?
- III.c. L'étalonnage est-il linéaire sur toute la gamme de mesure ?
- III.d. L'étalonnage dérive-t-il avec le temps ?

Six mesures de terrain ont été réalisées entre 2017 et 2018 afin d'évaluer le fonctionnement du capteur en mode *in situ* (III.e.).

III. a. Effet du changement de la membrane semi-perméable

Durant les étalonnages, la membrane semi perméable permettant de réaliser l'équilibre entre la phase gazeuse contenue dans la sonde et la phase aqueuse (milieu aquatique naturel), a été changée à deux reprises, afin d'évaluer l'effet du changement de la membrane sur la réponse de la sonde.

La membrane a été changée entre les étalonnages du 12/10/2016 et 01/12/2016, puis entre les étalonnages du 13/04/2018 et 17/04/2018 (Figure 1 et Figure 2).

Le changement de la membrane a un effet quasiment nul sur les droites de corrélation avec des pentes similaires (avant et après changement de membrane dans les deux cas). L'erreur induite sur la $p\text{CO}_2$ est faible, de l'ordre de 5%, entre les valeurs mesurées avant et après changement de la membrane.

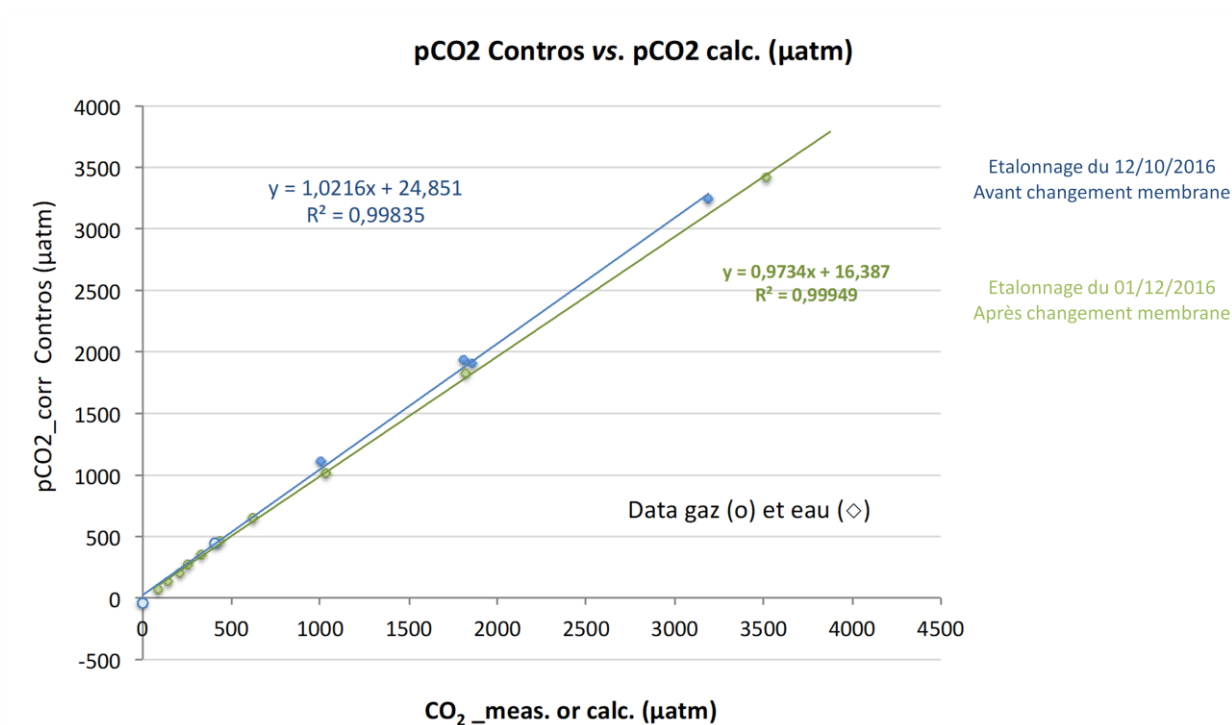


Figure 1 pCO₂ Contros en fonction de la pCO₂ calculée ou mesurée, avant ou après le changement de la membrane, étalonnages de 2016

