



INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
TOULOUSE

 **Laero**
Laboratoire d'Aérologie

 Université Fédérale
Toulouse Midi-Pyrénées

INFORMATION SUR LE PREMIER PROTOTYPE DU PROJET CARBONFIRE

Laboratoire d'Aérologie Toulouse

Tuteur

Jean-François LEON
Laboratoire d'Aérologie

Étudiant

Fraçois LEPETIT-AIMON
INSA - Génie physique
francois.lepetitaimon@gmail.com

8 septembre 2021

Table des matières

1	Résumé	1
2	Introduction	2
3	Présentation des capteurs	4
	3.1 Mesure du monoxyde de carbone	4
	3.2 Mesure du Dioxyde de Carbone	7
	3.3 Mesure de température et de pression	11
4	Système d'acquisition des mesures de gaz	12
	4.1 Programme Arduino	12
	4.1.1 Initialisation	13
	4.1.2 Vérification des conditions de mesures	14
	4.1.3 Acquisition des mesures	14
	4.1.4 Sauvegarde sur la carte SD	16
	4.1.5 Transmission Bluetooth	16
	4.1.6 Délai période d'échantillonnage	17
	4.2 Application Android	17
	4.2.1 Fonctionnement de l'application	17
	4.2.2 Vision globale de l'organisation du code JAVA	18
	4.2.3 Scénario général de l'application	19
5	Construction du système	20
	5.1 Organisation du boîtier de mesure	20
	5.2 Construction des éléments mécaniques du boîtier	20
	5.2.1 Perçage du boîtier	21
	5.2.2 Cloison horizontale	22
	5.2.3 Panneau avant	23
	5.3 Construction du Circuit électrique	23
	5.3.1 Soudure sur le Shield SD	23
	5.3.2 construction du PCB	23
	5.3.3 Câbles de connexions	26
	5.3.4 Câblage des éléments électriques	26
	5.4 Assemblage du boîtier	26
	5.5 Conseils d'ordre de construction	27
6	Test et Mesure	28
	6.1 Capteurs de CO	28
	6.1.1 Test du capteur CO-CX avec la carte alphasense	28
	6.1.2 Test du capteur CO-CX avec la carte EVAL-CN0396-ARDZ	29
	6.2 Capteurs de CO ₂	30
	6.3 Impact du débit sur les mesures	30
	6.4 Tests du système dans les conditions réelles	32
7	Guide d'utilisation	36
	7.1 Assemblage	36
	7.2 Mise en route du système	36

7.3	Connexion avec l'application	37
7.4	Réglage de la RTC	37
7.5	Problème pouvant être rencontrés	38
8	Remarques et Perspectives	39
A	Datasheet du Capteur de Monoxyde de Carbone, CO-CX	41
B	Datasheet de la digital transmitter baord conçu pour le capteur CO-CX	44
C	Datasheet du Capteur de Dioxyde de Carbone, IRC-A1	47
D	Datasheet de la transmitter board IRC-TX conçu pour le capteur IRC-A1	51
E	AAN 202-04 : NDIR Electronic Interface and signal Extraction for Pyroelectric Sensor	53
F	Liste des composants utilisés	57

1 Résumé

CarbOnFire est un système conçu pour le calcul de facteur d'émission de particule issues de la combustion de végétaux. Il mesure la concentration de CO, la concentration de CO₂ et collecte sur un filtre de quartz les particules émises par la combustion. CarbOnFire est composé d'un boîtier de mesure intégré à un système de pompage, le tout embarqué sur un sac à dos. Les pièces utilisées pour la construction du boîtier de mesure sont présentées dans l'F.

Pour valider le système, deux types de tests ont été réalisés. Une première série de tests a été réalisé dans le laboratoire en exposant le système à de l'air avec des concentrations connues en CO (0 ppm et 92 ppm) et CO₂ (0 ppm et 1000 ppm). Puis une deuxième série de tests a été effectuée en conditions réelles.

Les tests en conditions de laboratoire ont montré que la mesure de CO accusait une erreur systématique de -2 ppm avec un bruit de mesure de ± 3 ppm. Les résultats obtenus pour le CO₂ sont moins satisfaisants. La mesure à 0 ppm de CO₂, accuse une erreur de +5 ppm avec une bruit de mesure de ± 7 ppm. La mesure à 1000 ppm de CO₂, quant à elle, accuse une erreur de 100 ppm. Un nouvel étalonnage des capteurs de CO₂ est donc nécessaire.

Les tests en conditions réelles ont permis de mettre en évidence l'inertie du système. Le système est très peu soumis aux variations rapides de concentrations et les courbes obtenues sont lissées. Les tests en conditions réelles ont également montré que les gammes de concentration de CO et de CO₂ choisies pour les capteurs sont les bonnes (0-1000 ppm pour le CO, et 0-5000 ppm pour le CO₂).

2 Introduction

CarbOnFire est un système de mesure d'émission de particules issues de la combustion de végétaux. Il a été développé au laboratoire d'aérologie en août 2021. Ce document décrit l'architecture et la conception du système. Si vous désirez des informations supplémentaires sur le projet, n'hésitez pas à contacter François LEPETIT-AIMON à l'adresse électronique francois.lepetitaimon@gmail.com. Tous les documents relatifs au projet sont disponibles sur le github¹ (LEPETIT-AIMON 2021)

ATTENTION : Avant d'utiliser le système, veillez à lire la partie **Guide d'utilisation**

CarbOnFire s'inscrit dans un projet d'étude de l'exposition humaine aux particules fines issues de la combustion de biomasse et en particulier aux feux de forêt. Il est affilié au projet FIRECASTER de l'Agence National de la Recherche (ANR). Ce projet a pour but la création d'une plate-forme numérique de simulation des incendies de forêts et des panaches de fumée associées en zone méditerranéenne. Pour évaluer la quantité de fumée émise par un incendie, il est nécessaire de connaître les facteurs d'émission des polluants. Les facteurs d'émission se définissent comme la masse d'un polluant spécifique émis dans l'atmosphère par kilogramme de végétation brûlée. Pour les évaluer, on mesure les rapports d'émission qui se définissent comme le rapport entre la masse de polluants émises sur celle des concentrations de CO et CO₂. Le facteur ce calcul alors ainsi (KEITA et al. 2018) :

$$EF(x) = \frac{\frac{\Delta[x]}{\Delta[CO_2]+\Delta[CO]}}{12} \cdot MM_x \cdot f_c \cdot 10^3 \quad (1)$$

$EF(x)$: facteur d'émission du polluant x en g/kg.

$\Delta[i] = [i]_{fumee} - [i]_{initiale}$: masse de l'espèce i émise par la combustion

MM_x : masse molaire du polluants

12 : masse molaire du carbone

f_c : la fraction massique de carbone dans le végétaux

CarbOnFire est un système qui permet d'analyser la composition de fumées issues de combustions de végétaux. Le système est installé sur un sac à dos pour être facilement transportable. Il est équipé d'un système de pompage qui aspire les fumées. L'aspiration se fait au bout d'un tuyau que l'utilisateur place au-dessus des feux. Le bout du tuyau est pourvu d'un filtre de quartz dont le rôle est de capter les particules. Après la mesure, le filtre est analysé au laboratoire par des méthodes chimiques, qui permettent de mettre en évidence sa composition. Les fumées filtrées qui arrivent du tuyau, circulent respectivement dans la pompe, le boîtier de mesure et enfin à travers le compteur à gaz. Elles sont ensuite rejetées dans l'air. Le cœur du système réside dans le boîtier de mesure. Il fait l'acquisition des concentrations de monoxyde (CO) et dioxyde de carbone (CO₂), de la température et de la pression. Il enregistre les mesures dans une carte SD pour un traitement ultérieur, et transmet en direct, via Bluetooth, les mesures de gaz et de température. Celles-ci peuvent être visualisées sur le terrain avec un smartphone grâce à l'application CarbOnFire.

1. lien du github en bibliographie

TABLE 1 – Spécifications techniques générales du système CarbonFire

Tension d'alimentation	12V
Précision mesure de CO	-+5ppm
Précision mesure de température	-+1°C
Précision meusre de pression	-+1hPa
Précision mesure de CO ₂	-+50ppm
Débit d'aire	10 l/min
Capacité carte SD	32GB
Plage de mesure de température	-10°C à 50°C
Plage de mesure de CO	0 à 2000ppm
Plage de mesure de CO ₂	0 à 5000ppm
Dimensions	60cm x 30cm x 30cm
Poids	10Kg
Diamètre du filtre	47mm

3 Présentation des capteurs

Le boîtier de mesure a pour rôle de caractériser quatre grandeurs physiques des fumées aspirées : la concentration de CO, la concentration de CO₂, la température et la pression.

3.1 Mesure du monoxyde de carbone

Pour mesurer le CO, nous utilisons un capteur électro-chimique. Le principe de mesure est voisin de celui d'une pile chimique. Le passage du gaz entre deux électrodes provoque une réaction d'oxydo-réduction. Cette réaction produit un courant entre les deux électrodes appelées Working Electrode et Counter Electrode. Dans la gamme de mesure, ce courant est proportionnel à la concentration de CO à laquelle est exposée le capteur. Un capteur électro-chimique est caractérisé par sa sensibilité exprimée en courant par unité de concentration. Plus sa sensibilité est grande, plus le courant circulant entre les électrodes sera important à concentration égale. En contrepartie la plage de mesure se restreint quand la sensibilité augmente.

Un des inconvénients de ce type de capteur est les sensibilités croisées. La géométrie du capteur et le choix du matériau des électrodes optimisent la sensibilité du capteur pour le gaz choisi, mais il subsiste des sensibilités non nulles pour d'autres gaz. Il est important de connaître ces gaz pour s'assurer que dans l'application prédestinée, il n'y ait pas de risque de les retrouver. Les principales sensibilités croisées du capteur CO-CX sont données dans le tableau 1.

FIGURE 1 – Sensibilités croisées du capteur CO-CX

CROSS SENSITIVITY	Filter capacity	ppm-hours	H ₂ S	250,000
	Filter capacity	ppm-hours	NO ₂	500,000
	Filter capacity	ppm-hours	NO	400,000
	Filter capacity	ppm-hours	SO ₂	250,000
	H ₂	sensitivity % measured gas @ 900ppm H ₂ in 900ppm CO @ 10°C		< 2
	H ₂	sensitivity % measured gas @ 900ppm H ₂ in 900ppm CO @ 20°C		< 5
	H ₂	sensitivity % measured gas @ 900ppm H ₂ in 900ppm CO @ 30°C		< 6
	H ₂ S	sensitivity % measured gas @ 20ppm H ₂ S		< 0.1
	NO ₂	sensitivity % measured gas @ 10ppm NO ₂		< 0.1
	Cl ₂	sensitivity % measured gas @ 10ppm Cl ₂		< 0.1
	NO	sensitivity % measured gas @ 50ppm NO		< 0.1
	SO ₂	sensitivity % measured gas @ 20ppm SO ₂		< 0.1
	C ₂ H ₄	sensitivity % measured gas @ 400ppm C ₂ H ₄		< 2
	NH ₃	sensitivity % measured gas @ 20ppm NH ₃		< 0.1

Pour notre application, nous avons besoin de mesurer des concentrations pouvant atteindre 2000 ppm CO. Nous avons choisi d'utiliser le capteur Alphasense CO-CX dont la plage de mesure est 0-2000ppm et dont les caractéristiques constructeur sont données dans la figure 2. Sa sensibilité est comprise entre 55 et 100 nA par ppm d'après le constructeur, ce qui représente un grand intervalle d'incertitude. Afin de réduire cette incertitude, il est nécessaire que le capteur soit étalonné avant son utilisation.

On peut retenir sur la qualité de la mesure que la réponse admet un bruit RMS de ± 0.5 ppm, que la mesure du 0 peut-être biaisée de ± 3 ppm et enfin que l'erreur de linéarité engendre au maximum une déviation de 40 ppm par rapport à la valeur vraie.

Il est important de noter que les performances du capteur sont impactées par la température. Comme indiqué sur la figure 3 (panneau du haut), plus la température est différente de 20°C, plus l'erreur de linéarité est grande et plus la dérive du zéro est importante (panneau du bas de la figure 3).

Pour pouvoir traiter la mesure, il faut amplifier le faible courant de réponse en un courant plus grand mesurable. Pour cela on utilise la carte électronique alphasense « 4 to 20 mA Digital

FIGURE 2 – Caractéristiques du Capteur CO-CX

PERFORMANCE	Sensitivity	nA/ppm in 400ppm CO	55 to 100
	Response time	t ₉₀ (s) from zero to 800ppm CO	< 40
	Zero current	ppm equivalent in zero air	< ± 3
	Resolution	RMS noise (ppm equivalent)	< 0.5
	Range	ppm CO limit of performance warranty	2,000
	Linearity	ppm error at full scale, linear at zero and 800ppm CO	< ±40
	Overgas limit	maximum ppm for stable response to gas pulse	4,000

Figure 2 Sensitivity Temperature Dependence

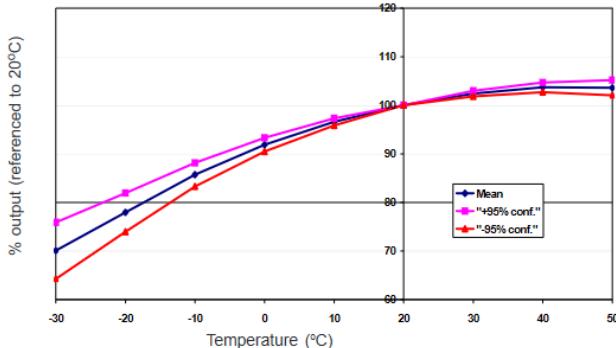


Figure 2 shows the variation in sensitivity caused by changes in temperature.

This data is taken from a typical batch of sensors. The mean and ±95% confidence intervals are shown.

Figure 3 Zero Temperature Dependence

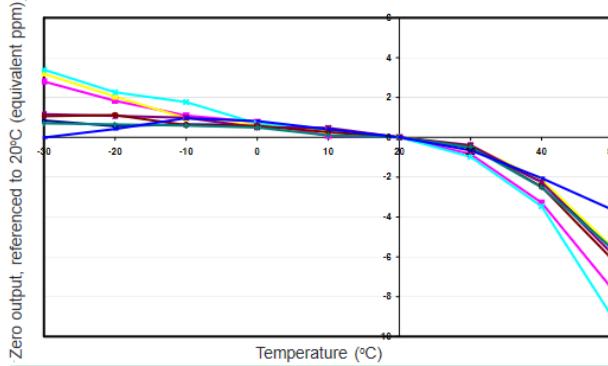


Figure 3 shows the variation in zero output caused by changes in temperature, expressed as ppm gas equivalent, referenced to zero at 20°C.

This data is taken from a typical batch of sensors.

Figure 4 Linearity to 1,000ppm

FIGURE 3 – Dérive en température du capteur CO-CX

Transmitter Board » qui est conçue spécialement pour le CO-CX. Elle amplifie le signal du capteur en un courant variant de 4mA à 20mA. Cette amplification se fait grâce à un circuit potentiostatique présenté figure 4.

On peut noter que le capteur possède une 3ème électrode « Reference Electrode ». Cette électrode sert à appliquer une tension d'offset entre elle et la « Working Electrode ». La valeur de cette tension dépend du capteur utilisé, pour le capteur CO-CX, elle doit être nulle.

La sortie de la carte électronique Alphasense est un courant variant de 4mA à 20mA. Ce courant de sortie est numérique avec une résolution de 0.75 A. Rapporté au courant du capteur cela correspond à une résolution de 11 nA. On sait que la sensibilité du capteur est comprise entre 55 et 100 nA/ppm et que son bruit RMS est de l'ordre de 0.5 ppm. En termes de courant, ce bruit vaut entre 27 nA et 50 nA. La résolution de la carte est inférieure à ce bruit, donc elle ne sera pas limitante. En sortie, la précision de la carte est de ± 5 A, a laquelle il faut ajouter le bruit RMS pouvant aller jusqu'à 2 A. Rapporté à l'entrée l'incertitude sur la mesure est d'environ 100 nA. Cette incertitude est limitante car elle est supérieure au bruit du capteur. En termes de concentration, cela correspond à une incertitude de ± 1 à 2 ppm. Il faut encore ajouter à cette erreur la dérive en température qui est importante : ± 0.2 µA °C⁻¹ en sortie. On arrive à ± 4 ppm de précision à 25 °C, soit 10 fois moins précis que la précision potentielle du

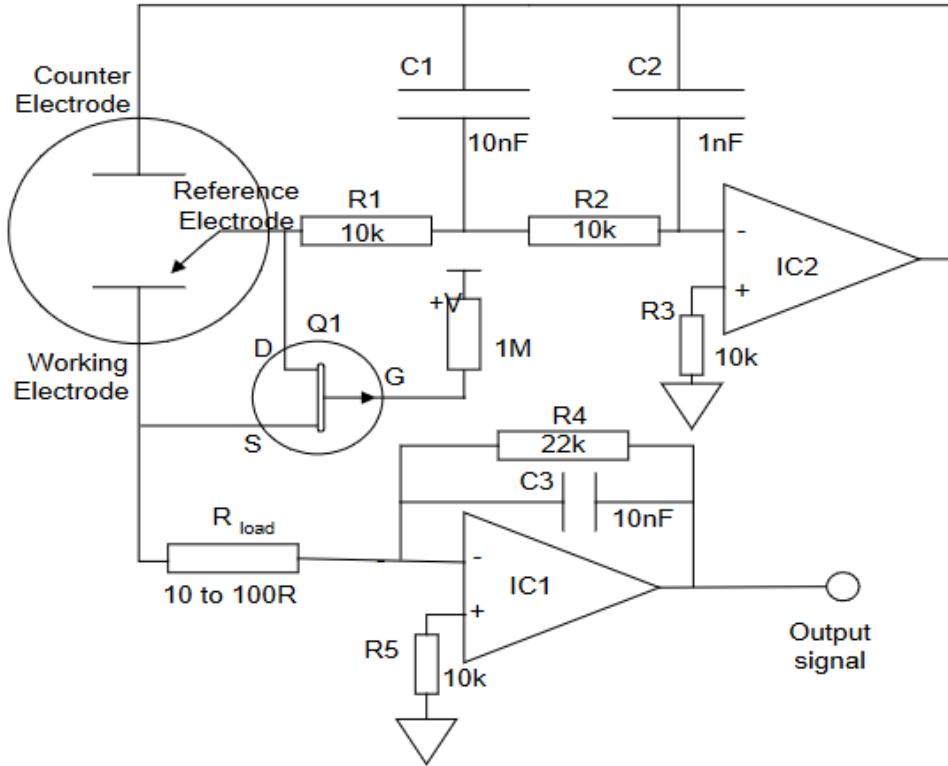


FIGURE 4 – Circuit potentiostatique pour capteur électro-chimique

capteur seul.

