

## La mesure du CO<sub>2</sub> dans les incubateurs - Questions et réponses



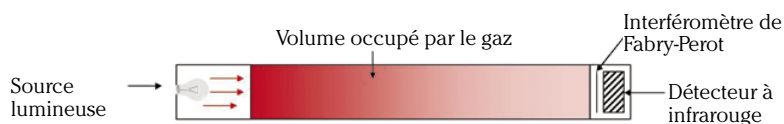
### Foire aux questions

1. Comment fonctionne le capteur CARBOCAP® mono-faisceau à double longueur d'onde NDIR (absorption non dispersive dans l'infrarouge) ?
2. Comment la température et la pression affectent-elles les mesures du CO<sub>2</sub> ?
3. Comment est-il possible de corriger les erreurs de température et de pression en utilisant les instruments de Vaisala pour le CO<sub>2</sub> ?
4. Comment est-il possible d'éviter la condensation lors d'un échantillonnage depuis des incubateurs ?
5. Pourquoi la valeur de concentration de CO<sub>2</sub> est-elle plus élevée qu'escompté lorsqu'on utilise la méthode d'échantillonnage par aspiration avec tuyau de séchage ?

*Ce document a pour but de répondre aux questions les plus fréquemment posées sur les mesures et les produits liés au CO<sub>2</sub>.*

### 1. Comment fonctionne le capteur CARBOCAP® mono-faisceau à double longueur d'onde NDIR (absorption non dispersive dans l'infrarouge) ?

Le capteur Vaisala CARBOCAP® comporte trois composants principaux : une source lumineuse, un interféromètre et un détecteur à infrarouge. La source lumineuse est positionnée pour briller sur le détecteur à infrarouge, de manière à ce que la lumière effectue un trajet de longueur fixe vers le détecteur, où son intensité est mesurée.



*À la longueur d'onde d'absorption du CO<sub>2</sub>, la lumière est absorbée par le dioxyde de carbone présent dans le gaz. Le FPI élimine toutes les autres longueurs d'onde, de sorte que l'intensité de la lumière atteignant le détecteur à infrarouge varie en fonction de la quantité de CO<sub>2</sub> dans le capteur.*

Un interféromètre de Fabry-Pérot (FPI) est positionné juste en face du détecteur à infrarouge. Le FPI est un filtre à accord variable qui ne laisse passer que certaines longueurs d'onde de la lumière jusqu'au détecteur. Le dioxyde de carbone absorbe uniquement certaines longueurs d'onde de la lumière : le FPI est donc conçu pour laisser passer la lumière à une longueur d'onde d'absorption du CO<sub>2</sub> (4,26 µm) et une longueur d'onde voisine non-absorbante. Voir l'illustration sur la gauche.

Lorsque le capteur fonctionne, le FPI est régulièrement accordé sur l'une et l'autre des deux longueurs d'onde. À la longueur d'onde d'absorption du CO<sub>2</sub>, l'intensité de la lumière détectée est réduite proportionnellement à la concentration de CO<sub>2</sub> dans le chemin optique. L'intensité lumineuse mesurée à la longueur d'onde non-absorbante sert de référence pour la comparaison.



Le FPI est accordé sur une longueur d'onde de référence non-absorbante proche, à laquelle le détecteur à infrarouge mesure la pleine intensité de la lumière, créant ainsi un niveau de référence pour la comparaison. Tout changement dans le fonctionnement de la source lumineuse, du FPI ou du détecteur à infrarouge affectera les deux mesures de manière égale, en préservant la différence entre les deux mesures et donc l'étalonnage du capteur. Ceci est décisif pour la stabilité de la sonde sur le long terme.