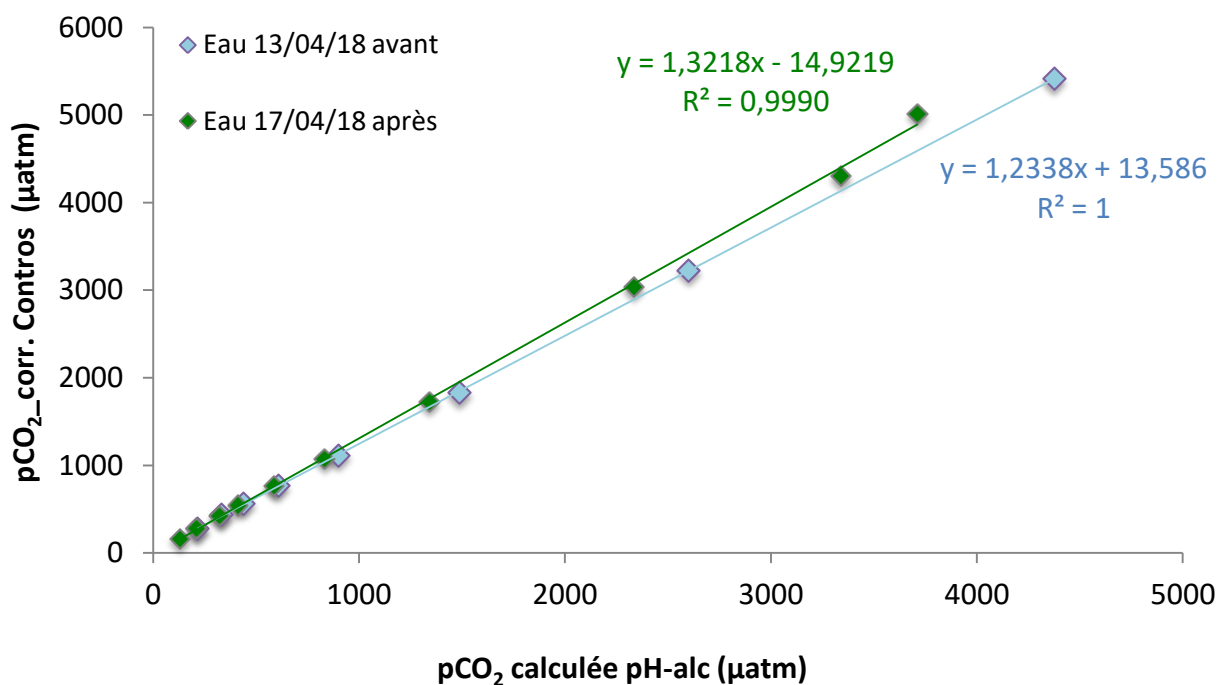


Figure 2 pCO₂ Contros en fonction de la pCO₂ calculée, avant ou après le changement de la membrane, étalonnages d'avril 2018

III. b. Effet du milieu d'étalonnage

L'étalonnage de la sonde est réalisé dans deux milieux, l'un aqueux (50 à 5000 μatm), l'autre gazeux (0 à 500 μatm). D'après la Figure 3, on constate que la corrélation entre la $p\text{CO}_2$ étalon et la $p\text{CO}_2$ du Contros est linéaire et correcte ($R^2 > 0.99$) lorsque l'on met en commun les étalonnages en phase gazeuse et ceux en phase aqueuse.

Dans cette gamme de concentration le milieu d'étalonnage n'a pas d'influence sur la calibration de la sonde.