La carte est alimentée en 10-30 V par un connecteur Molex KK2,54 de 2 pins. La valeur du courant en sortie de la carte est convertie en tension en ajoutant une résistance en série entre l'alimentation et le capteur (figure 5)

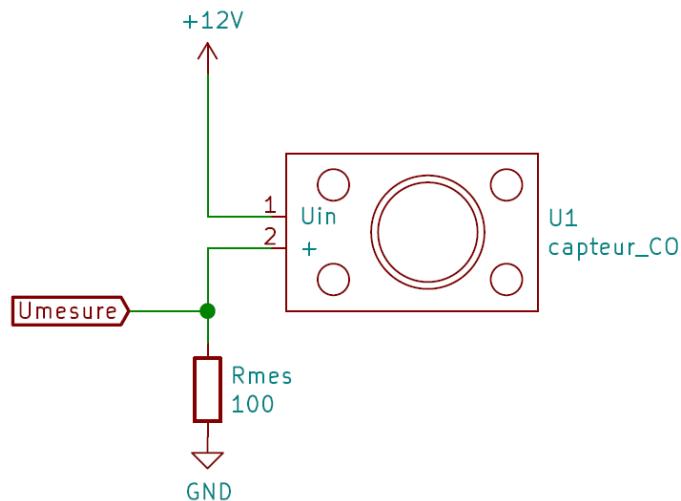


FIGURE 5 – Circuit de mesure pour la carte du capteur CO-CX

La résistance de mesure induit une chute de tension aux bornes du capteur par rapport à la tension d'alimentation. En utilisant la loi d'ohm on obtient une plages de tension de mesure entre $0.004 \times R_{mes}$ et $0.02 \times R_{mes}$. Malgré cette chute, la tension aux bornes du capteur ne doit pas être inférieure à 10 V.

Dans notre cas, la tension d'alimentation vaut 12V, donc la chute de tension doit être inférieure à 2V. En terme résistif, la résistance de mesure doit être inférieure à une résistance seuil de $2V / 0.02A = 100\Omega$.

Nous avons choisi donc une résistance de mesure de 100Ω pour maximiser la plage de tensions de mesures et ainsi optimiser la résolution numérique de l'adc.

Les spécifications techniques du capteur CO-CX d'Alphasense sont reportées dans l'annexe A.

3.2 Mesure du Dioxyde de Carbone

La mesure de CO_2 est assurée par un capteur infra-rouge NDIR Alphasense. Une LED infra-rouge envoie des pulses de courant à travers une cavité, qui communique avec l'air ambiant (Figure 6). Deux photodéTECTeurs sont installés à l'intérieur de la cavité face à la photodiode. Le premier est dit actif et le second est dit de référence. Ils mesurent l'intensité lumineuse transmise à travers la cavité. Le photodéTECTeur actif est équipé d'un filtre qui transmet uniquement la longueur d'onde d'une raie d'absorption du CO_2 à $\lambda = 4\mu\text{m}$. De cette manière lorsque la concentration en CO_2 augmente dans la cavité, l'intensité lumineuse transmise diminue. L'autre photodéTECTeur est équipé d'un filtre qui absorbe uniquement la longueur d'onde de la raie d'absorption. De cette manière l'intensité lumineuse transmise n'est pas impactée par la variation de concentration de CO_2 . La cavité de référence sert à compenser les variations d'intensité d'émission lumineuse.

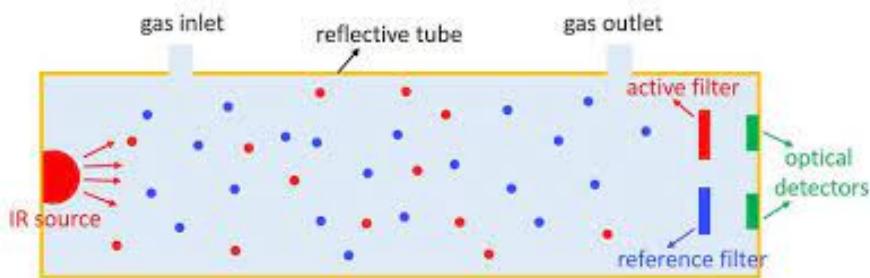


FIGURE 6 – Schéma de fonctionnement d'une cellule NDIR

La concentration de CO_2 dans l'air ambiant est fonction de la différence des mesures d'intensité lumineuse entre les deux détecteurs. Les photodéTECTeurs sont sensibles aux variations de température, c'est la raison pour laquelle ils sont accompagnés d'une thermistance permettant d'établir une correction de compensation thermique sur la mesure.

Pour notre application nous utilisons le capteur Alphasense IRC-A1 de type IAQ dont les performances sont exposées figure 7 dont la plage de mesure est 0-5000 ppm. Sa résolution est de $\pm 1 \text{ ppm}$ à 0 ppm et peut atteindre $\pm 15 \text{ ppm}$ à 5000 ppm. La précision du capteur est de $\pm 50 \text{ ppm}$ (en utilisant les coefficients universels de linéarisation, ??). Le temps de réponse du capteur est inférieur à 40 secondes d'après le constructeur. En revanche pour atteindre le zéro les temps de réponse sont plus long. Il faut 30 secondes pour atteindre le 0 à $\pm 100 \text{ ppm}$ et il faut 30 minutes pour atteindre un zéro qui respecte les spécifications constructeurs à savoir $\pm 1 \text{ ppm}$.

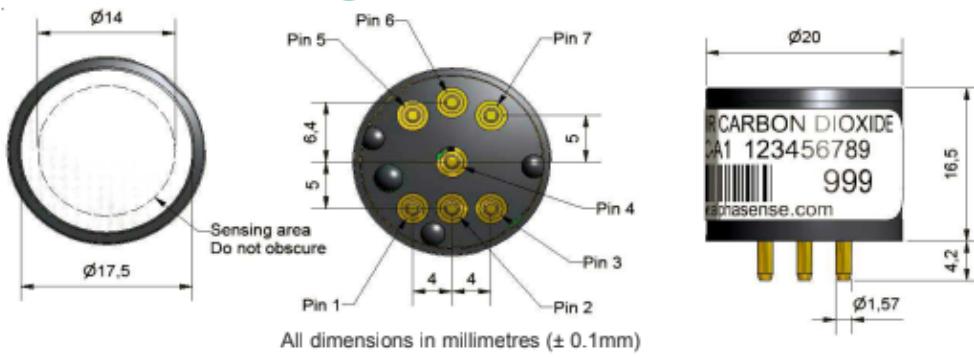
Le capteur possède 7 broches présentées figure 8. Le signal d'alimentation de la source lumineuse doit être un signal carré de 2 à 2,5Hz de fréquence, de rapport cyclique 50% et d'amplitude 5 V. La source de tension doit avoir une impédance de sortie d'environ 9 à 10Ω et doit pouvoir fournir un courant de 50 à 60 mA. Pour créer ce signal, on peut utiliser un transistor MOSFET à canal n couplé à un signal carré sur la grille (voir figure 10 pour le branchement). Cependant il faut bien s'assurer que le GND du transistor et le GND des photodéTECTeurs soit isolés pour éviter toutes perturbations de la mesure.

PERFORMANCE

Maximum Power Requirements	5.0 VDC, 60mA max. (50% duty cycle source drive)
Minimum Operating Voltage	2.0 VDC, 20mA max. (50% duty cycle source drive)
Source Drive Frequency	1.5 to 3 Hz (recommended 2 to 2.25 Hz)
Active Output in N ₂ (peak-to-peak)	60 - 100mV @ 2.1 Hz, 50% duty cycle
Reference Output in N ₂ (peak-to-peak)	40 - 80mV @ 2.1 Hz, 50% duty cycle
Response Time (t ₉₀)	< 40s @ 20°C ambient
Warm-up Time	To final zero ± 100ppm: < 30 s @ 20°C To specification: < 30 minutes @ 20°C

FIGURE 7 – Spécifications capteur NDIR IRC-A1

Figure 1 NDIR-A Schematic Diagram



Pin out details:

1. Lamp return
2. Lamp +5V
3. +5V Pyro supply
4. Detector output
5. Reference output
6. Thermistor output
7. OV Pyro supply and case connection

Notes:

1. Dimensions without tolerances are nominal
2. Recommended PCB socket: Wearnes Cambion Ltd. code: 450-3326-01-06-00
3. Weight: 15g
4. Use antistatic precautions when handling
5. Do not cut pins
6. Do not solder directly to pins

FIGURE 8 – Descriptif des broches du capteur IRC-A1

Les signaux bruts issus des photodéTECTeurs sont composés d'un offset d'environ 0,7 à 1V et d'une composante alternative de fréquence identique à la fréquence d'alimentation de la source lumineuse. Cette oscillation a une amplitude de 20mV à 50mV peak-to-peak qui varie en fonction de la transmission lumineuse à l'intérieur de la cavité. Pour traiter le signal il faut filtrer la composante continue ainsi que les hautes fréquences puis amplifié le signal (figure 9). Le schéma électrique qui permet de réaliser les fonctions d'amplification est disponible figure 10

On obtient un signal sinusoïdal pour chacune des deux photodiodes, dont l'amplitude traduit le taux de transmission des rayons issus de la LED infra-rouge à travers la cavité.

L'E détail la conception du circuit.

La thermistance à coefficient de température négatif (NTC), servant à mesurer la température, vaut 3000Ω à 25°C et son coefficient B vaut 3450K. On peut évaluer la valeur de la résistance en fonction de la température grâce à la relation de Steinhart-Hart simplifiée valable sur la plage de température de fonctionnement du capteur (Eq (2))

$$R(T) = R_0 * e^{B \cdot (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (2)$$

avec $T_0 = 25^\circ\text{C}$ et $R_0 = 3000 \Omega$

En travaillant l'équation on obtient la valeur de la température en fonction de la résistance mesure (Eq (3))

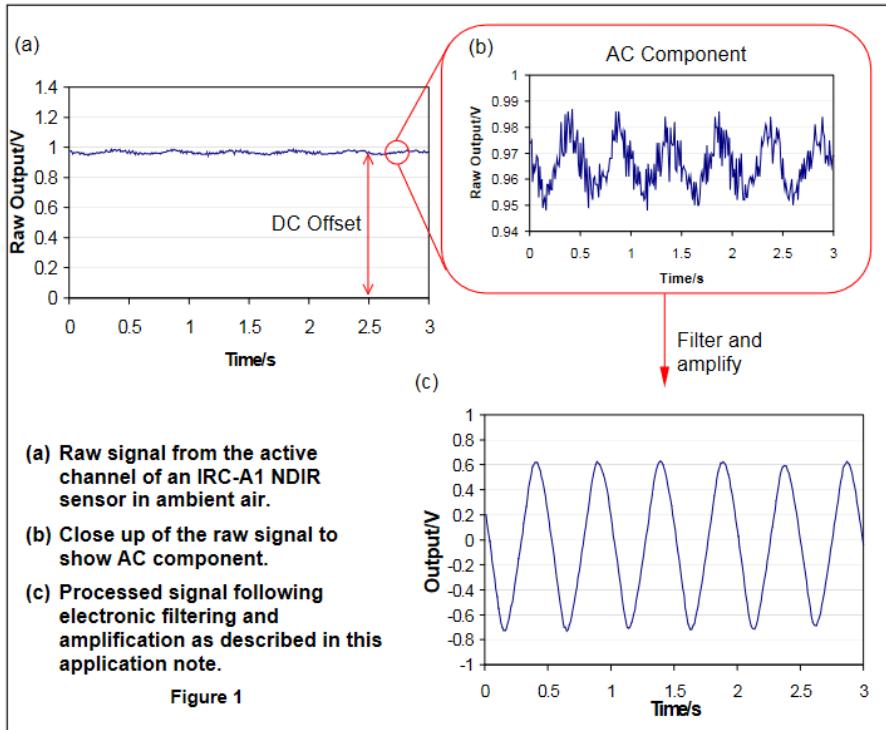


FIGURE 9 – Filtrage et amplification du signal des photo-déTECTeurs du capteur NDIR

$$T = \frac{T_0 \cdot B}{T_0 \cdot \ln\left(\frac{R(T)}{R_0}\right) + B} \quad (3)$$

Dans le capteur, la thermistance est connectée entre les broches 6 et 7. Pour effectuer la mesure de résistance, il faut connecter la broche 6 du capteur en série avec une résistance de valeur connue, et une source de tension également connue. En utilisant le principe du pont diviseur de tension, on peut connaître la valeur de la thermistance et donc mesurer la température (figure 11)

$$\text{Ainsi } R(T) = \frac{V_{cc}}{U_{mes}} \times R1 - R1 \quad (4)$$

Les détails des calculs de concentration de CO₂ et de compensation thermique sont disponibles en annexe (document AAN 201-06).

Dans notre cas nous avons utilisé la carte alphasense IRC-TX spécialement conçue pour le capteur IRC-A1. Elle renvoie un signal en courant variant de 4 mA à 20 mA. La précision de la mesure est la même que celle du capteur, à savoir ±50 ppm.

La carte est alimentée en 12-30 V par les pins 1 et 2 du connecteur molex KK2,54 4-pins. Le principe de l'acquisition est le même que pour le capteur de CO. Un courant proportionnel à la concentration de CO₂ allant de 4 mA à 20 mA circule entre le pin 3 et le pin 4 du connecteur molex. Une résistance de mesure est intégrée en série entre les pins 3 et 4 pour convertir la réponse en courant en une réponse en tension. La tension maximale mesurable par notre système d'acquisition est de 5 V. D'après la loi d'Ohm, une tension maximale de 5 V pour un courant maximal de 20 mA est obtenue pour une résistance $R_{mes} = U_{max}/I_{max} = 250\Omega$. La valeur standard la plus proche est 220Ω, c'est celle que nous utilisons.

En résumé, on obtient en entrée de notre système d'acquisition une tension proportionnelle à la concentration de CO variant de $U_{min} = 0.004R_{mes} = 0,88V$ à $U_{max} = 0.020R_{mes} = 4,4V$, sur la plage de mesure 0-5000 ppm.

Le branchement électrique de la carte IRC-TX est disponible figure 12

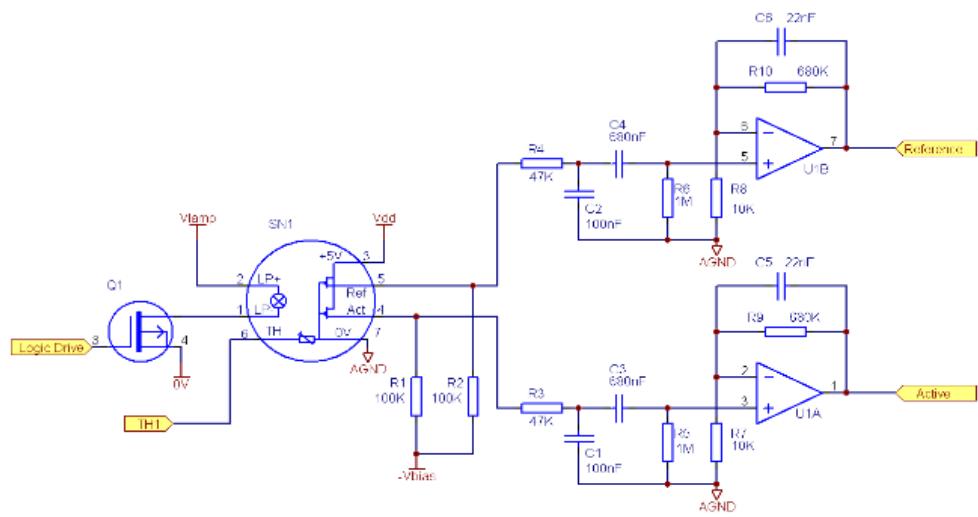


FIGURE 10 – Circuit électrique du Capteur IRC-A1

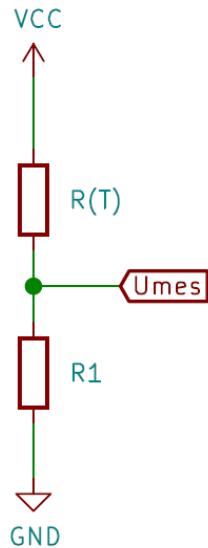


FIGURE 11 – Circuit électrique pour la mesure de la thermistance

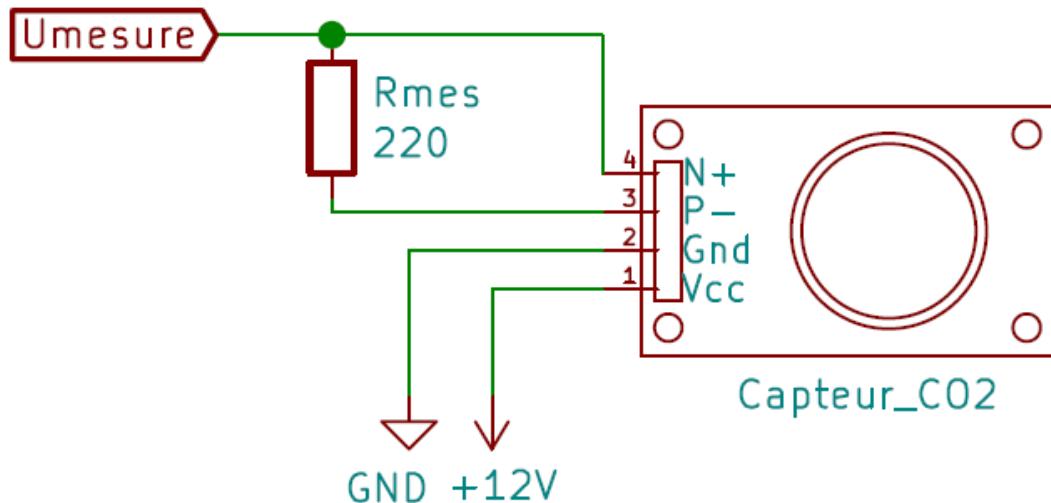


FIGURE 12 – Circuit électrique pour la mesure du CO₂ avec le IRC-A1

La carte électronique Alphasense limite la sensibilité du capteur. Elle admet un bruit de mesure bien supérieur au bruit généré par le capteur chimique. D'autres alternatives existent, par exemple la carte EVAL-CN0396-ARDZ développée par Analog Device, semble avoir une réponse plus stable.