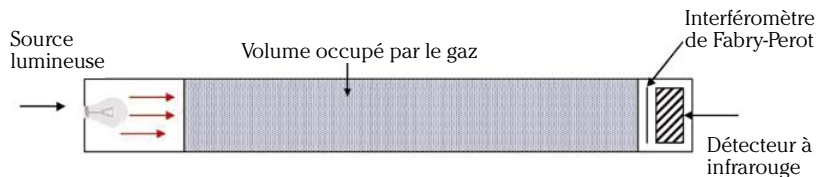
Lorsque la concentration de CO<sub>2</sub> varie, la différence dans l'intensité lumineuse variera également. La relation exacte entre l'intensité lumineuse infrarouge et la concentration volumique du CO<sub>2</sub> est déterminée lorsque l'instrument est étalonné à l'aide d'azote pur (0 ppm de CO<sub>2</sub>) et d'une concentration connue de CO<sub>2</sub>.

La conception des capteurs CARBOCAP® est simple et robuste, en ne faisant appel qu'à une seule source lumineuse et à un détecteur à infrarouge. Ceci élimine les erreurs causées par de légères différences dans les multiples composants des modèles de capteurs bi-faisceaux. Le FPI utilisé dans le capteur CARBOCAP® est micro-usiné à partir de silicium et n'a pas de pièces mobiles, fournissant une fiabilité bien plus élevée que les conceptions mécaniques à « roues à pales ».

## 2. Comment la température et la pression affectent-elles les mesures du CO<sub>2</sub> ?

Tous les instruments à absorption non dispersive dans l'infrarouge mesurent fondamentalement la densité molaire (le nombre de molécules dans le trajet du faisceau). La plupart des utilisateurs préfèrent sortir les valeurs en pourcentage de volume, de sorte que les instruments de CO<sub>2</sub> sont ajustés pour les afficher en corrélant le nombre de molécules à une concentration volumique connue de CO<sub>2</sub>.

Les gaz étant compressibles, leurs densités molaires changent avec la pression atmosphérique et la température ambiantes, ce qui signifie que les valeurs sorties dépendent de la température et de la pression, voir les illustrations ci-dessous.



Les points bleus représentent les molécules de CO<sub>2</sub> dans l'air au niveau de la mer.



Lorsque l'altitude augmente et la pression diminue, moins de molécules de CO<sub>2</sub> occuperont le même espace, même si le pourcentage de CO<sub>2</sub> par rapport aux autres gaz reste le même. Comme les capteurs NDIR « comptent les molécules » dans le chemin optique, il faudra pour afficher correctement le % de CO<sub>2</sub> que la mesure soit ajustée en fonction de la différence de pression, faute de quoi l'instrument affichera une lecture erronée trop basse.

La mesure du CO<sub>2</sub> devra être compensée si les conditions de mesure diffèrent de manière significative des conditions d'étalonnage, qui sont 1013 hPa et 25 °C. Voir les tableaux 1 et 2 pour l'ampleur de l'effet des modifications non compensées de la pression et de la température, conformément à la loi des gaz parfaits.

Pour une compréhension détaillée du besoin de compensation, il est utile de connaître tout d'abord quelques faits sur le comportement des gaz. Dans tout mélange de gaz, la pression totale des gaz est égale à la somme des pressions partielles des gaz constitutifs du mélange. Il s'agit de la loi de Dalton, exprimée comme suit.

$$P_{\text{totale}} = P_1 + P_2 + P_3 \dots$$

La quantité de tout gaz dans un mélange peut être exprimée sous forme de pression. Avec l'air comme exemple, les principaux constituants sont l'azote, l'oxygène, le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau, de sorte que la pression atmosphérique totale est composée des pressions partielles desdits gaz.

La pression partielle de chaque gaz est le produit de sa concentration volumique et de la pression totale du système.

L'air que nous respirons est constitué d'environ 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 0,9 % d'argon et environ 0,04 % de dioxyde de carbone. Ces pourcentages restent à peu près constants partout dans l'atmosphère, quelle que soit l'altitude..