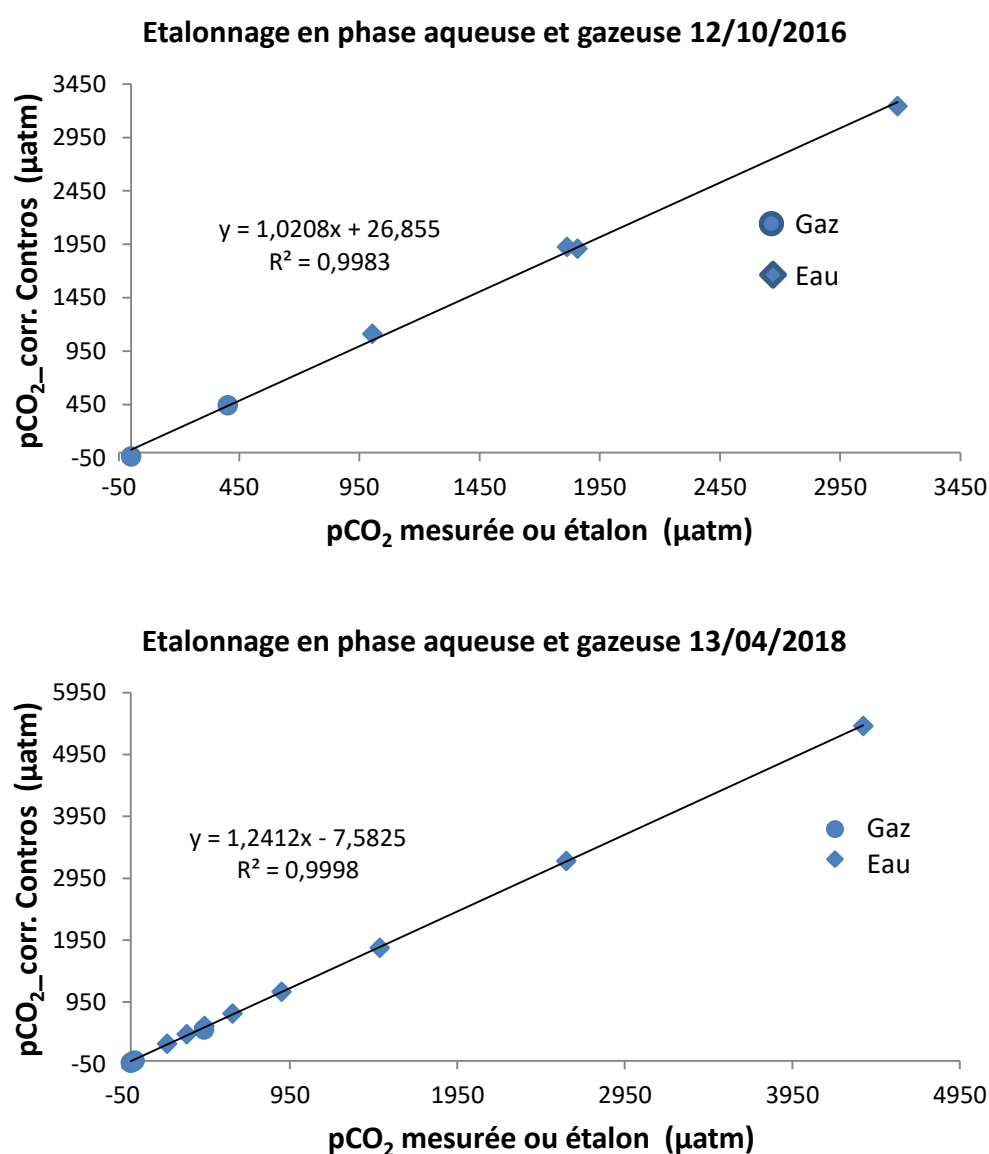


Figure 3 $p\text{CO}_2$ Contros en fonction de la $p\text{CO}_2$ calculée ou mesurée, corrélation linéaire sur les deux phases d'étalonnages, 2016 en haut, 2018 en bas

III. c. Linéarité de l'étalonnage

On évalue la linéarité du signal mesurée sur toute la gamme de mesure, entre 0 et 5000 μatm environ. On constate d'après la Figure 4, que la mesure du CO_2 dissous par la Contros est linéaire sur l'ensemble de la gamme.