En revanche en termes d'intégration dans un système de mesure, la carte CN0396 est plus contraignante. Elle s'utilise uniquement avec une carte arduino uno. Elle est montée en shield, ce qui oblige à prendre un boitier suffisamment haut et limite les choix de placement du capteur. Une possibilité serait d'imprimé un PCB personnalisé avec le circuit électrique de la carte CN0396. Voici le schéma électrique :

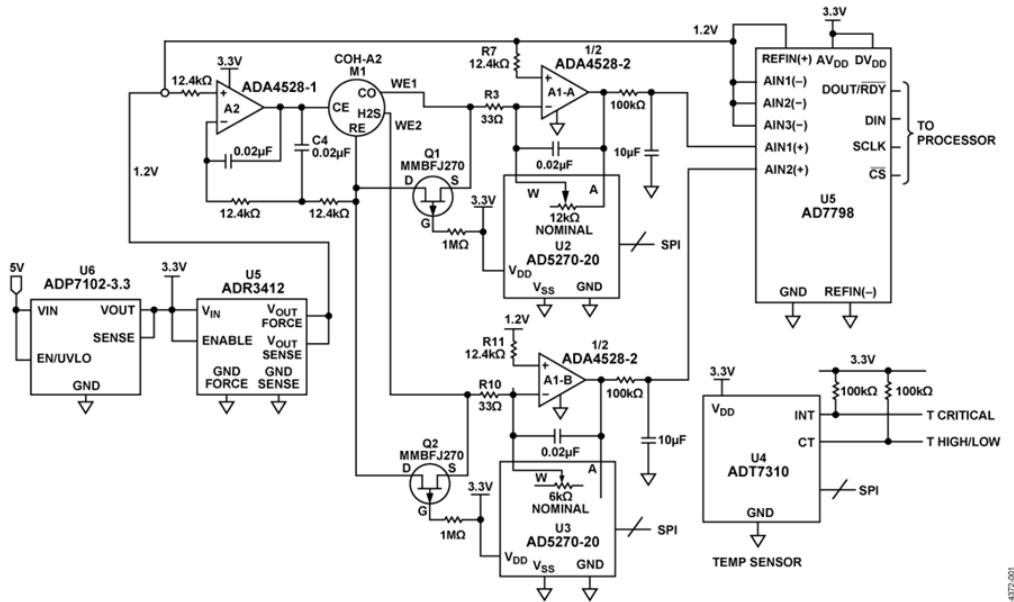


FIGURE 13 – Circuit électrique de la carte ARDZ - CN0396

3.3 Mesure de température et de pression

Les mesures de température et de pression sont obtenues avec le capteur BMP280. C'est un capteur qui communique via le bus I₂C. Il mesure la température ambiante avec une précision de 1°C et la pression ambiante avec une précision de 1 hPa. À partir de la mesure de pression atmosphérique, le BMP280 peut calculer l'altitude à 1 m prêt. Cette précision est atteinte à la condition de renseigner quotidiennement la pression courante à l'altitude 0, qui varie en fonction des conditions météorologiques. L'alimentation du capteur se fait par les pins 1 et 2 du connecteur Grove. Les mesures sont communiquées par les canaux SCL et SDA du bus I₂C (pin 3 et 4 du connecteur Grove).

4 Système d'acquisition des mesures de gaz

L'acquisition des mesures est assurée par l'Arduino Uno rev3 assisté d'un ADC 16-bits adafruit. Nous avons fait le choix d'ajouter un ADC extérieur en raison des mauvais résultats obtenus en utilisant l'ADC de l'Arduino. En termes de résolution théorique, l'ADC 10-bits de l'Arduino aurait suffi pour obtenir une précision de 6 ppm sur la mesure de CO et de CO₂. Cependant en comparant les résultats obtenus avec l'Arduino et avec l'ADC Adafruit, on observe une nette différence de mesure, supérieure à la résolution théorique de mesure (-60 ppmpar rapport à l'adc de l'arduino). Malgré sa résolution suffisante, l'Arduino n'a pas la précision nécessaire. L'ADC utilisé est un ADS1115 Adafruit 16-bits. Il peut accueillir 4 canaux analogiques et communiquer en I2C en utilisant la librairie '[Adafruit_ADS1X15.h](#)'.

Ainsi toutes les acquisitions de mesures (température, pression, concentrations de gaz) se font avec les canaux I2C de l'Arduino.

La carte arduino est accompagnée d'un shield SD de TRU COMPONENT muni d'une Real Time Clock (RTC). Il est équipé d'un lecteur de carte SD et d'une RTC DS1307ZN. La RTC est alimentée par une pile bouton de type CR1220, qui permet de garder en mémoire la date et l'heure, quand le système est éteint.

CarbOnFire est équipé d'un module Bluetooth qui communique par bus série v.3. Le module est branché avec un connecteur Grove dont les pins correspondent dans l'ordre au TX, RX, VCC, GND (figure 14). Les pins numériques 0 et 1 de l'arduino sont par défaut dédiés à la communication série. Il est important de noter que le pin TX du module est branché sur le pin RX de l'arduino et que le pin RX du module est branché sur le pin TX de l'arduino.

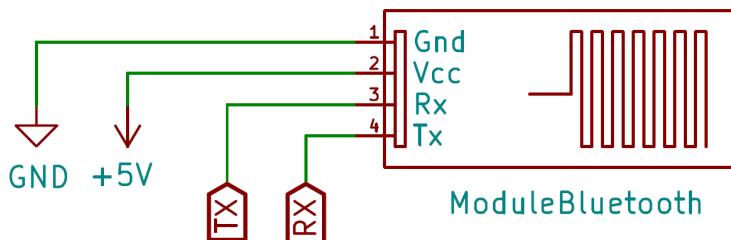


FIGURE 14 – Branchement électrique du module Bluetooth

4.1 Programme Arduino

Comme tous les programmes arduino, le script se décompose en deux parties : une partie `setup()` qui s'exécute une unique fois à la mise sous tension, et une partie `loop()` qui tourne en boucle. La figure 15 représente les différentes étapes du programme.

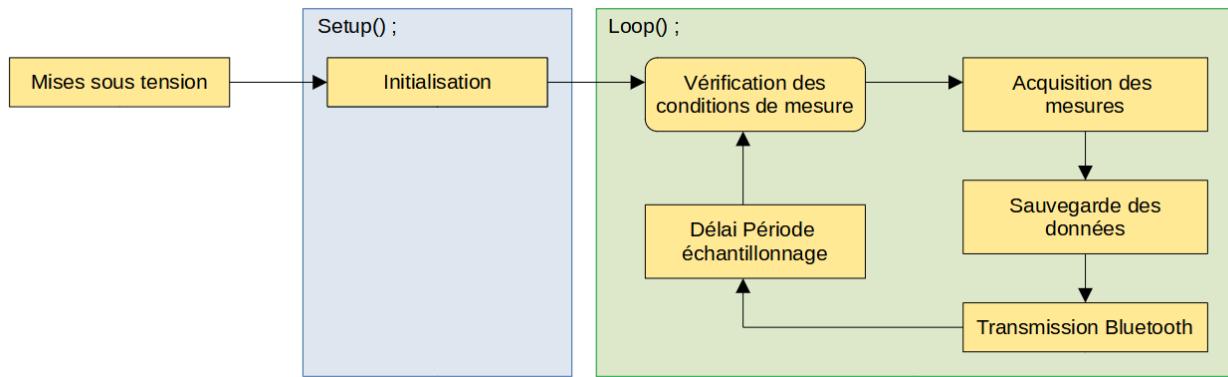


FIGURE 15 – Diagramme du code arduino

4.1.1 Initialisation

Dans le **setup()**, nous préparons les composants électriques pour qu'ils soient opérationnels. De manière générale chaque composant à une librairie dédiée dans laquelle figure une fonction d'initialisation intitulée classiquement **begin()**. Elle permet de vérifier que la communication se fait entre la carte et le composant (branchement, temps de réponse, ...) et parfois de définir des paramètres (ex : baudrate pour le Serial). Dans notre cas, il y a 4 éléments à initialiser : le BMP280, le shield SD, l'adc 16-bits et le port série du module Bluetooth.

Plus loin dans le programme, les données sont écrites dans un fichier sur la carte SD. C'est un fichier au format CSV (Comma Separate Values), avec une première ligne d'entête correspondant aux intitulés des colonnes de mesure (figure 16).

Temp, press, alti, CO, CO2, date
23.11, 999.52, 118.24, -9.18, -9.94, 2021-8-5 9:7:15
23.11, 999.52, 118.24, -7.42, -4.62, 2021-8-5 9:7:15

FIGURE 16 – Exemple du début d'un fichier de mesure

Si le fichier de mesure sur la carte a été supprimé, où s'il n'a jamais été créé, il faut le créer et y écrire la première ligne d'entête. Cela se fait dans la partie **Setup()** (figure 17). Un répertoire « donnée » est d'abord créé, puis un fichier DATA y est ajouté avec la première ligne d'entête. A l'inverse, si le fichier existe déjà et qu'il contient des mesures, il ne faut ni les effacer, ni ajouter une ligne d'entête en plein milieu. Les nouvelles mesures seront ajoutées à la suite de celles déjà écrites.

```

// ----- Initialisation du port série et du capteur bmp280 -----

Serial.begin(9600);

if (!bmp280.begin()) {Serial.println("failed to initialised bmp");}
bmp280.setTimeStandby(TIME_STANDBY_2000MS);      // Set the standby time to 2 seconds
bmp280.startNormalConversion();

if (!ads.begin()) {
  Serial.println("Failed to initialize ADS.");
  while (!ads.begin());
}

// ----- Préparation du fichier de mesure sur la carte SD -----

while (!SD.begin());
Serial.print("carte SD OK");
if (!SD.exists(DATA_DIR)) {
  SD.mkdir(DATA_DIR);
  donnee = SD.open("DONNEE/Data.txt", FILE_WRITE);
  donnee.println("Temp,press,alti,CO,CO2,date");
  donnee.close();
}

```

FIGURE 17 – Extrait du programme Arduino - Initialisation

4.1.2 Vérification des conditions de mesures

Une fois l'initialisation faite, nous entrons dans la boucle du programme. C'est dans cette boucle que s'effectue les mesures et leur gestion, notamment leur sauvegarde. Avant de démarrer une acquisition, il faut vérifier que nous sommes en capacité d'enregistrer la mesure. Autrement dit, il faut s'assurer qu'il y ait une carte SD dans le lecteur et que la communication avec le Shield SD puisse s'établir. Le programme contient une boucle bloquante qui attend qu'une carte SD soit insérée dans le lecteur(figure 18).

```

// ----- Vérification de la présence d'une carte SD -----

while (!SD.begin());

```

FIGURE 18 – Extrait du programme Arduino - Vérification des conditions de mesure

4.1.3 Acquisition des mesures

L'acquisition des mesures de CO₂et CO₂se fait grâce à l'adc 16-bits qui communique en I2C. La fonction **readADC_singleEnded(Pin)** renvoie une valeur numérique entre 0 et 655536. Celle-ci est proportionnelle à la tension mesurée sur le broche numérotée « Pin ». La valeur 0 correspond à une tension de $-V_{sat}$ et la valeur 655536 correspond à une de tension de $+V_{sat}$. L'ADC possède un gain réglable allant de x2/3 (par défaut) jusqu'à x16. La tension V_{sat} dépend de ce gain comme présenté dans le tableau 2

GAIN	V_{sat}	Résolution
x2/3	6.144V	0.1875 mV
x 1	4.096 V	0.125 mV
x 2	2.048 V	0.0625 mV
x 4	1.024 V	0.03125 mV
x 8	0.512 V	0.015625 mV
x 16	0.256 V	0.0078125 mV

TABLE 2 – Spécifications de l'ADC-16bits, pour différents gain

Pour convertir la valeur binaire en une tension de mesure, on utilise la fonction **computeVolts(valeur_binaire)**. Elle renvoie la tension en tenant compte du GAIN sélectionné. Le programme Arduino contient deux fonctions, **ConcentrationCO()** et **ConcentrationCO2()**, qui renvoient respectivement la mesure de concentration de COet de CO₂(??). Elles utilisent le principe de mesure décrit plus haut dans les parties « mesure de CO₂ » et « mesure de CO ». Dans un premier temps, la tension mesurée par l'adc aux bornes des résistances de mesure est convertie en courant par loi d'ohms (Eq(5)).

$$I_{mes} = \frac{U_{mes}}{R_{mes}} \quad (5)$$

Sachant qu'un courant de mesure de 4mA équivaut à une concentration de 0ppm et qu'un courant de mesure de 20mA équivaut à une concentration de 5000ppm, on déduit la relation 6.

$$C_{mes} = (I_{mes} - I_{0ppm}) \times \frac{5000ppm}{I_{5000ppm}} \quad (6)$$

$$\text{Au final on a : } C_{mes} = (I_{mes} - I_{0ppm}) \times \frac{5000ppm}{I_{5000ppm}} \quad (7)$$

```
float ConcentrationCO() {
    //transforme la mesure analogique en une valeur de ppm
    float mesure = ads.computeVolts(ads.readADC_SingleEnded(COPin));
    float mCO = 0;
    mCO = (mesure / R_CO - 0.004) * (5000 / 0.016);
    return mCO;
}

float ConcentrationCO2() {
    //transforme la mesure analogique en une valeur de ppm
    float mesure = ads.computeVolts(ads.readADC_SingleEnded(CO2Pin));
    float mCO2 = 0;
    mCO2 = (mesure / R_CO2 - 0.004) * (5000 / 0.016);
    return mCO2;
}
```

FIGURE 19 – Extrait du programme Arduino - Mesure des concentration de CO et CO₂

Les mesures de CO, CO₂, température, pression et altitude ainsi que la date sont enregistrées temporairement dans un tableau de float intitulé **Tab_Mesure[]** (figure 20)

```

// ----- Acquisition des mesures dans un tableau TabMesure -----

bmp280.getCurrentMeasurements(temperature, pressure, altitude);
RTC.readTime();

InitialiserTabMesure(Tab_Mesure);

Tab_Mesure[0] = temperature;
Tab_Mesure[1] = pressure;
Tab_Mesure[2] = altitude;
Tab_Mesure[3] = ConcentrationCO();
Tab_Mesure[4] = ConcentrationCO2();
Tab_Mesure[5] = RTC.yyyy;
Tab_Mesure[6] = RTC.mm;
Tab_Mesure[7] = RTC.dd;
Tab_Mesure[8] = RTC.h;
Tab_Mesure[9] = RTC.m;
Tab_Mesure[10] = RTC.s;

```

FIGURE 20 – Extrait du programme Arduino - Acquisition des données

4.1.4 Sauvegarde sur la carte SD

La nouvelle série de données disponible dans le tableau de mesure est ajoutée au fichier de mesure sur la carte SD par l'appel de la fonction **EcritureCarteSD()**(figure 21). Les données sont écrites selon les règles de syntaxe du format CSV : les mesures sont séparées par des virgules, et chaque série de mesure se finit par un retour à la ligne.

```

void EcritureCarteSD(double Tab[TAILLE_TABLEAU]) {
    donnee = SD.open("DONNEE/Data.txt", FILE_WRITE);

    //écriture des mesures
    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        donnee.print(Tab[i]);
        donnee.print(",");
    }

    //écriture de la date
    donnee.print(lround(Tab[5])); donnee.print("-");
    donnee.print(lround(Tab[6])); donnee.print("-");
    donnee.print(lround(Tab[7])); donnee.print(" ");
    donnee.print(lround(Tab[8])); donnee.print(":");
    donnee.print(lround(Tab[9])); donnee.print(":");
    donnee.print(lround(Tab[10]));
    donnee.println("");
    donnee.close();
}

```

FIGURE 21 – Extrait du programme Arduino - Fonction d'écriture sur la carte SD

Pour récupérer les données après une mesure, il faut retirer la carte SD. Pour cela il faut commencer par extraire le boîtier du sac à dos, puis dévisser les quatre vis de fixation du couvercle. Enlevez le couvercle, la carte SD est directement accessible sur le shield SD.