La pression moyenne de l'atmosphère au niveau de la mer est d'environ 1013 hPa, donc la pression partielle du dioxyde de carbone représente 0,04% de 1013 hPa (0,0004 \* 1013), soit 0,405 hPa. Par exemple, à Denver, Colorado (États-Unis), où l'altitude est d'environ 5280 pieds et la pression atmosphérique d'environ 834,3 hPa, ces mêmes 0,04% de dioxyde de carbone nous donnent une pression partielle de 0,334 hPa, à comparer aux 0,405 hPa susmentionnés.

Même si le CO<sub>2</sub> continue de représenter 0,04 % de l'atmosphère à cette altitude plus élevée, la pression est moindre, et lorsque la pression diminue, la densité molaire diminuera également. Les capteurs NDIR mesurant fondamentalement la densité molaire, une compensation doit s'effectuer lorsque l'on veut avoir une valeur en pourcentage de volume ou ppmv. La compensation de température est également importante parce que la densité molaire augmente lorsque la température diminue.

Tableau 1 Effet des variations de pression non compensées en % des valeurs de CO<sub>2</sub> dans un capteur NDIR, conformément à la loi des gaz parfaits.

Instruments étalonnés à 25 °C et 1013 hPa					
Altitude au-dessus du niveau de la mer		Pression (hPa)	Concentration de la valeur mesurée (en % de CO <sub>2</sub> )	Concentration corrigée (en % de CO <sub>2</sub> )	Différence (en % de CO <sub>2</sub> )
pieds	mètres				
0	0	1013	5.00	5.00	0.00
500	153	992.8	4.90	5.00	0.10
1000	305	979.1	4.83	5.00	0.17
1500	458	958.4	4.73	5.00	0.27
2000	610	937.7	4.63	5.00	0.37
2500	763	923.9	4.56	5.00	0.44
3000	915	903.2	4.46	5.00	0.54
3500	1068	889.4	4.39	5.00	0.61
4000	1220	868.7	4.29	5.00	0.71
4500	1373	854.9	4.22	5.00	0.78
5000	1526	834.3	4.12	5.00	0.88
5500	1679	820.5	4.05	5.00	0.95
6000	1831	806.7	3.98	5.00	1.02

Tablea 2 Effet des variations de température non compensées en % des valeurs de CO<sub>2</sub> dans un capteur NDIR, conformément à la loi des gaz parfaits

Instruments étalonnés à 25 °C et 1013 hPa			
Température (en °C)	Concentration mesurée (en % de CO <sub>2</sub> )	Concentration corrigée (en % de CO <sub>2</sub> )	Différence (en % de CO <sub>2</sub> )
25	5.00	5.00	0.00
26	4.98	5.00	0.02
27	4.97	5.00	0.03
28	4.95	5.00	0.05
29	4.93	5.00	0.07
30	4.92	5.00	0.08
31	4.90	5.00	0.10
32	4.89	5.00	0.11
33	4.87	5.00	0.13
34	4.85	5.00	0.15
35	4.84	5.00	0.16
36	4.82	5.00	0.18
37	4.81	5.00	0.19

### 3. Comment est-il possible de corriger les erreurs de température et de pression en utilisant les instruments de Vaisala pour le CO<sub>2</sub>

Il est possible que les mesures de dioxyde de carbone effectuées à des températures et des pressions différentes de celles des conditions d'étalonnage doivent être corrigées. La forme la plus simple de correction pour une valeur exprimée en pourcentage du volume repose sur une formule faisant appel à la loi des gaz parfaits :

$$c_{\text{corrigée}} (\%/ppm) = \frac{c_{\text{mesurée}} (\%/ppm) * (1013 * (t(^{\circ}\text{C}) + 273))}{(298\text{K} * p(\text{hPa}))}$$

Dans l'instrument de mesure portable de dioxyde de carbone Vaisala CARBOCAP® GM70, la température et la pression de l'environnement du point de mesure peuvent être aisément définies dans le menu utilisateur. Les compensations se font de façon interne et l'instrument affiche la mesure corrigée. La correction interne prend également en compte les dépendances causées par la loi des gaz réels ainsi que les composants électroniques et optiques de l'instrument. La correction interne est plus précise pour le GM70 que la correction de la loi des gaz parfaits. Un autre moyen de compenser la température

est de relier une sonde d'humidité et de température Vaisala HUMICAP® HMP77B à l'indicateur MI70, aux côtés de la sonde de CO<sub>2</sub>. La température mesurée avec la sonde peut compenser de manière automatique la valeur de CO<sub>2</sub> lue.