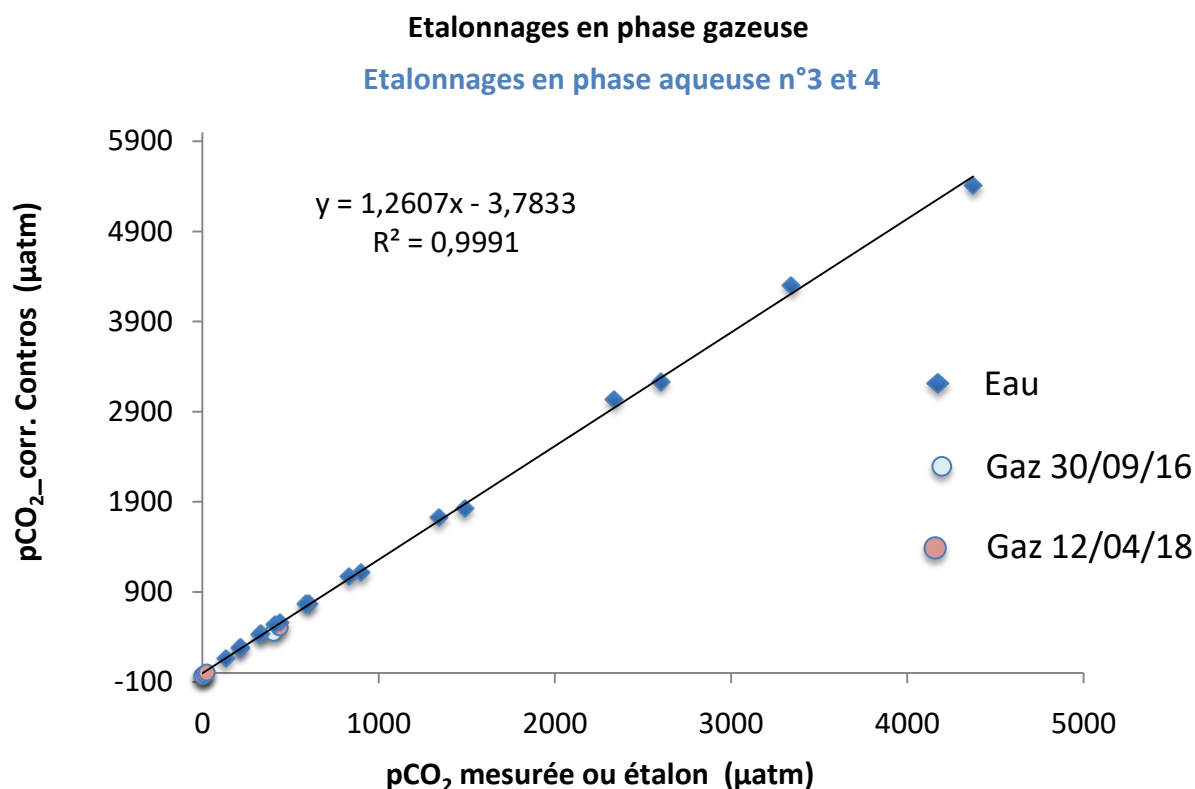


Figure 4 pCO₂ Contros en fonction de la pCO₂ calculée ou mesurée, évaluation de la linéarité du signal

Par contre, lorsque l'on travaille sur les faibles valeurs de pCO₂, on constate que la pente de la corrélation varie légèrement par rapport à celle réalisée sur toute la gamme (Figure 5).

Cette variation de corrélation entraîne une erreur de l'ordre de 4% par rapport à la corrélation effectuée sur l'ensemble de la gamme.