4.1.5 Transmission Bluetooth

La transmission Bluetooth se fait grâce au module Bluetooth qui utilise le port série (pin RX et TX). Uniquement trois données sont transmises par Bluetooth, à savoir la température, la concentration de COet la concentration de CO₂. Elles sont envoyées dans une trame de caractères dont la syntaxe est bien définie : chaque série de mesure se fini par une virgule et dans une même série, chaque mesure est séparée par un point-virgule.

```

void EnvoieBluetooth(double tab[TAILLE_TABLEAU]) {
    float a, b, c;
    a = tab[3]; b = tab[4]; c=tab[0];
    Serial.print(a);
    Serial.print(";");
    Serial.print(b);
    Serial.print(";");
    Serial.print(c);
    Serial.print(",");
}

```

FIGURE 22 – Extrait du programme Arduino - Fonction de transmission Bluetooth

4.1.6 Délai période d'échantillonnage

En fin de boucle, est placée une temporisation de T secondes, avec T la période d'échantillonnage souhaitée. Elle est fixée à 1 secondes. Il est possible de la diminuer, mais dans la mesure ou les changements de concentrations se font de manière progressive et lente (de l'ordre de quelques secondes), et sachant que le temps de réponse des capteurs est de 30 secondes, nous n'avons pas trouvé nécessaire de prendre plus de mesures.

4.2 Application Android

4.2.1 Fonctionnement de l'application

L'application Android permet de visualiser en direct les mesures de CO, CO₂et de température mesurées par le boîtier. Au lancement de l'application, nous observons l'interface d'accueil (figure 23) dont la partie supérieure permet de gérer l'état de connexion avec le système, tandis ce que la partie inférieure permet d'afficher les mesures.

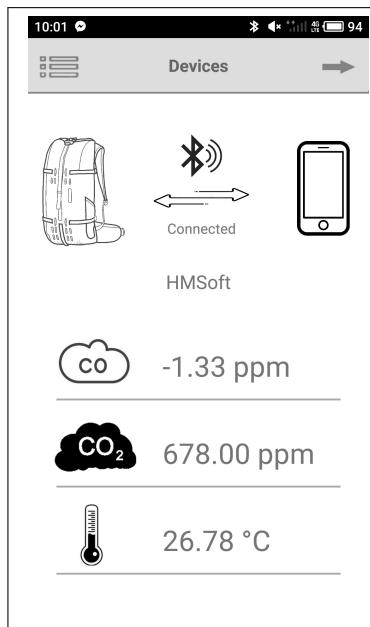


FIGURE 23 – Écran d'accueil de l'application CarbOnFire

Lors de la première mise en route du système, l'application demande l'accès à la localisation. Cette autorisation est nécessaire à la communication Bluetooth entre le smartphone et le CarbOnFire.

Au démarrage de l'application aucun appareil n'est connecté. Il faut appuyer sur le bouton « DEVICE ». Une liste déroulante s'affiche alors, au fur et à mesure que de nouveaux appareils disponibles sont découverts (figure 24).



FIGURE 24 – Écran de choix d'un appareil Bluetooth de l'application CarbOnFire

Lorsque l'utilisateur sélectionne un appareil, l'application tente de s'y connecter. L'utilisateur est notifié de cette tentative par un logo animé de chargement. À la fin du chargement, le nouvel état de connexion est affiché sur l'écran. Si la connexion est établie, les mesures s'affichent et sont rafraîchies dès qu'une nouvelle trame est reçue.

Si le système de mesure se déconnecte, l'application notifie le changement d'état dans un délai de 8 secondes.

4.2.2 Vision globale de l'organisation du code JAVA

Si vous n'êtes pas familier avec le codage d'application Android, les concepts et objets utilisés sont expliqués dans les grandes lignes. Si vous souhaitez en savoir plus, des liens vers le site Android Devlopeur² sont renseignés en note de bas de page.

L'application est composée de deux activités³ et de deux threads⁴. Les threads et les activités sont deux types de classes⁵ Java. En d'autres termes, ce sont deux types de code Java qui ont des rôles bien définis et différents. Dans le cadre du projet, les activités sont les piliers de l'application. Elles ont pour rôle principal de gérer les interactions entre l'utilisateur, l'interface graphique et la logique de l'application. Ce sont en quelques sorte les chefs d'orchestre de l'application. Les threads quant à eux, contiennent du code qui s'exécute en parallèle des activités. Ils n'interagissent pas avec l'interface graphique et permettent de faire tourner un code annexe en parallèle de l'exécution de l'activité courante. Ils sont souvent utilisés pour exécuter des fonctions bloquantes en arrière-plan sans que l'interface graphique ne soit figée.

Le fait d'appartenir à une classe, permet de définir une fois pour toute des fonctions partagées par plusieurs codes de même nature. Prenons l'exemple de la classe activité. Dans la classe Activité, des fonctions sont déjà implémentées pour faciliter le codage de l'activité. On retrouve

2. lien du site : <https://developer.android.com/>

3. définition d'une activité : <https://developer.android.com/reference/android/app/Activity>

4. définition du thread : <https://developer.android.com/reference/java/lang/Thread>

5. définition d'une classe Java : <https://developer.android.com/studio/write/create-java-class>

entre autres, des fonctions dites callback⁶ qui exécute un code, écrit par le développeur, à la suite d'un événement particulier. Par exemple la fonction `onCreate()` exécute un code, au lancement de l'activité.

Dans notre application, la première activité, **MainActivity**, gère l'interface principale qui est l'interface d'accueil où sont affichés l'état de connexion et ainsi que les dernières mesures reçues. La deuxième activité, **ActivityDevice**, gère l'interface de choix d'un appareil Bluetooth.

Pour ce qui est des threads, l'un d'eux, appelé **ConnectThread**, sert à effectuer une tentative de connexion avec un appareil Bluetooth. L'autre, **MyBluetoothService**, sert à assurer la communication Bluetooth avec un appareil connecté. Il reçoit les trames de mesures et les envoie à l'activité principale.

4.2.3 Scénario général de l'application

Au démarrage de l'application, la code de la **MainActivity** s'exécute et l'utilisateur voit s'afficher l'écran d'accueil. Lorsque l'utilisateur appuie sur le bouton « DEVICE », il lance une nouvelle activité, l'activité **ActivityDevice**. Le lancement de la nouvelle activité s'accompagne d'un changement d'interface graphique. L'écran de choix d'appareil bluetooth est affiché. L'**ActivityDevice** débute dès son lancement par scanner les appareils Bluetooth visibles, et les affiche sur la liste au fur et à mesure de leur découverte. L'utilisateur peut sélectionner un appareil de la liste. Lorsqu'il le fait, l'**ActivityDevice** mémorise l'appareil sélectionné et le transmet à l'activité principale. L'**ActivityDevice** est alors arrêtée et l'utilisateur revient dans l'activité principale sur l'écran d'accueil.

Si l'utilisateur a choisi un appareil, l'**ActivityMain** démarre une tentative de connexion avec cet appareil. Elle utilise pour cela un thread **ConnectThread**. Le thread communique avec la **MainActivity** par le biais d'un objet **Handler**⁷ qui a le rôle de messager. Il permet l'échange d'informations entre les deux entités. En attendant des nouvelles du **ConnectThread**, l'**ActivityMain** continue de tourner normalement. Si un message informant le succès de la connexion avec l'appareil souhaité est reçu par l'activité, le **ConnectThread** est arrêté, et un nouveau thread, **MyBluetoothDevice** est lancé. Ce thread reçoit les séries de caractères envoyées par l'appareil Bluetooth couramment connecté. Il les transmet à la **MainActivity** dans des messages envoyés via le **Handler**. Ces séries de caractères sont recomposées par la **MainActivity** puis décodées pour en extraire les valeurs des mesures et les afficher.

Si la communication Bluetooth est interrompue, le thread **MyBluetoothService** informe la **MainActivity** qui arrête le thread **MyBluetoothService** et notifie l'utilisateur.

6. définitions d'une callback : <https://developer.android.com/reference/javax/security/auth/callback/Callback>

7. définition d'un handler : <https://developer.android.com/reference/android/os/Handler>

5 Construction du système

Comme nous l'avons évoqué au début, le système est composé de quatre éléments installés sur le sac à dos : les batteries, la pompe, le compteur à gaz et le boîtier de mesure. Le sac à dos comporte deux étages. Sur le premier étage est placée la pompe, vissée sur la plaque, et la batterie, maintenue par un élastique. Sur le deuxième étage est fixé le compteur à gaz. La fixation du boîtier de mesure n'est pas encore définie. Pour les tests, il est scotché sous la plaque du deuxième étage.

Les batteries sont des batteries de Plomb 12V rechargeable de 7 A.h. Chaque système est équipé de deux batteries qui alimentent la pompe et le boîtier de mesure. L'autonomie du système est d'environ 7 heures.

5.1 Organisation du boîtier de mesure

Le boîtier est organisé en deux parties délimitées par une cloison en PVC horizontale. La partie inférieure est un SAS dans lequel circule le flux d'air. Les capteurs de gaz et le BMP280 sont situés dans ce SAS pour baigner dans l'air extérieur. Les deux embouts du conduit d'air sont placés face à face, et les capteurs de gaz sont légèrement décalés par rapport au flux d'air.

La partie supérieure du boîtier accueille le montage électrique. On y retrouve les cartes des capteurs, le Shield SD monté sur la carte Arduino Uno, le module Bluetooth, l'ADC, le bornier, les connections du panneau de face avant, ainsi que tous les câbles de connexions entre chacun des ces éléments.

Sur la face avant du boîtier, on retrouve les éléments de contrôle d'alimentation (figure 25).

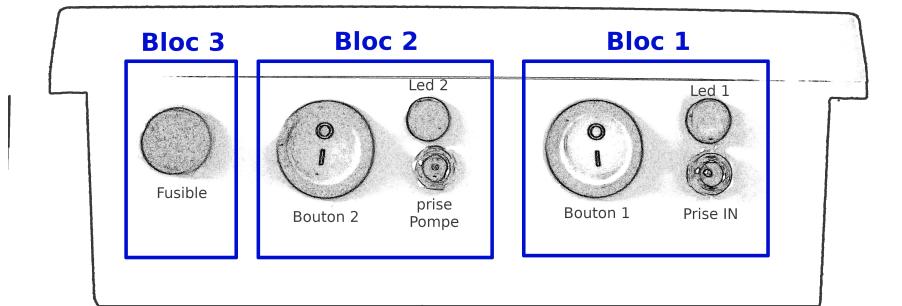


FIGURE 25 – schéma du panneau avant du boîtier de mesure

Le bloc 1 sert à alimenter le système de mesure. Il est constitué d'un bouton ON/OFF, d'une prise d'alimentation CC 12 V et d'un voyant vert. Le voyant s'allume lorsque le système de mesure est en marche.

ATTENTION Le bloc 2 est HORS-SERVICE, il NE faut PAS l'utiliser en l'état. Il devait servir à alimenter la pompe. Il est constitué des mêmes éléments que le bloc 1, à savoir un bouton, un voyant et une prise CC. Malheureusement suite aux premiers tests plusieurs problèmes nous ont contraint à ne pas l'utiliser. Pour plus d'information sur le sujet, veuillez vous référer à la dernière partie **Conclusion et Perspectives**

Le bloc 3 est constitué d'un porte-fusible qui protège le système de mesure d'une éventuelle surcharge. Il accueille un fusible de 500 mA changeable facilement depuis l'extérieur.

5.2 Construction des éléments mécaniques du boîtier

Le boîtier est présenté tel qu'il a été conçu initialement. Des modifications sont à prévoir en fonction des pistes d'améliorations discutées dans la partie **Conclusion et Perspectives**

5.2.1 Perçage du boîtier

Le boîtier est percé en face avant pour accueillir les éléments du panneau avant : boutons, LED, prises et porte-fusible. Les cotations sont indiquées sur la figure 26

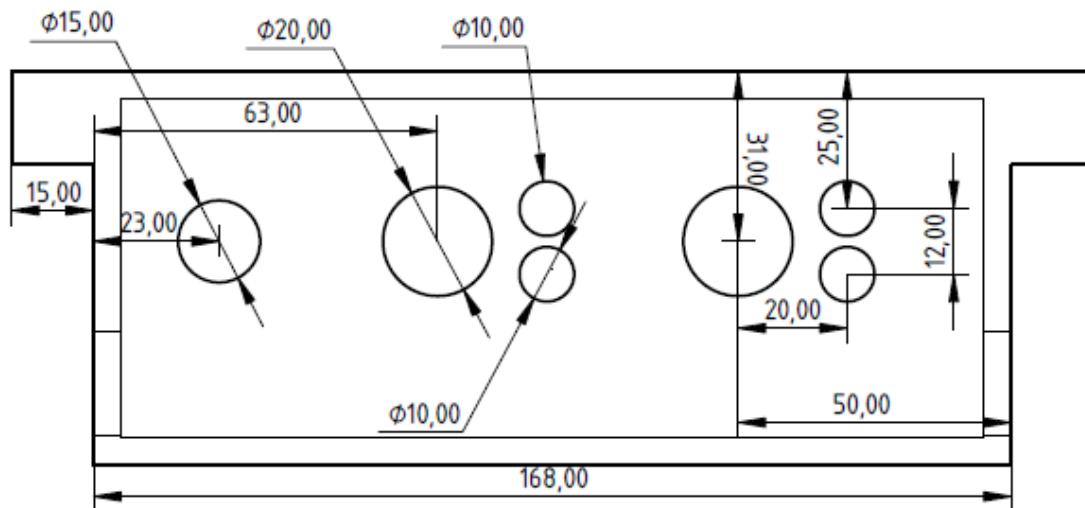


FIGURE 26 – Cotations de perçage de la face avant du boîtier

Le boîtier est aussi percé sur les cotés pour accueillir les connexions rapides des tuyaux. Les cotations des de perçage sont indiquées sur la figure 27.

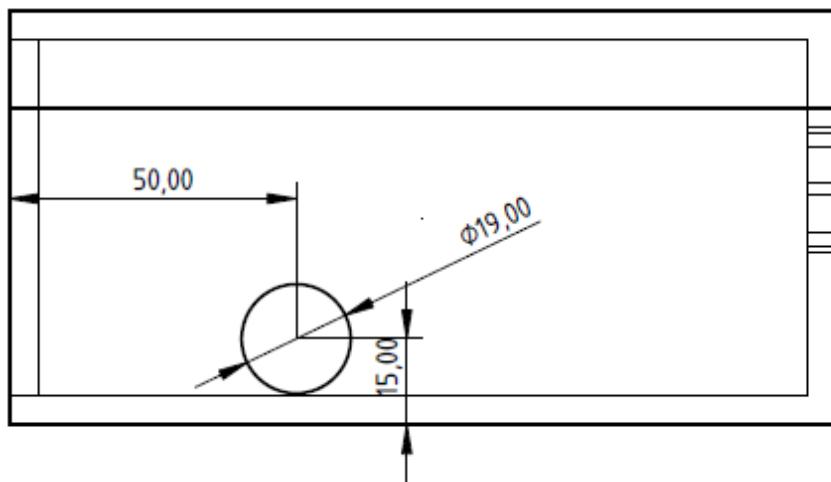


FIGURE 27 – Cotations de perçage de la face gauche du boîtier

Le boîtier est percé au fond pour fixer les supports (citations figure 28)

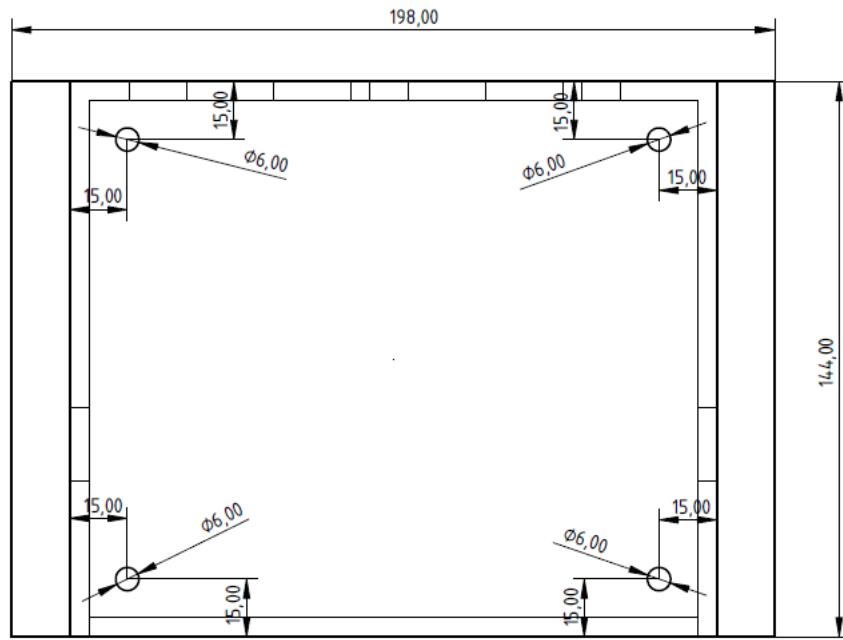


FIGURE 28 – Cotations de perçage de la face du dessous du boîtier

5.2.2 Cloison horizontale

La cloison horizontale figure (29) est fabriquée à partir d'une grande plaque de PVC épaisse de 3 mm.