Dans le transmetteur de dioxyde de carbone Vaisala CARBOCAP® de la série GMT220 et le module dioxyde de carbone Vaisala CARBOCAP® de la série GMM220, les compensations peuvent également être appliquées de façon interne. Ces paramètres peuvent être modifiés via une connexion PC. Le GMT220 et le GMM220 sont reliés au PC via un câble série équipé d'un adaptateur COM (référence : 19040GM).

Le module dioxyde de carbone Vaisala CARBOCAP® GMM111 effectue des mesures jusqu'à 20% de CO<sub>2</sub>. Toutefois, il n'y a pas de compensations internes.



*Le Vaisala GM70 avec la sonde d'humidité et de dioxyde de carbone.*

#### 4. Comment est-il possible d'éviter la condensation lors d'un échantillonnage depuis des incubateurs ?

Le GM70 offre deux méthodes de mesure possibles : par diffusion et par aspiration. L'option avec aspiration par pompe est conçue pour prélever un échantillon dans les endroits où des mesures directes par diffusion ne sont pas possibles.

Des précautions doivent être prises lors du prélèvement d'un échantillon de gaz dans des environnements humides, car les surfaces optiques du capteur NDIR à l'intérieur de la sonde et la chambre de pompage doivent être protégées contre la condensation.

Il est difficile d'effectuer des mesures dans les incubateurs et les chambres environnementales, l'échantillon de gaz prélevé passant généralement d'un environnement à haute température et humidité élevée à un environnement à température ambiante, ce qui provoque de la condensation.



*Le Vaisala GM70 s'utilise pour vérifier le niveau de CO<sub>2</sub> dans des incubateurs.*

La condensation à l'intérieur du système d'échantillonnage peut être évitée en utilisant un tube en Nafion® (disponible comme accessoire, référence Vaisala 212807GM).