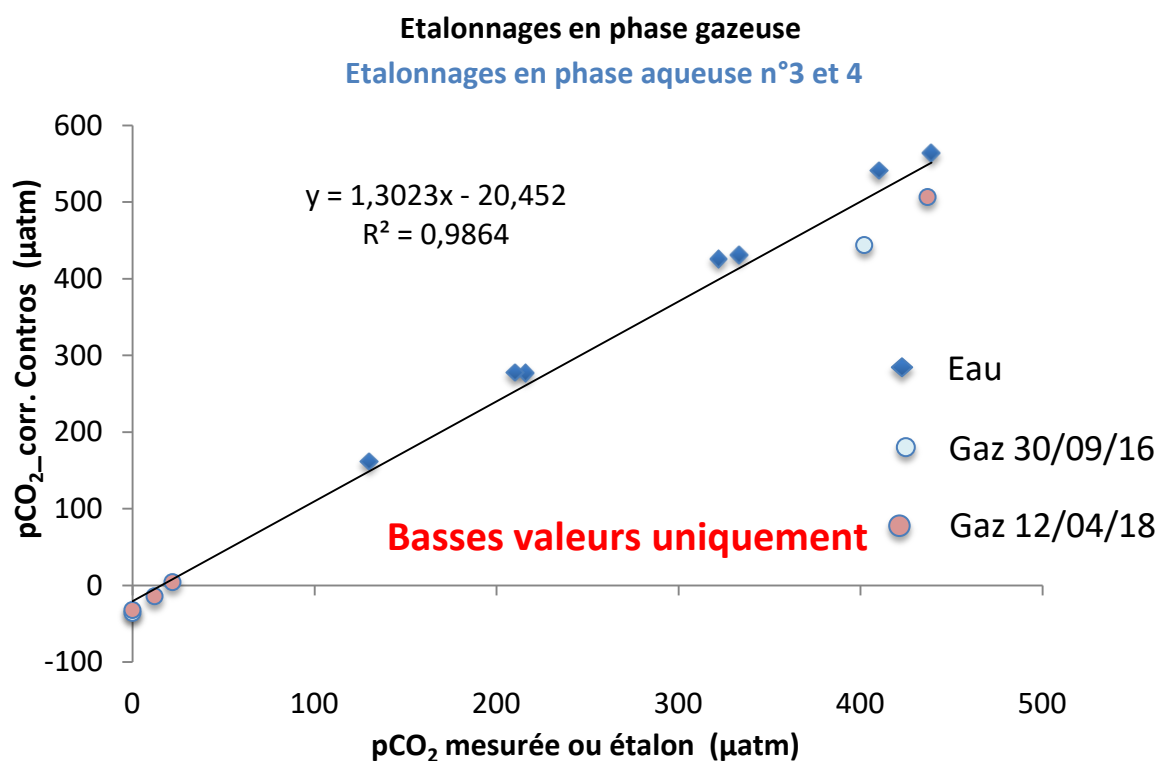


Figure 5 pCO₂ Contros en fonction de la pCO₂ calculée ou mesurée, corrélation sur les basses valeurs

III. d. Dérive de la mesure

Les quatre étalonnages ont été réalisés deux à deux. En 2016, les étalonnages ont été effectués à deux mois d'intervalle et en 2018 à quelques jours d'intervalle.

Lorsque les étalonnages sont rapprochés (quelques jours à 2 mois), leurs réponses sont relativement proches avec des pentes et des ordonnées à l'origine comparable.

Par contre, lorsque les étalonnages sont espacés dans le temps (ici 16 mois d'écart), les réponses sont nettement différentes (Figure 6). On constate que les pentes varient entre 0.99 et 1.28.

Cette dérive sur 16 mois entraîne une erreur sur la mesure de l'ordre de 20%.

On remarque également qu'il y a un changement de réponse alors que la membrane est la même entre l'étalonnage du 01/12/2016 et celui du 13/04/2018. La dérive proviendrait alors du capteur infra rouge interne à la sonde. Pour vérifier cette hypothèse, il est prévu d'effectuer un test en phase gazeuse sans membrane de manière à évaluer uniquement la réponse du capteur infra rouge.