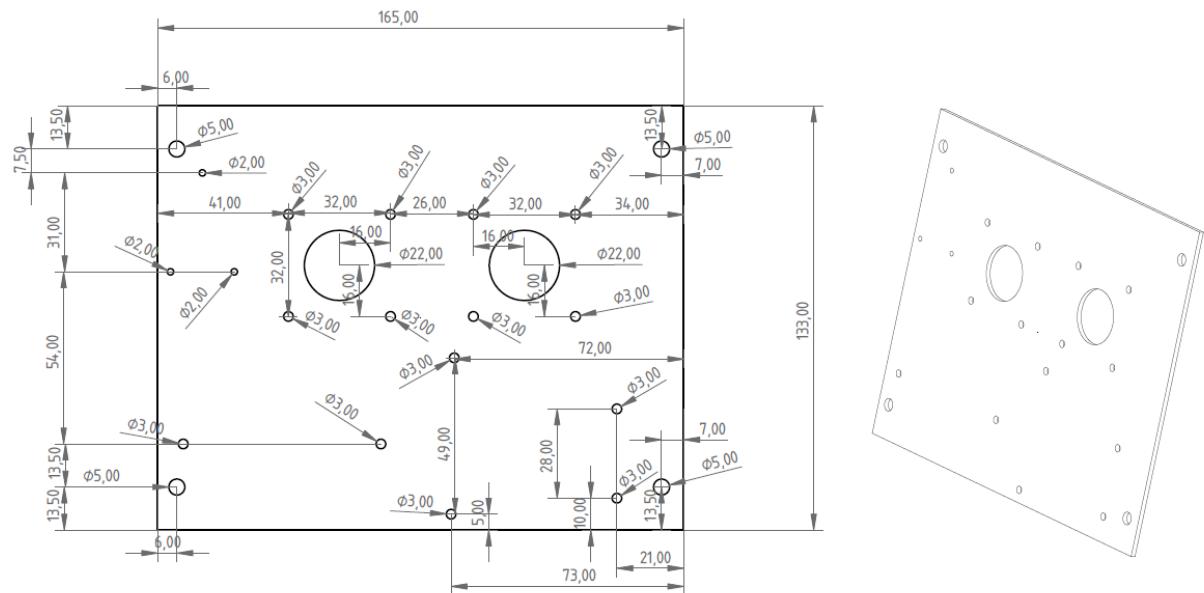


FIGURE 29 – Cotations de perçage de la cloison

La cloison est supportée par deux piliers longitudinaux (figure 30). Les piliers sont fixés par des vis M3 avec le fond du boîtier et par des vis M5 avec la cloison.

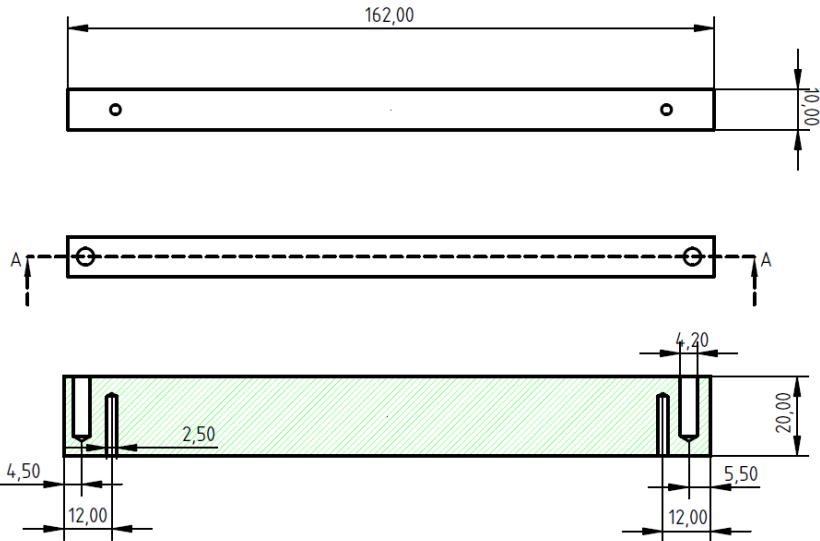


FIGURE 30 – Cotations de perçage des piliers de la cloison

Les trous des vis sont filetés. Pour réaliser ces trous, il faut percer le pilier avec les cotations indiquées sur le schéma 30. Puis il faut tarauder le trou avec des tarauds M3 ou M5.

5.2.3 Panneau avant

Les éléments du panneau avant (figure 25) sont insérés dans leurs trous respectifs puis fixés par deux méthodes différentes. Les boutons sont uniquement clipsés, tandis ce que les autres éléments sont serrés sur la paroi par un système de vis-écrous.

5.3 Construction du Circuit électrique

5.3.1 Soudure sur le Shield SD

Le shield SD contient une zone libre pour faire des soudures. Pour le système, deux ports Grove y sont soudés. Le premier permet la connexion I2C avec les capteurs, tandis ce que l'autre permet la connexion UART avec le module Bluetooth. Le pas de la plaquette de soudure du shield est de 2.54 mm, alors que le pas du connecteur Grove n'est que de 1.2 mm. Pour cette raison il est nécessaire de plier légèrement les pattes du connecteur pour les insérer dans la plaquette de soudure.

Les deux connecteurs sont placés l'un en face de l'autre comme montré sur la figure 31. Les connexions avec les pins de la carte arduino sont effectuées sur la face arrière.

5.3.2 construction du PCB

Les circuits électriques extérieurs aux différentes cartes sont installés sur un PCB conçu spécialement pour le projet (figure 32). Il est composé d'un bornier de 14 fils, de deux ports Grove I2C, d'une fiche de connexion pour l'adc adafruit, de deux connecteurs molex pour le capteur de CO₂ et celui de CO₂, et une prise CC d'alimentation 12 V pour la carte Arduino.

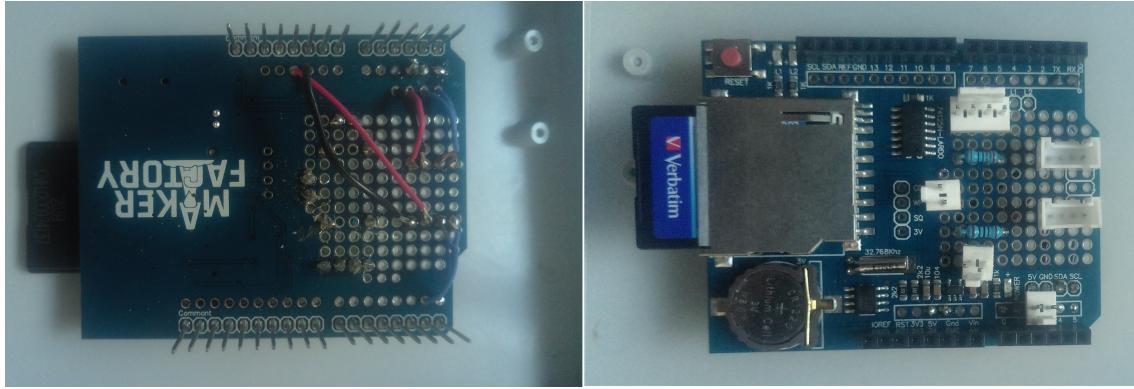


FIGURE 31 – Image soudure shield SD

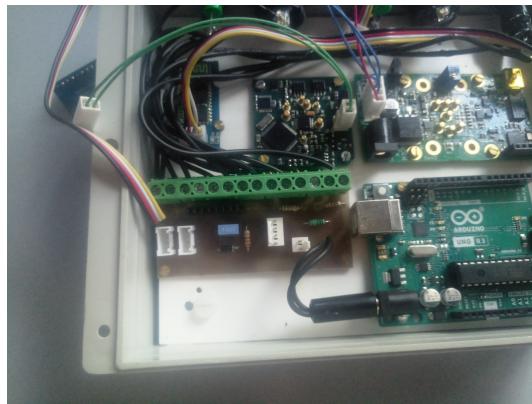


FIGURE 32 – photo PCB

Le bornier sert à connecter les 7 dipôles du panneau de mesure. Les deux connecteurs Grove I2C sont connectés ensemble. L'un d'eux sert à connecter le BMP280, l'autre sert à connecter l'ensemble du bus I2C à la carte arduino. Le connecteur molex 4-pin est utilisé pour connecter le capteur de CO₂. Le circuit de mesure présenté dans la partie mesure de CO₂ est imprimé sur le PCB. Le connecteur molex 2-pin est utilisé pour connecter le capteur chimique de CO. Le circuit de mesure présenté dans la partie mesure de CO est également imprimé sur le PCB.

L'adc adafruit vient se brancher dans une fiche de connexion 8 pins. Seules les 8 premières broches de l'adc y sont insérées, laissant ainsi non connectées, les voies A2 et A3 de l'adc. Le PCB contient le circuit électrique permettant d'une part de connecter l'adc au bus I2C et d'autre part de connecter les voies 0 et 1 aux tensions de mesure des capteurs de CO et CO₂. Le schéma électrique, le masque du PCB ainsi que le schéma de soudure sont présentés figure 33.

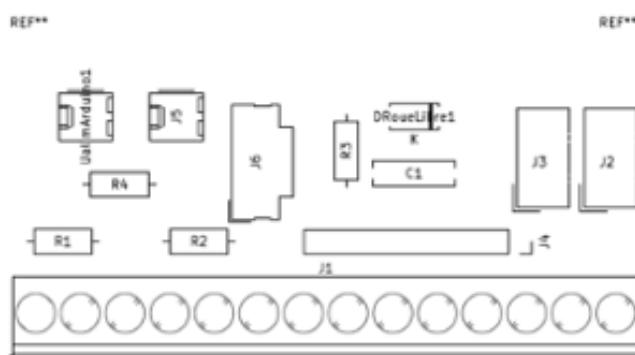
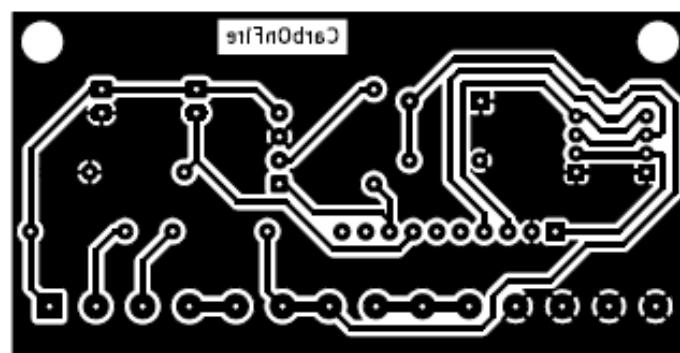
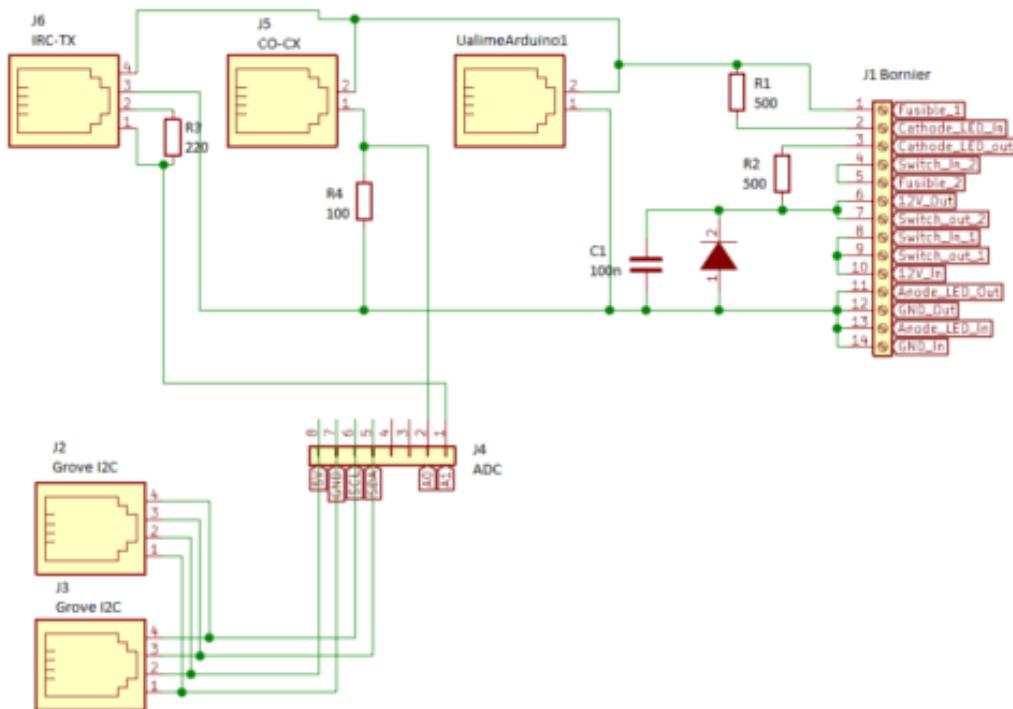


FIGURE 33 – circuit électrique, schéma de soudure, masque PCB

5.3.3 Câbles de connexions

Pour assurer les connexions entre les éléments, 3 types de câbles sont utilisés. Les câbles présents entre le panneau avant et le bornier de connexion du PCB, sont des câbles à plusieurs brins, coupés sur mesure. Les câbles Grove sont des câbles de taille standard pré-assemblés. Les câbles molex sont des câbles à sertir. Ils doivent être assemblé avant de pouvoir être utilisés. Ils sont composés de 3 pièces détachées : les fils, les boîtiers de connecteurs et les contacts à sertir. Il faut dans un premier temps sertir les contacts sur les fils, puis engager les contacts dans les boîtiers de connecteurs. Faites attention au sens de connexion des câbles, les boîtiers de connections ne sont pas symétriques.

5.3.4 Câblage des éléments électriques

Une fois que tous les éléments sont prêts, il faut les brancher. Le mieux est de commencer par le panneau avant. Les câbles du panneau avant sont soudés sur les broches de connexion de chacun des éléments du panneau. Les autres extrémités des fils sont insérés dans leurs emplacements respectifs dans le bornier puis vissés. La taille de chaque câble est ajustée sur mesure pour limiter le volume de câble dans le boîtier. Le détail des connexions du bornier est présenté figure 33

Les deux bornes des boutons et du porte-fusible sont équivalentes, il n'y a pas de sens de connexion. En revanche pour les led et les prise d'alimentation, il faut repérer la nature des bornes. Pour les led, une inversion des bornes n'impactera pas le système, mais la led ne s'allumera pas. Pour les prises d'alimentation, un inversion des bornes peut endommager le système. Le descriptif des broches des prises d'alimentation est présenté figure 34.

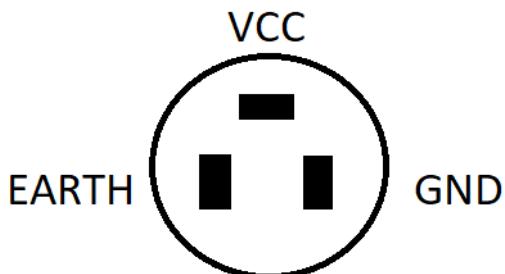


FIGURE 34 – schéma borne prise CC

Une fois que le bornier est connecté au panneau de face avant, il faut connecter les capteurs. Les deux câbles molex, doivent être connectés chacun sur leur capteur respectif. Un câble Grove I2C est branché entre le capteur de BMP280 et un des ports I2C du PCB. L'autre câble Grove I2C est connecté entre le deuxième port I2C du PCB et le port I2C soudé sur le shield SD. Le connecteur CC du PCB est connecté au port jack de l'arduino. L'adc est encastré dans les fiches de connexion qui lui sont dédiées en laissant les pâtes des voies A2 et A3 non connectées. Enfin le connecteur Grove UART du module Bluetooth est branché sur le port UART soudé sur le shield SD (figure 35).

5.4 Assemblage du boîtier

Les composants électriques sont fixés sur la cloison par un système de vis écrou. Ils sont tous fixés sur la face supérieure de la cloison à l'exception du BMP280 qui est fixé sous la cloison. Le BMP280 et le module Bluetooth sont fixés de part et d'autre de la cloison par les trois mêmes vis.

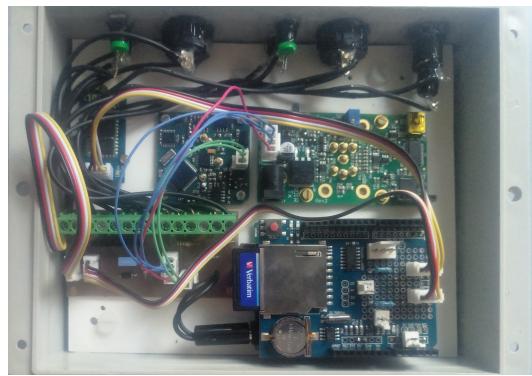


FIGURE 35 – Photo du branchement final

La cloison est fixée sur ses piliers par 4 vis M5 en polyester. Les piliers sont fixés au boîtier par 4 vis M3

5.5 Conseils d'ordre de construction

Pour la construction du boîtier, il est nécessaire de commencer par la fabrication séparée des éléments mécaniques et électriques, à savoir le perçage du boîtier, la fabrication de la cloison et de ses supports, l'impression du PCB et le soudage des connecteurs Grove sur le Shield SD. Ensuite, il est conseillé de suivre l'ordre d'assemblage suivant :

1. Fixez les piliers avec le boîtier, en mettant sous le pilier, et surtout au niveau des deux trous, une couche de silicone pour assurer l'étanchéité de la fixation.
2. Fixez les embouts PLC traverse cloison sur les cotés du boîtier. Avant de serrer l'écrou, appliquer une couche de silicone en bordure du trou pour assurer l'étanchéité.
3. Installez les éléments du panneau avant et mettez une couche de silicone pour assurer l'étanchéité.
4. Soudez les fils de connexion sur les broches du panneau avant en prévoyant une large marge de longueur de fil.
5. Fixez les éléments électriques sur la cloison horizontale.
6. Branchez le module Bluetooth au Shield SD.
7. Fixez la cloison sur les piliers
8. Branchez les fils du panneau avant en les faisant passer derrière le module Bluetooth. Ajustez la longueur de chaque fil pour qu'il soit juste assez long pour atteindre son emplacement dans le bornier.
9. Branchez les autres câbles.
10. Placez le joint du boîtier dans la rainure du couvercle. Appliquer un point de silicone à la jonction des deux bouts de joints.
11. Fermez le boîtier avec les 4 vis cruciformes.