*Tuyau en Nafion®, référence Vaisala 212807GM.*

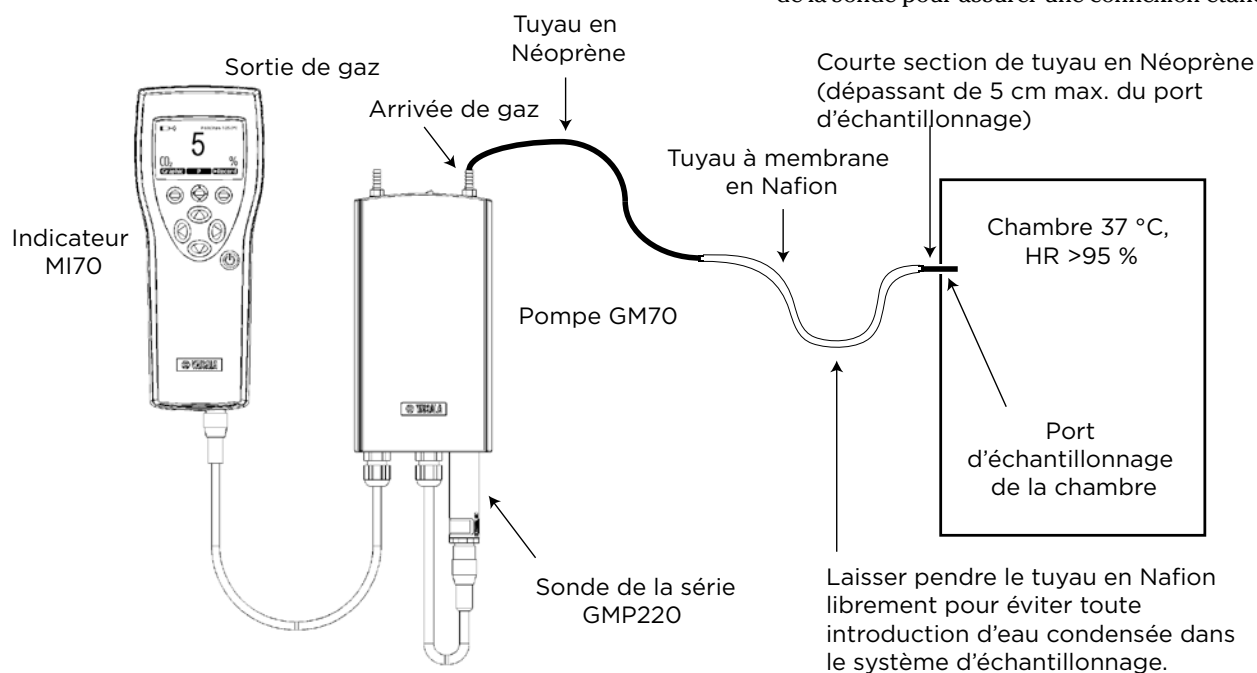
La technologie de base du tube est le Nafion<sup>®</sup>1, un matériau très sélectif dans l'évacuation de l'eau. L'eau se déplace à travers la paroi membranaire et s'évapore dans l'air environnant dans un processus appelé « perévaporation ». Le Nafion<sup>®</sup> élimine l'eau par absorption, qui se produit comme réaction cinétique de premier ordre. Dans les applications de séchage, l'échangeur d'humidité transfère la vapeur d'eau d'un flux de gaz humide vers l'atmosphère environnante. Le séchage est terminé lorsque le niveau d'humidité de l'échantillon est égal à celui ambiant. Le séchage se produisant comme réaction cinétique de premier ordre, ce niveau peut être atteint extrêmement rapidement, généralement en l'espace de 100 à 200 millisecondes. Ce comportement rend le tuyau idéal pour les applications impliquant l'introduction d'un échantillon très humide à la température ambiante. Une courte longueur de tuyau est suffisante pour abaisser l'humidité de l'échantillon de gaz. Pour de plus amples informations sur les tuyaux, veuillez visiter le site [www.permapure.com](http://www.permapure.com).

1 Le Nafion<sup>®</sup> est un copolymère de tétrafluoroéthylène (Téflon) et d'acide perfluoro-3,6-dioxa-4-méthyl-7-octène-sulfonique.

Lorsque l'on utilise la pompe GM70 pour prélever un échantillon dans un incubateur, utiliser un tuyau en Nafion<sup>®</sup> pour éliminer la possibilité de condensation de l'humidité dans le système d'échantillonnage. Les lignes directrices suivantes sont recommandées :

- Il est souhaitable que le tuyau en Nafion<sup>®</sup> pour l'échantillon se trouve au point de transition entre l'incubateur et l'environnement ambiant. Une longueur de 20 cm de Nafion<sup>®</sup> dans l'environnement ambiant est suffisante pour faire passer la vapeur d'eau de l'échantillon extrait à l'environnement ambiant. La partie restante du tuyau pour l'échantillon peut être en Néoprène ou un autre matériau. Raccorder le tuyau en utilisant des raccords cannelés ou une autre méthode pour prévenir les fuites d'air ambiant dans l'échantillon. Garder la longueur totale du tuyau de l'échantillon la plus courte possible.
- Si l'échantillonnage s'effectue par la porte de l'incubateur, insérer le tuyau en Nafion<sup>®</sup> dans l'incubateur et refermer doucement la porte de l'incubateur, en veillant à ce que le joint de la porte n'endommage pas le tuyau et qu'il assure l'étanchéité de manière adéquate autour de lui.
- Lorsque l'on prélève un échantillon de gaz dans une chambre, il convient de positionner quelques centimètres de la ligne d'échantillonnage à l'intérieur de la chambre. S'il existe un risque de condensation à l'intérieur de la chambre dans laquelle l'échantillon est prélevé, veiller tout particulièrement à ce que le condensat ne s'écoule pas dans le tube.
- Pour vérifier que de la condensation n'a pas atteint la sonde, vous pouvez retirer la sonde de CO<sub>2</sub> de la pompe GM70. Lors de la réinsertion de la sonde, ne pas pousser la sonde jusqu'au bout. Au lieu de cela, raccorder les deux joints toriques avec la surface lisse de la sonde pour assurer une connexion étanche.