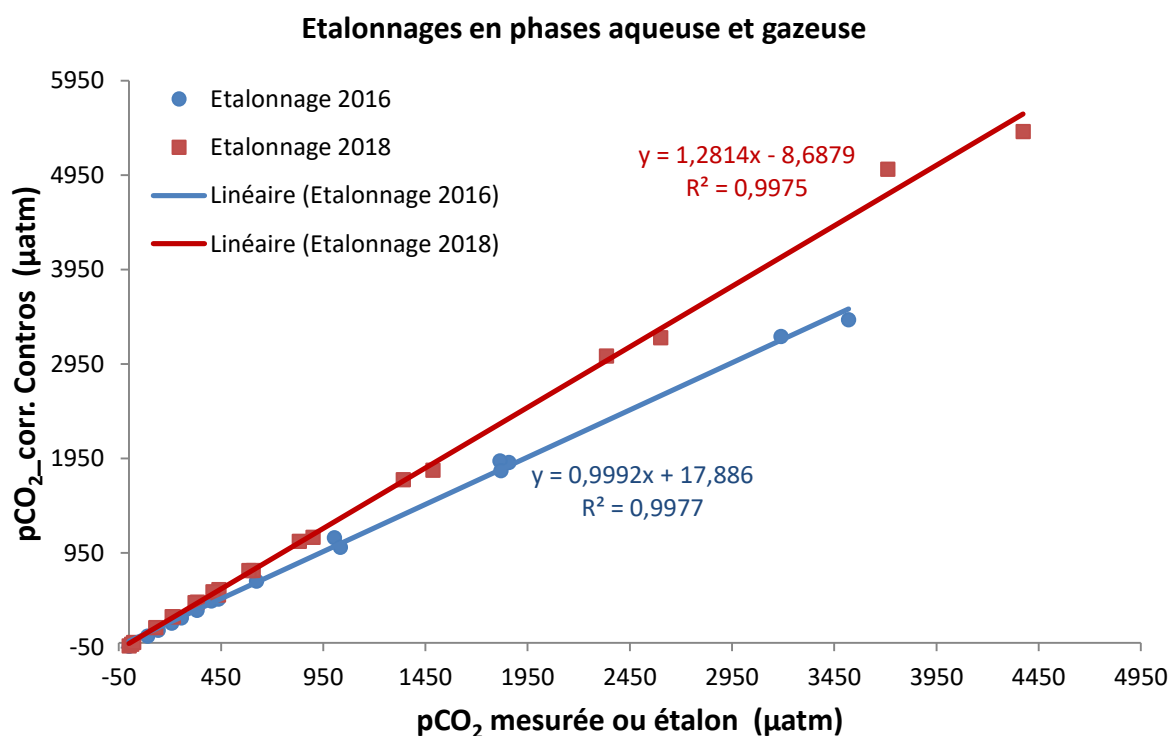


Figure 6 pCO₂ Contros en fonction de la pCO₂ mesurée ou calculée, comparaison des étalonnages de 2016 et de 2018

III. e. Mesures comparatives de terrain

Des mesures de pCO₂ ont été effectuées sur une gravière de la Seine (gravière de la Cocharde, plaine de la Bassée, 77) entre Août 2017 et Mai 2018. Ces mesures ont été comparées à la pCO₂ calculée à partir de pH, température, conductivité normalisée à 25°C mesurées *in situ*, et à l'alcalinité déterminée au laboratoire (Figure 7). La corrélation pCO₂ mesurée sur le terrain vs pCO₂ calculée à également été comparée aux étalonnages présentés précédemment (Figure 8).

Ces mesures comparatives mettent en évidences deux points :

- Les mesures de pCO₂ *in situ* avec le Contros montrent une bonne corrélation avec la pCO₂ calculée sur les échantillons de terrain ($R^2=0.98$, pente = 1.11 et ordonnée origine = +14.90)
- La corrélation concernant les mesures de terrain se situe entre les corrélations des étalonnages effectués avant (12/2016) et après (04/2018) les campagnes

de terrains. Cela indique que les mesures de terrain sont cohérentes vis-à-vis des étalonnages, mais aussi la dérive du capteur.

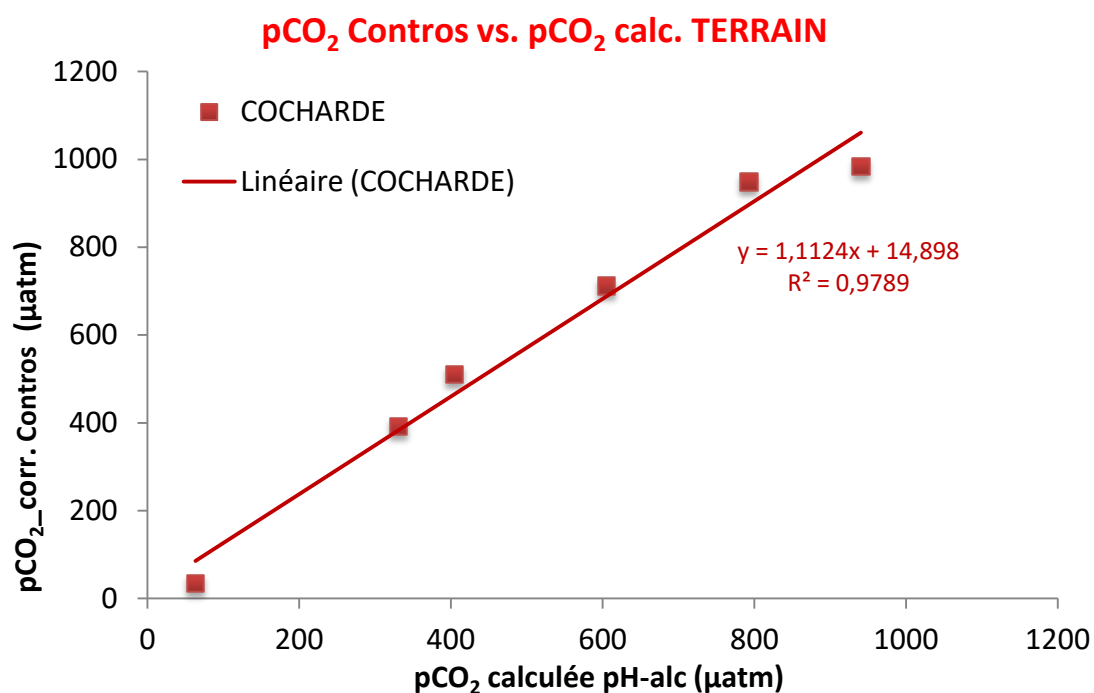


Figure 7 Comparaison des valeurs de pCO₂ mesurées sur le terrain (gravière de la Cocharde) à celles calculées