6 Test et Mesure

6.1 Capteurs de CO

6.1.1 Test du capteur CO-CX avec la carte alphasense

Nous avons mesuré la réponse du système pour deux concentrations de CO connues, une concentration de 0 ppm et une concentration de 92 ppm. Les mesures ont été réalisées pendant une période de forte chaleur, la température à l'intérieur du boîtier a atteint 40°C. Cette température peut impacter à ± 5 ppm les résultats présentés.

Pour la concentration de 0 ppm, la concentration initiale dans l'air ambiant de la salle de mesure est de 15 ppm. L'air injecté dans le boîtier a une concentration en CO de 1 bpm, bien inférieure au bruit du capteur ± 0.5 ppm. La figure 36 présente les résultats obtenus pour un débit d'air de 1 l/min.

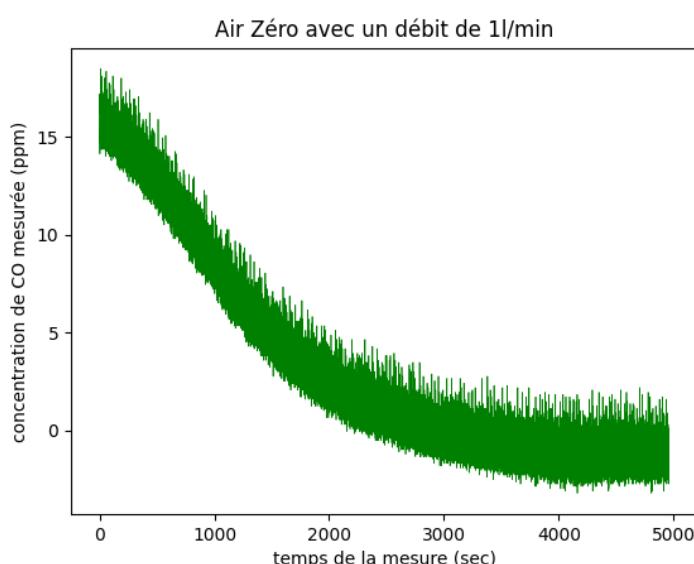


FIGURE 36 – Réponse du capteur CO-CX à une concentration de 0 ppm de CO

La mesure du zéro se stabilise légèrement en-dessous de 0 ppm, à environ -2 ppm. Cela peut venir de plusieurs paramètres : la dérive en température ou le mauvais étalonnage du capteur. On peut remarquer que le bruit de mesure est de ± 3 ppm. Cela correspond aux spécifications attendues qui sont de ± 3 ppm. Le temps de réponse du capteur est très long, on doit attendre entre 30 minutes et 1 heure pour obtenir un zéro stable. Le constructeur ne s'est pas avancé sur le temps de réponse à 0 ppm, mais ce temps de réponse est du même ordre de grandeur que celui du capteur de CO₂. La géométrie du système, et en particulier à l'écartement du capteur par rapport au flux d'air, peut également augmenter le temps de réponse.

La deuxième concentration étudiée est de 92 ppm. La concentration initiale dans le boîtier est de -2 ppm. L'air est injecté dans le boîtier avec un débit de 9.7 l/min. Les résultats sont présentés figure 37

La précision de la mesure est du même ordre de grandeur que pour le 0 ppm, à savoir ± 5 ppm. Le temps de réponse est de 50 secondes alors que le constructeur annonçait un temps de réponse de 40 secondes pour une variation de 0 ppm à 400 ppm. Nous sommes au-dessus de ce temps de réponse, les hypothèses sur les raisons de ces écarts sont les mêmes que pour le 0 ppm, à savoir l'éloignement du capteur par rapport au flux d'air.

En résumé, la précision des résultats obtenues correspond à la précision attendue compte tenu des caractéristiques du capteur et de la carte de traitement du signal. La mesure est précise

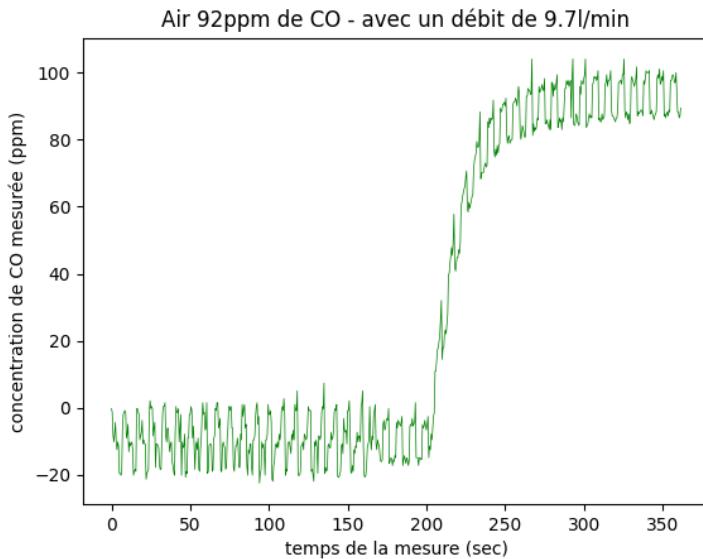


FIGURE 37 – Réponse du capteur CO-CX à une concentration de 92ppm de CO

à ± 5 ppm avec un bruit de mesure de ± 5 ppm. Le temps de réponse est plus important mais reste dans l'ordre de grandeur annoncé par le constructeur.

6.1.2 Test du capteur CO-CX avec la carte EVAL-CN0396-ARDZ

La figure 38 présente la comparaison des réponses des deux cartes de mesures équipées du même capteur CO-CX.

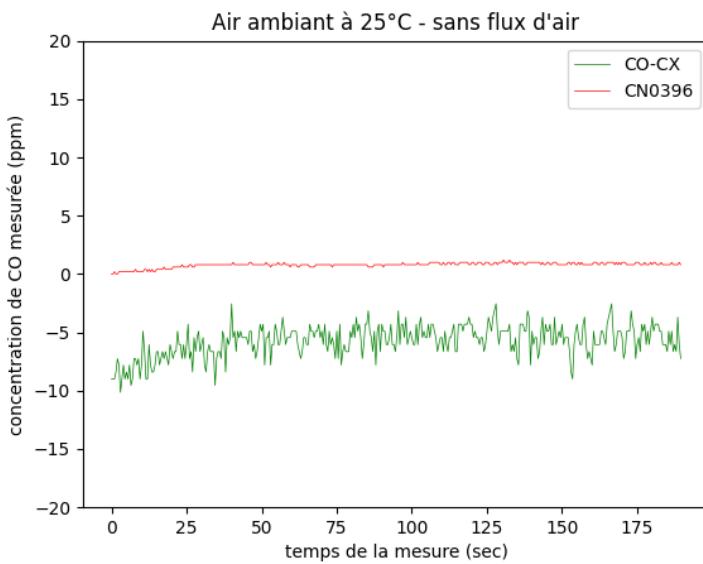


FIGURE 38 – Comparaison de la réponse de la carte CN0396 avec la carte alphasense

On voit clairement que la carte CN0396 fournit une réponse beaucoup plus stable (± 0.05 ppm). Pour conclure sur la précision de la carte, il faudrait effectuer des tests à concentrations connues comme présentés précédemment. Malgré tout, on peut faire l'hypothèse que la concentration de COen intérieure est très proche de 0 ppm. Dans le cadre de cette hypothèse, la précision de la carte Analog Device semble très bonne (± 2 ppm).

6.2 Capteurs de CO₂

Comme pour le capteur de CO, nous avons étudiés la réponse la carte IRC-TX couplée avec le capteur IRC-A1 pour deux concentrations de CO₂ : 0 ppm et 1000 ppm.

Pour le 0 ppm, nous utilisons une bonbonne qui fixe le CO₂ de l'air ambiant. La concentration ainsi obtenue, est en toute vraisemblance inférieure à 1 ppm, mais nous n'avions pas d'appareils de mesure permettant de le vérifier au moment de l'expérience. Nous en ferons donc l'hypothèse. Les mesures observées sont présentées figure 39

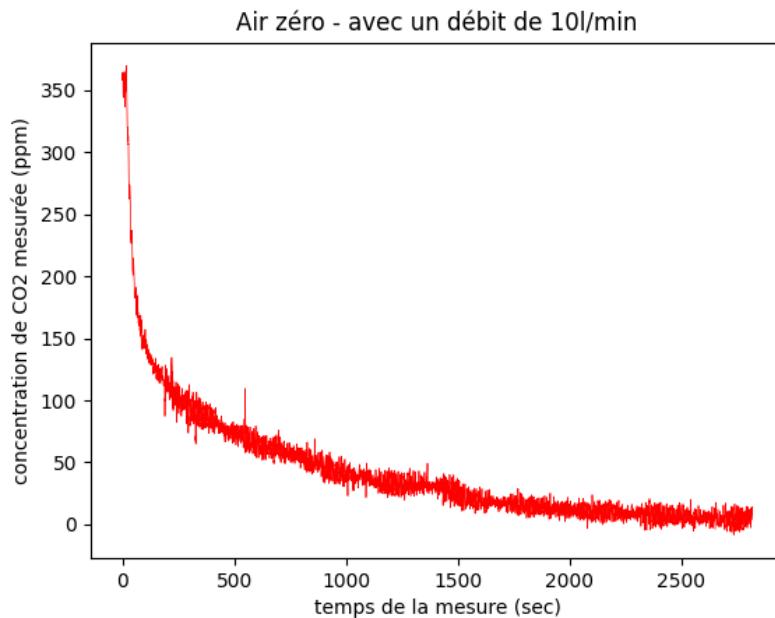


FIGURE 39 – Réponse du capteur IRC-A1 à 0ppm de CO₂

On peut observer que la mesure se stabilise à 0 ppm \pm 10 ppm. Le temps de mesure est d'environ 40 minutes. Le constructeur assurait une précision de \pm 50 ppm et un temps de réponse de 30 minutes. La précision mesurée est en accord avec les spécifications du constructeur, en revanche le temps de réponse est un peu plus long. Ce délai est sans doute dû à la géométrie du système, comme nous en avons discuté pour le capteur de CO.

La mesure de 1000 ppm est faite avec une bouteille pressurisée de concentration 998 ppm \pm 0.1%. Elle est branchée directement sur le boîtier, le débit est réglé à 10 l/min. Les résultats sont présentés figure 40

On peut observer que la valeur de stabilisation est de 900 ppm \pm 10 ppm soit un écart de 100 ppm par rapport à la concentration réelle. Cet écart est en dehors des marges du constructeur, et n'est pas acceptable. Il faudrait effectuer un étalonnage du capteur pour corriger cette imprécision.

Le temps de réponse est d'environ 40 secondes. Il est légèrement supérieur aux 30 secondes prédictes par le constructeur. Une fois encore cet écart peut être dû à la géométrie du système. Nous n'avons pas mis en œuvre des solutions pour le réduire.

6.3 Impact du débit sur les mesures

Une des options pour améliorer le temps de réponse des mesures de gaz, est de placer les capteurs dans le flux d'air. Si cette option est appliquée, il faut prendre en compte l'impact de la vitesse du flux d'air sur les mesures ou réduire le flux d'air. En effet il semblerai que la vitesse du flux d'air ait une forte influence sur la mesure de CO₂ et une légère influence sur la

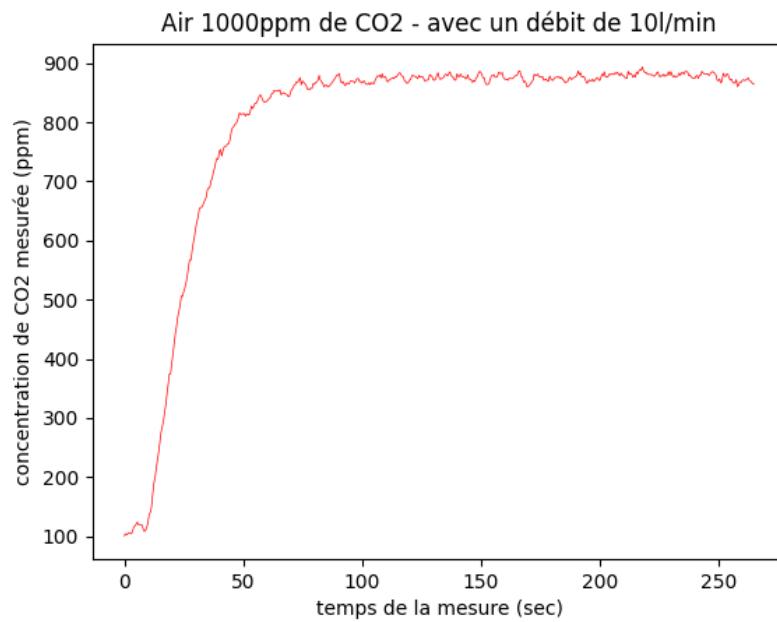


FIGURE 40 – Réponse du capteur IRC-A1 à 1000ppm de CO₂

mesure de CO. Pour effectuer cette observation, nous avons fait une série de mesure dans l'air ambiant avec la pompe éteinte et avec la pompe allumée. Les figures 41 et 42 présentent les résultats obtenus.

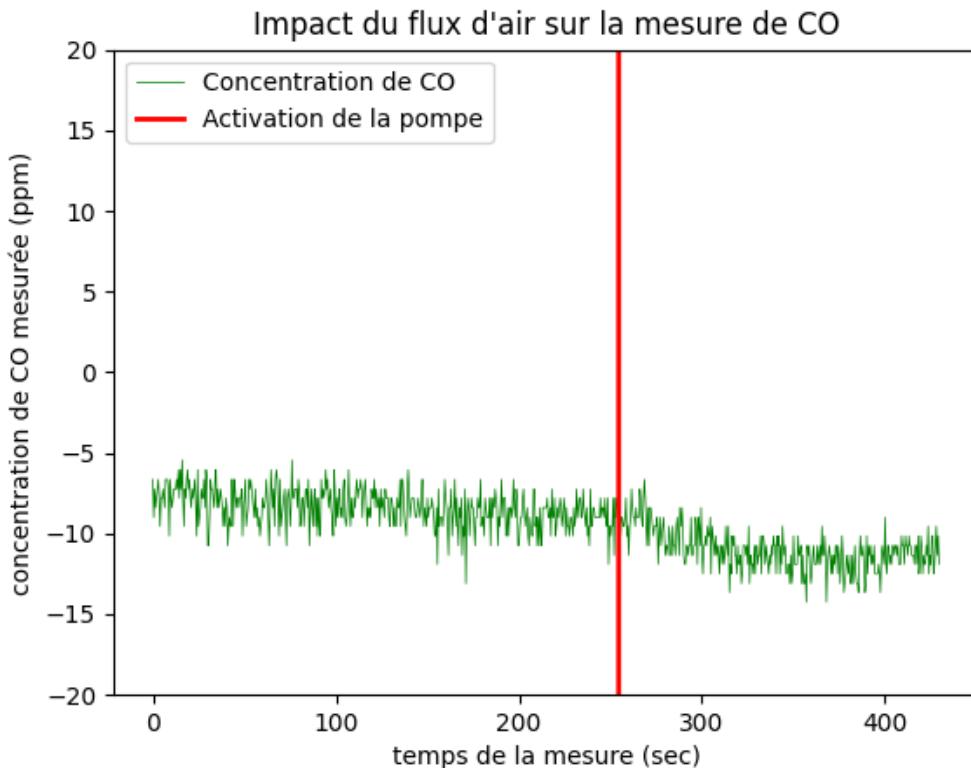


FIGURE 41 – Impact du flux d'air sur la mesure de CO

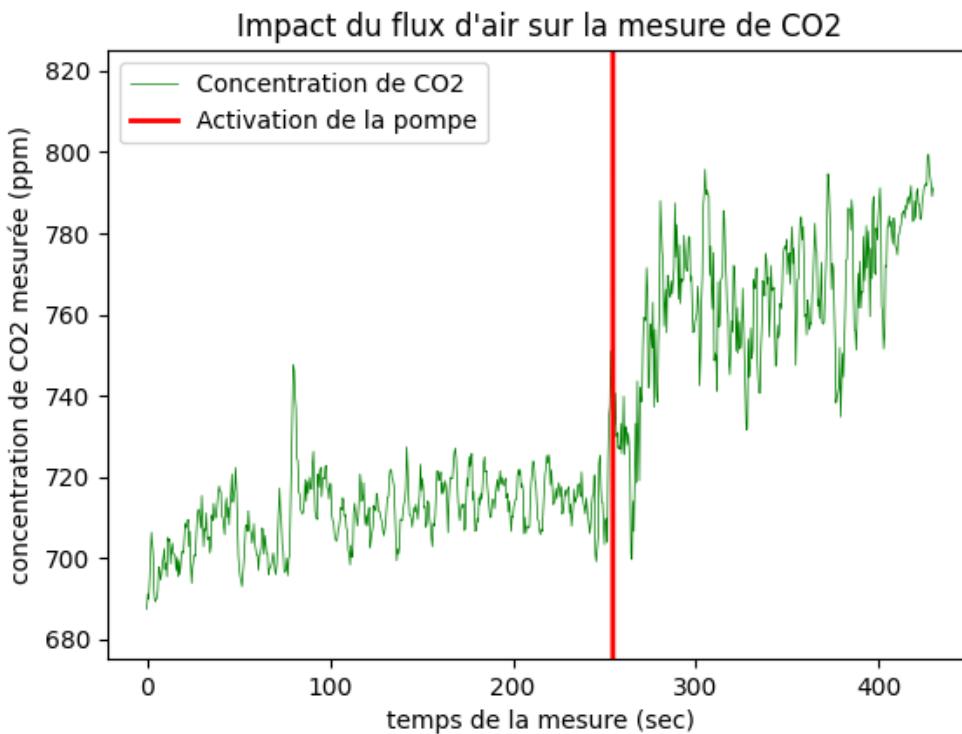


FIGURE 42 – Impact du flux d'air sur la mesure de CO_2

On observe que la mesure de CO décroît de 5 ppm lorsque la pompe se met en route, alors que la mesure de CO_2 augmente de 50 ppm. Pour les CO, ces variations semblent acceptables. Il faudrait vérifier que le phénomène ne s'amplifie pas pour des concentrations de CO plus élevées. La variation de la mesure de CO_2 est à la limite de l'acceptable, il faudrait étudier ce phénomène de manière plus rigoureuse de manière à corriger la dérive de la mesure.