*Système d'échantillonnage avec tuyau à membrane en Nafion<sup>®</sup>.*



- Si l'échantillonnage s'effectue par un orifice ou tout autre port dans l'incubateur, insérer le tuyau en Nafion® dans l'incubateur et assurer l'étanchéité autour de lui.
- Si l'échantillonnage s'effectue par un raccord cannelé, utiliser un tuyau en Néoprène très court pour connecter le raccord du tuyau en Nafion à celui de l'incubateur. Utiliser le Néoprène comme « connecteur » pour maintenir le tuyau en Nafion® le plus près possible du raccord cannelé. Il n'est pas souhaitable que le gaz échantillon traverse le Néoprène, en raison d'une formation probable de condensation dans le tuyau en Néoprène.
- À titre de précaution, garder la pompe GM70 au dessus du niveau du port d'échantillonnage de la chambre. S'il se produit de la condensation dans la ligne d'échantillonnage, cela empêchera que de l'eau liquide endommage le capteur de CO<sub>2</sub>.

## 5. Pourquoi la valeur de concentration de CO<sub>2</sub> est-elle plus élevée qu'escompté lorsqu'on utilise la méthode d'échantillonnage par aspiration avec tuyau de séchage ?

Lorsqu'on utilise un tuyau en Nafion® pour sécher l'échantillon, la concentration de CO<sub>2</sub> de l'échantillon sec sera légèrement plus élevée que celle de l'échantillon humide. Cela est dû au phénomène de dilution. La densité de CO<sub>2</sub> est « diluée » dans l'incubateur par le volume occupé par la vapeur d'eau. Si l'on retire de la vapeur d'eau de l'échantillon, les fractions occupées par les autres gaz, dont le CO<sub>2</sub>, augmenteront en conséquence.

Le tableau 3 contient les coefficients de dilution pour la concentration de gaz lors du séchage d'un échantillon de gaz. Sélectionner le point de rosée (à 1013 hPa) de l'échantillon de gaz dans l'incubateur sur l'axe horizontal et le point de rosée de l'échantillon de gaz au point de mesure sur l'axe vertical. Le point de rosée de l'échantillon de gaz au point de mesure peut être déterminé avec une sonde d'humidité (HMP75B, HMP76B ou HMP77B).

Tableau 3 Coefficients de dilution

Td (°C)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
-60	0.9999	0.9996	0.999	0.997	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-50	0.9999	0.9997	0.999	0.997	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-40	1.0000	0.9998	0.999	0.998	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-30		1.0000	0.999	0.998	0.994	0.988	0.977	0.958	0.928	0.879	0.804
-20			1.000	0.998	0.995	0.989	0.978	0.959	0.928	0.879	0.804
-10				1.000	0.997	0.990	0.979	0.961	0.930	0.881	0.806
0					1.000	0.994	0.983	0.964	0.933	0.884	0.809
10						1.000	0.989	0.970	0.939	0.890	0.815
20							1.000	0.981	0.950	0.901	0.826
30								1.000	0.969	0.920	0.845
40									1.000	0.951	0.876
50										1.000	0.925
60											1.000

À titre d'exemple : Un échantillon de gaz est prélevé dans un environnement à 40 °C (Td) et est introduit dans un environnement à 10 °C (Td), dans lequel la concentration de gaz mesurée est de 5,32 %. Dans l'environnement à 40 °C (Td), ceci correspond à 5 % de CO<sub>2</sub> (5,32 % X 0,939 = 5,00 %), puisque la teneur en eau plus élevée a dilué l'échantillon.