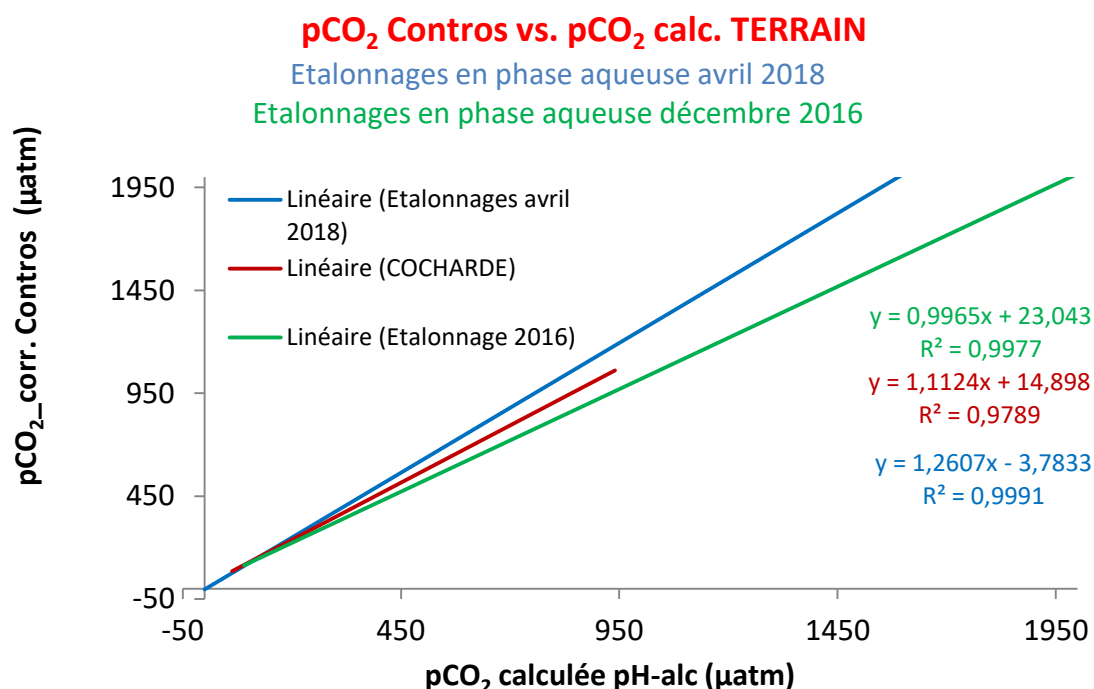


Figure 8 Comparaison des corrélations pCO₂ Contros/pCO₂ calculée entre les valeurs de terrains, d'étalonnages de décembre 2016 et d'étalonnages d'avril 2018

III. f. Recommandations et conclusions

D'après les tests effectués, une erreur sur la mesure de l'ordre de 20% est observée pour une durée de 16 mois sans étalonnage. Aussi, nous recommandons un étalonnage de la sonde tous les 6 mois afin de limiter une dérive trop importante de l'appareil.

La mesure de la $p\text{CO}_2$ avec le Contros HydroC CO_2 est peu ou pas affectée par l'évolution dans le temps de la membrane. Nous conseillons de changer cette membrane une fois par an.

Lors des étalonnages de l'appareil, nous préconisons d'utiliser une corrélation linéaire sur toute la gamme de mesure (0 à 5000 μatm). L'erreur de cette corrélation sera très faible, de l'ordre de 4%, sur les faibles valeurs de $p\text{CO}_2$ (50 à 500 μatm).

Les mesures de terrain mettent en évidence que malgré une dérive du capteur, les valeurs de $p\text{CO}_2$ que celui-ci mesure sont bien corrélées avec les valeurs de $p\text{CO}_2$ des prélèvements.

Le Contros HydroC CO_2 est bien adapté à la mesure *in situ* dans la Seine. La mesure en continu n'a pas pu être testée, mais la précision observée du capteur indique que celui-ci y est adapté.