6.4 Tests du système dans les conditions réelles

Pour valider le système, nous avons observé la réponse en conditions réelles du système et d'un autre capteur, le Q-Track. Le Q-Track était le capteur utilisé habituellement pour calculer les coefficients d'émission. Il fait l'acquisition des concentrations de CO, de CO_2 et de température. Contrairement au capteur CarbOnFire, il n'est pas équipé de système d'aspiration, il se comporte comme une sonde qui mesure localement les trois grandeurs physiques évoquées précédemment. Nous discuterons par la suite de l'impact de cette différence de conception sur les mesures.

Nous avons monté le capteur CarbOnFire sur le sac à dos et l'avons équipé d'un filtre de fibres de verre neuf. L'ensemble filtre/portefiltre (= zone d'aspiration) a été fixé au bout d'une perche de 1.5 m. La sonde du capteur Q-Track a été scotchée avec le porte-filtre pour s'assurer que les deux capteurs soient soumis aux mêmes concentrations pendant les mesures.

Les expériences ont été menées sur des combustions de deux natures différentes : un feu de brindilles vertes, et un moteur à explosion essence. Sur les figures 43 et 44, on observe deux pics rapprochés entre $t = 200s$ et $t = 800s$, suivis d'un pic solitaire à $t = 1100s$. Les deux premiers pics correspondent à l'expérience en présence de feu de brindilles tandis que le dernier pic correspond à l'expérience dans les gaz d'échappement d'un moteur essence.

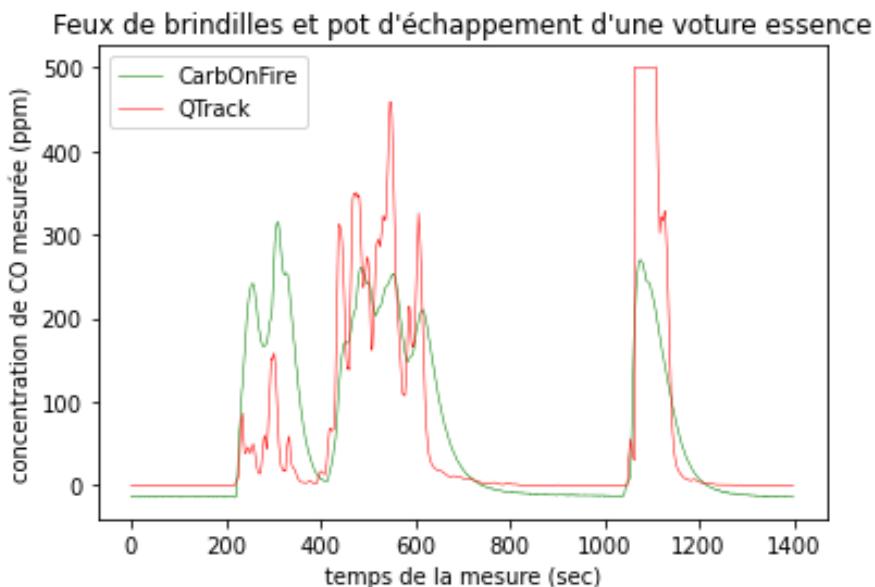


FIGURE 43 – Comparaison des mesures de CO obtenues avec le Q-Track et le CarbOnFire

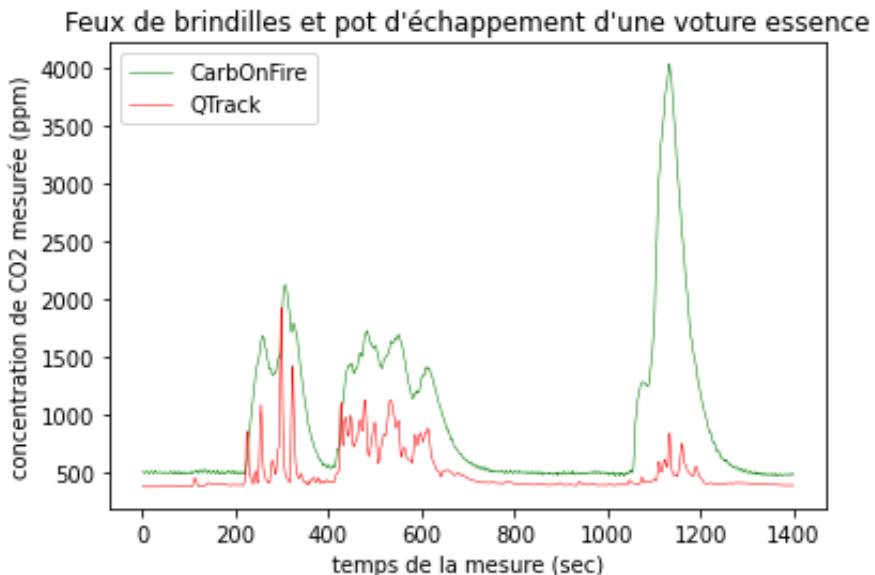


FIGURE 44 – Comparaison des mesures de CO₂ obtenues avec le Q-Track et le CarbOnFire

Ces deux courbes mettent en évidence l'inertie du système CarbOnFire en comparaison avec le capteur Q-Track. Le réponse du CarbOnFire est plus lissée avec moins de fortes variations et admet un retard d'une dizaine de secondes. Ces deux phénomènes sont dûs aux dimensions du boîtier et à la longueur de tuyau entre le boîtier et le porte-filtre. Sachant que le boîtier a un volume d'environ 1L et que le débit de la pompe est de 6L/min, on peut dire que l'air à l'intérieur du boîtier est renouvelé en moyenne toutes les 10 secondes. Ce temps de renouvellement explique le lissage des mesures et l'inertie du système. Le retard de la mesure est lié, d'une part au volume du boîtier et d'autre part à la longueur du tuyau acheminant l'air extérieur dans le boîtier. Pour les expériences, le tuyau mesurait 3m de longueur pour un diamètre intérieur de 9.5mm. Sachant que le flux d'air est de 6L/min, l'air parcourt le tuyau en environ 3 secondes. Le retard total de la mesure est donc de $3 + 10 = 13$ secondes.

Une autre observation importante réside dans la différence des valeurs mesurées par le Q-Track et le CarbOnFire. A l'équilibre, pour des mesures dans l'air ambiant sans fumées, les

deux systèmes accusent une différence de mesure entre eux de 10 ppm pour le CO et de 100 ppm pour le CO₂. Le capteur de CO du CarbOnFire est mal étalonné, il affiche une concentration de négative de -10 ppm dans l'air ambiant. Le Q-Track en revanche indique une concentration de 0.0 ppm dans l'air ambiant, ce qui est cohérent. Pour le CO₂, il est plus difficile de définir sans test complémentaire, lequel des deux capteurs est le plus proche de la concentration réelle. Le Q-Track indique une concentration de 380 ppm dans l'air ambiant, alors que le CarbOnFire indique 500 ppm. La moyenne de CO₂ dans l'atmosphère est d'environ 420 ppm, mais peut-être localement et ponctuellement plus élevée. D'autre part, le capteur CarbOnFire a été étalonné un mois avant les mesures alors que la date du dernière étalonnage du capteur Q-Track n'est pas connues, mais est sans doute largement supérieure à un mois. L'étalonnage du capteur CarbOnFire avait montré que la réponse du capteur était de 900 ppm pour une concentration réelle de 1000 ppm. Il serait étrange que l'erreur de mesure du CarbOnFire qui était de -100 ppm un mois plus tôt, se soit inversée pour atteindre +100 ppm. Néamoins il faudrait effectuer des tests complémentaires à concentrations connues pour caractériser la réponse des deux capteurs et s'assurer de leur véracité.

Les mesures obtenues pendant les cycles de combustions sont différentes entre le Q-Track et le CarbOnFire. On observe des profils de variations semblables, mais les valeurs moyennes sont différentes : $\Delta C_{moy,brindilles} = 500 \text{ ppm}$; $\Delta C_{moy,moteur} = 1500 \text{ ppm}$. Plusieurs pistes d'explications sont envisageables. La première est le mauvais étalonnage d'un ou des deux capteurs comme nous en avons discuté pour la mesure de l'air ambiant. La deuxième piste de discussion est le fait que le CarbOnFire aspire l'air extérieur contrairement au Q-Track. Cela rend le Q-Track très dépendant du positionnement de sa sonde et très sensible aux variations locales de concentration. A l'inverse le CarbOnFire aspire une partie des fumées qui, une fois aspirées, se mélangent dans le boîtier et forme une fumée plus homogène.

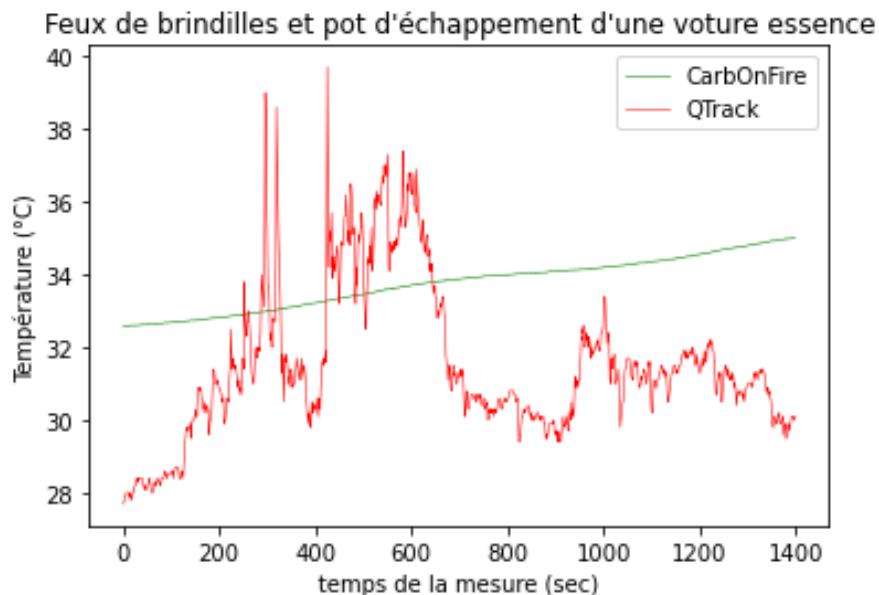


FIGURE 45 – Comparaison des mesures de températures obtenues avec le Q-Track et le CarbOnFire

La différence d'inertie entre les deux systèmes peut également s'observer sur la mesure de température figure 45. La réponse du Q-Track présente de plus fortes variations que la réponse du CarbOnFire qui augmente doucement. Contrairement aux mesures de COet de CO₂, la mesure de température du CarbOnFire ne redescend pas entre les mesures.

La figure 46 montre la réponse en pression du capteur CarbOnFire. La courbe est composée de deux paliers écartés d'environ 0.7 hPa. Cette écart s'est produit lors de la première

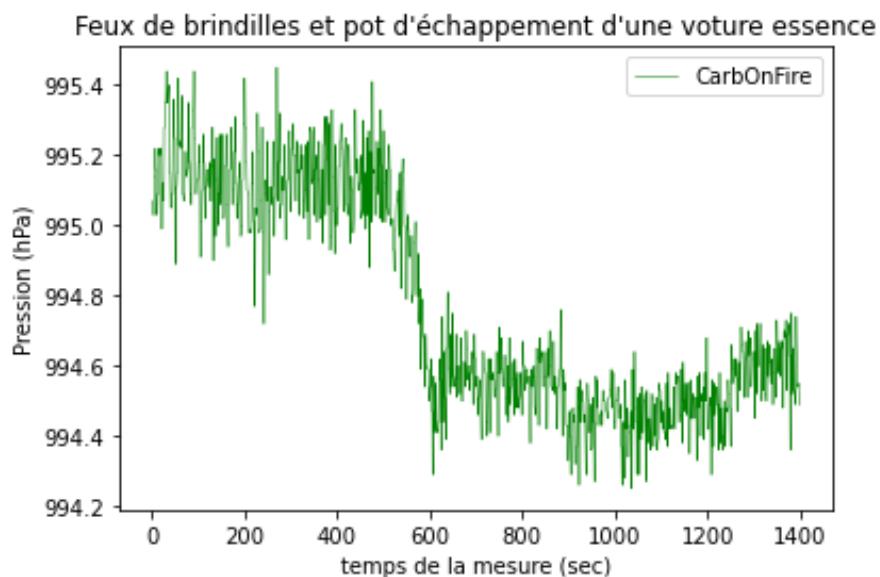


FIGURE 46 – Mesures de la pression dans le boîtier du CarbOnFire pendant les tests en conditions réelles

expérience. Cette diminution de pression peut s'expliquer par la charge du filtre en particules pendant la combustion des brindilles. Cela induit une très légère diminution du débit d'air en entré du boîtier et donc une baisse de pression à l'intérieur du boîtier.

7 Guide d'utilisation

7.1 Assemblage

Comme nous l'avons évoqué au début, le système est composé de quatre éléments installés sur le sac à dos : la batterie, la pompe, le compteur à gaz et le boîtier de mesure. Le sac à dos comporte deux étages. Sur le premier étage est placée la pompe, vissée sur la plaque, et la batterie, maintenue par un élastique. Sur le deuxième étage est fixé le compteur à gaz. La fixation du boîtier de mesure n'est pas encore définie. Pour les tests, il est scotché sous la plaque du deuxième étage.

Une fois que tous les éléments sont fixés, on peut brancher le circuit d'air. Le long tuyau équipé du porte-filtre à une extrémité, est branché par l'autre extrémité sur l'entrée de la pompe (figure 47).

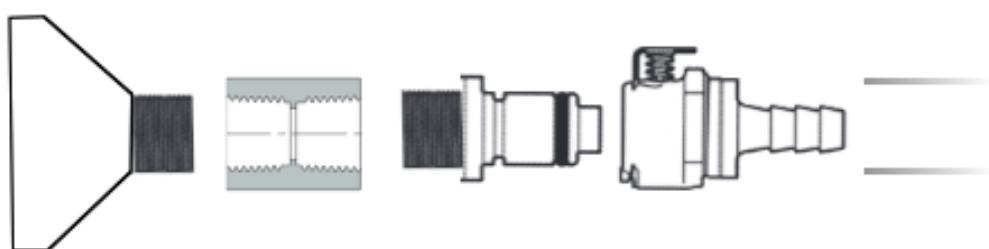


FIGURE 47 – Schéma d'assemblage du porte-filtre

La sortie de la pompe est branchée par un petit tuyau au connecteur gauche du boîtier de mesure (figure 48).

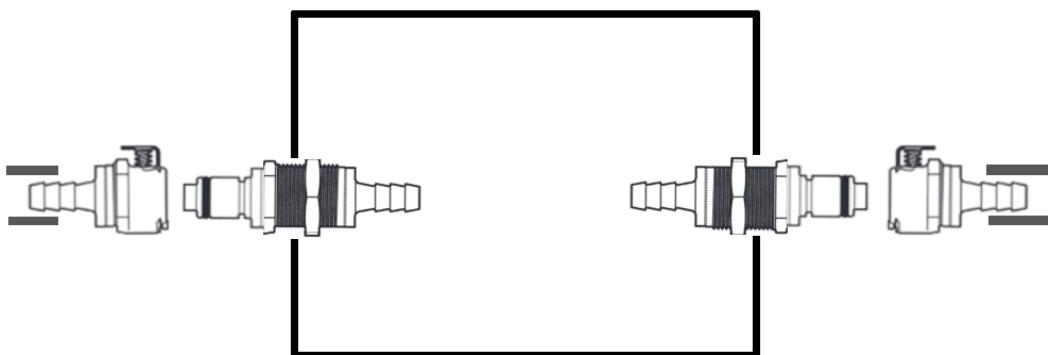


FIGURE 48 – Schéma d'assemblage du boîtier dans le circuit d'air

Enfin le connecteur droit du boîtier est branché à l'entrée du compteur à gaz.

7.2 Mise en route du système

Avant de mettre en route le système, il faut vérifier qu'il est bien branché. Un câble doit partir de la batterie et arriver sur la prise d'entrée d'alimentation du boîtier. C'est un câble cosse vers prise CC (figure 49).

Ensuite il faut brancher la pompe à la deuxième batterie. Pour cela on utilise le câble déjà soudé sur la pompe.

A ce stade, si vous actionnez le bouton ON/OFF du système de mesure, la led verte dois s'allumer. Cela signifie que le système de mesure est actif. Si vous actionnez l'interrupteur soudé sur le câble d'alimentation de la pompe (figure 50) la pompe dois s'allumer.



FIGURE 49 – Photo branchement alimentation boîtier

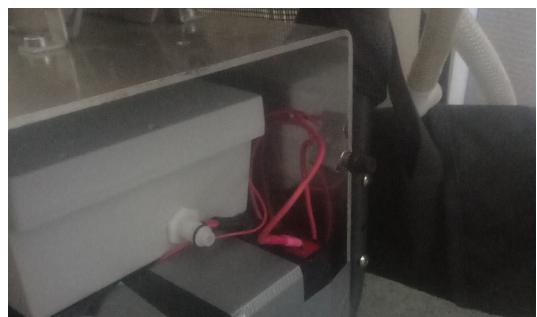


FIGURE 50 – Photo du bouton de démarrage de la pompe

7.3 Connexion avec l'application

Pour visualiser les mesures, vous pouvez télécharger l'application CarbOnFire. Pour cela, rendez-vous sur le github dont l'URL est en bibliographie (LEPETIT-AIMON 2021), le ReadMe de l'application contient toutes les instructions d'installations.

Lorsque vous lancez l'application pour la première fois, il vous est demandés la permission d'accès à la localisation. Cette autorisation est nécessaire pour le fonctionnement du Bluetooth. Il vous faut l'accepter sinon l'application ne marchera pas. Pour se connecter au boîtier, appuyez sur le bouton « DEVICE ». Une liste déroulante s'affiche avec les appareils Bluetooth détectés. Sélectionnez celui correspondant au boîtier. Par défaut, son nom est HC-SOFT. Attendez que la connexion se fasse. Dès que le système de mesure est connecté, les mesures s'affichent et se mettent à jour automatiquement.

7.4 Réglage de la RTC

Il est possible que la RTC se dérègle (plus de pile, dérive de l'heure avec le temps), il faut alors la remettre à l'heure. Pour ce réglage, il faut brancher à un PC le shield SD monté sur une carte Arduino uno. Il y a plusieurs options, soit vous branchez directement le carte arduino uno du système sans rien démonter, soit vous extrayez uniquement le shield SD du boitier et le monté sur une autre carte Arduino uno extérieur au boîtier. Il vous faut ensuite lancer le programme de calibration de la rtc disponible sur le github. Lisez le ReadMe associé pour plus de détail.

Si vous utilisez la carte Arduino du boîtier pour régler l'adc, n'oubliez pas de re-téléverser le programme principale sur la carte, une fois le réglage terminé.

7.5 Problème pouvant être rencontrés

Le boîtier n'est pas visible en Bluetooth : ouvrez le boîtier et vérifiez l'état de la led jaune du module Bluetooth (figure 51).

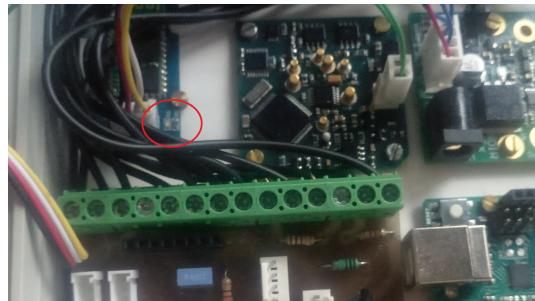


FIGURE 51 – Photo led jaune module Bluetooth

Si elle clignote, le problème vient du smartphone. Essayez de redémarrer l'application, puis si ça ne fonctionne pas, redémarrez votre téléphone. Si elle reste allumée, cela veut dire qu'un autre appareil Bluetooth est connecté au module. Vous pouvez essayer d'éteindre le boîtier et le rallumer pour réinitialiser le Bluetooth. Si elle est éteinte, cela veut dire qu'il y a un problème dans le branchement. Vérifiez que les câbles soient bien branchés (cf Chapitre 4 pour le détail des branchements).

Le boîtier est connecté en Bluetooth mais les mesures ne s'affichent pas : cela veut dire qu'il y a un problème dans l'initialisation du programme.

- vérifiez que la carte SD est correctement insérée.
- vérifiez que l'adc et le BMP280 sont correctement branchés (cf **5.Construction du système** pour le détail des branchements).

8 Remarques et Perspectives

Ce rapport présente la première version du système CarbOnFire, certaines problématiques restent encore à traiter, pour arriver à la version finale.

La première problématique concerne l'alimentation de la pompe. Le courant d'alimentation de la pompe est d'un ampère, et elle génère des parasites dans l'alimentation des capteurs si elle est alimenté par la même batterie. Or, pour assurer une bonne précision dans les mesures, l'alimentation des capteurs doit être stable. Pour éviter ce bruit, nous pouvons ajouté deux éléments en parallèle de la pompe. Le premier est une diode de roue libre. Elle empêche la propagation d'un courant inverse dû à l'inertie du rotor lors de l'arrêt de la pompe. Le deuxième est un condensateur de filtrage de 1 F, qui filtre les variations de tensions à haute et moyenne fréquence dû à la rotation du moteur. Nous pensions utiliser cette option, mais la piste de la diode de roue libre sur le PCB, s'est coupée. La cause de cette coupure n'est pas clairement déterminée, mais il est fort probable que la largeur de la piste soit sous dimensionnée par rapport au courant qui la traverse. L'autre solution serait d'alimenter la pompe avec une autre batterie, c'est celle que nous avons finalement utiliser pour faire les tests. Cette solution est simple mais peu optimisé, et alourdi le sac à dos.

La deuxième problématique réside dans les connecteurs CC jack d'alimentation 12V. Il s'est avéré que les connecteurs CC Male n'étaient pas exactement compatibles avec les prises CC utilisées sur le panneau avant. Le diamètre intérieur est plus large pour les prises mâles que pour les prises femelles. Le connecteur subit un petit jeu à l'intérieur de la prise qui induit un faux contact et une fragilité de la connexion mécanique (la câble s'enlève facilement). En revanche les connecteurs CC mâles sont de la bonne dimension pour alimenter le port CC de la carte Arduino Uno. L'idée serait donc de changer les prises CC pour des prises compatibles avec les connecteurs CC achetés. Une autre idée serait de changer complètement le type de connexion pour utiliser des connecteurs qui soient fixés à leur prise par un système mécanique (vis, clip, ...). Cela permettrait de rendre moins facile la déconnexion des fils par arrachage. La nature de ces connecteurs reste à déterminer. Si l'option des prises CC jack est maintenue, il faut penser à attacher au boîtier les parties des câbles proches des connexions. Cela permettrait de limiter le phénomène d'arrachage.

La troisième problématique est l'étanchéité du boîtier. Il est important d'assurer l'étanchéité du boîtier pour être sûr que le flux d'air d'un bout à l'autre du circuit d'air soit le même. En particulier il faut que le débit d'air mesuré par le compteur à gaz soit identique au débit d'air traversant le filtre à particule. Si ce n'est pas le cas, un biais de mesure est ajouté au calcul des facteurs d'émissions. Sur le prototype développé, la grande majorité du flux d'air ($>90\%$) est transmise d'un bout à l'autre du circuit d'air. Des petites fuites peuvent être observées au niveau du boîtier de mesure par les éléments du panneau avant malgré la couche de silicone. La fuite peut venir de la jonction ou du composant lui-même. En effet les boutons, les prises CC et le porte-filtre ne sont pas étanches. Les leds, en revanche, le sont, et elles n'induisent pas de fuite. Il faudrait peut-être utiliser d'autres éléments, conçus pour être étanche, ou essayer de mieux disposer la couche de silicone pour améliorer l'étanchéité.

La quatrième problématique concerne les capteurs de COet de CO₂. Comme nous l'avons vu dans les parties **mesure de CO/CO₂**, les mesures sont fortement bruitées et celle du CO₂est trop peu précise en haute concentration. Le ré-étalonnage des capteurs pourrait améliorer leur précision, mais il n'influerait pas sur le bruit de mesure. Il serait souhaitable d'approfondir la piste des alternatives existantes et notamment l'utilisation de la carte Analog Device pour le capteur de CO. Nous avons vu que pour la mesure du 0 ppm, elle était très précise et peu bruitée, il faudrait étudier son comportement pour des plus hautes concentrations. Pour le CO₂, le capteur cozir est une piste qui reste à explorer.

La cinquième problématique porte sur l'impact du débit sur la réponse des capteurs. Nous

avons vu que le débit du flux d'air impactait la mesure de COet surtout de CO₂. Pour corriger l'erreur induite par le flux d'air, il serait souhaitable d'effectuer l'étalonnage des capteurs au débit d'air utilisé dans le système, à savoir 10 l/min.

Enfin la sixième et dernière problématique traite de la fixation des éléments sur le sac à dos. La pompe et la batterie possèdent une fixation dédiée au niveau de l'étage inférieur et le compteur à gaz est fixé sur l'étage supérieur. La fixation du boîtier n'est pas encore prévue. Nous avions pensé installer deux rails sous l'étage supérieur pour y glisser le boîtier et le maintenir accrocher avec un système de sangle à scratch, qui empêcherai le boîtier de basculer vers l'arrière.

Annexe A

Datasheet du Capteur de Monoxyde de Carbone, CO-CX

Technical Specification



CO-CX Carbon Monoxide Sensor EN 50379 Compliant for Stack Gases



Figure 1 CO-CX Schematic Diagram

PATENTED



Top View

Bottom View

Side View

PERFORMANCE	Sensitivity	nA/ppm in 400ppm CO	55 to 100
	Response time	t ₉₀ (s) from zero to 800ppm CO	< 40
	Zero current	ppm equivalent in zero air	< ± 3
	Resolution	RMS noise (ppm equivalent)	< 0.5
	Range	ppm CO limit of performance warranty	2,000
	Linearity	ppm error at full scale, linear at zero and 800ppm CO	< ± 40
	Overgas limit	maximum ppm for stable response to gas pulse	4,000
LIFETIME	Zero drift	ppm equivalent change/year in lab air	< 0.2
	Sensitivity drift	% change/year in lab air, monthly test	< 6
	Operating life	months until 80% original signal (24 month warranted)	> 24
ENVIRONMENTAL	Sensitivity @ -20°C	% (output @ -20°C/output @ 20°C) @ 400ppm CO	50 to 85
	Sensitivity @ 0°C	% (output @ 0°C/output @ 20°C) @ 400ppm CO	80 to 95
	Sensitivity @ 40°C	% (output @ 40°C/output @ 20°C) @ 400ppm CO	100 to 125
	Zero @ -20°C	ppm equivalent change from 20°C	< 0 to 4
	Zero @ 0°C	ppm equivalent change from 20°C	< 0 to 3
	Zero @ 50°C	ppm equivalent change from 20°C	< 0 to -10
CROSS SENSITIVITY	Filter capacity	ppm-hours	H ₂ S
	Filter capacity	ppm-hours	NO ₂
	Filter capacity	ppm-hours	NO
	Filter capacity	ppm-hours	SO ₂
	H ₂	sensitivity % measured gas @ 900ppm H ₂ in 900ppm CO @ 10°C	< 2
	H ₂	sensitivity % measured gas @ 900ppm H ₂ in 900ppm CO @ 20°C	< 5
	H ₂	sensitivity % measured gas @ 900ppm H ₂ in 900ppm CO @ 30°C	< 6
	H ₂ S	sensitivity % measured gas @ 20ppm H ₂ S	< 0.1
	NO ₂	sensitivity % measured gas @ 10ppm NO ₂	< 0.1
	Cl ₂	sensitivity % measured gas @ 10ppm Cl ₂	< 0.1
	NO	sensitivity % measured gas @ 50ppm NO	< 0.1
	SO ₂	sensitivity % measured gas @ 20ppm SO ₂	< 0.1
	C ₂ H ₄	sensitivity % measured gas @ 400ppm C ₂ H ₄	< 2
	NH ₃	sensitivity % measured gas @ 20ppm NH ₃	< 0.1
KEY SPECIFICATIONS	Temperature range	°C	-30 to 50
	Pressure range	kPa	80 to 120
	Humidity range	% rh continuous	15 to 90
	Storage period	months @ 0 to 20°C (stored in sealed pot)	6
	Load resistor	Ω (recommended)	10 to 47
	Weight	g	< 8

Important. The CO-CX must be operated with a 0 Volt bias between Reference & Working electrodes. Failure to comply with this requirement will result in a loss of its low Hydrogen cross sensitivity performance.



At the end of the product's life, do not dispose of any electronic sensor, component or instrument in the domestic waste, but contact the Instrument manufacturer, Alphasense or its distributor for disposal instructions.

NOTE: all sensors are tested at ambient environmental conditions, with 10 ohm load resistor, unless otherwise stated. As applications of use are outside our control, the information provided is given without legal responsibility. Customers should test under their own conditions, to ensure that the sensors are suitable for their own requirements.

Technical Specification



CO-CX Performance Data

Figure 2 Sensitivity Temperature Dependence

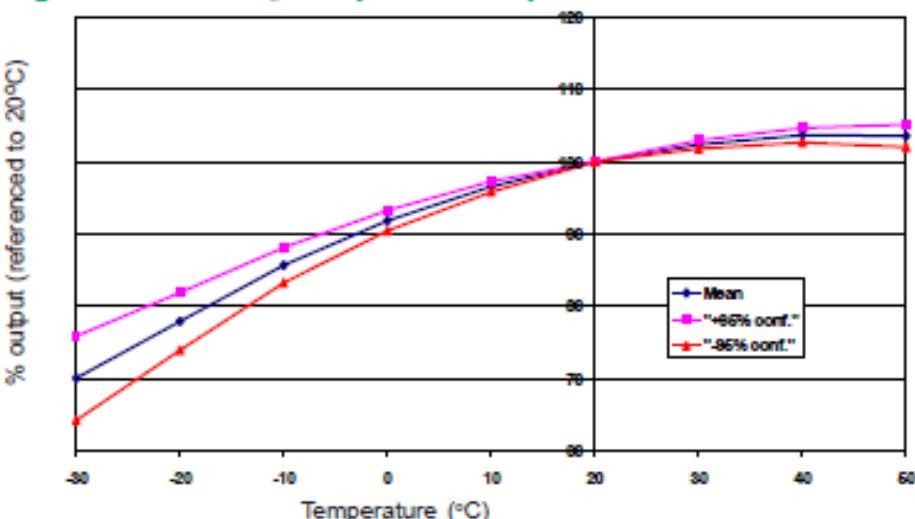


Figure 2 shows the variation in sensitivity caused by changes in temperature.

This data is taken from a typical batch of sensors. The mean and $\pm 95\%$ confidence intervals are shown.

Figure 3 Zero Temperature Dependence

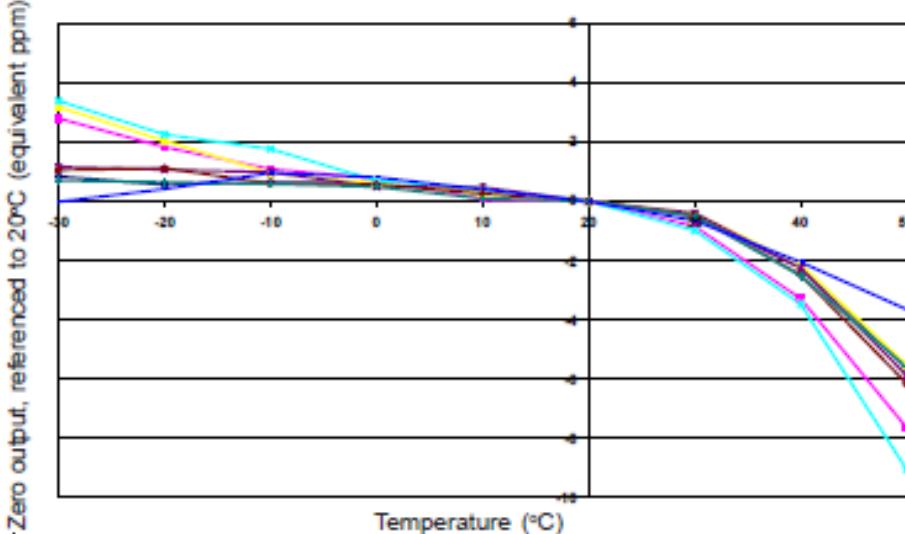
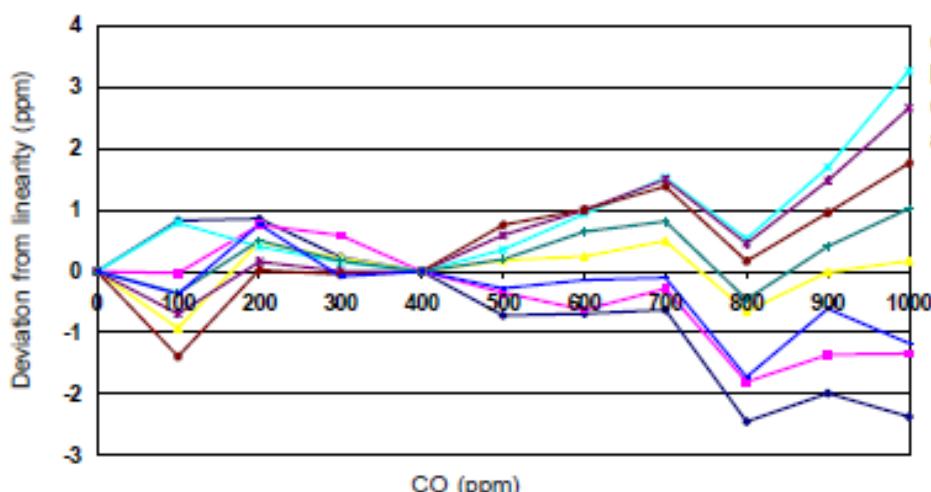


Figure 3 shows the variation in zero output caused by changes in temperature, expressed as ppm gas equivalent, referenced to zero at 20°C.

This data is taken from a typical batch of sensors.

Figure 4 Linearity to 1,000ppm



CO-CX shows very good linearity from 0 to 1,000 ppm CO, with less than $\pm 0.3\%$ error at 1,000ppm CO.

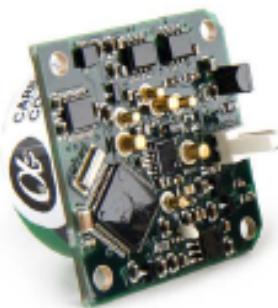
For further information on the performance of this sensor, on other sensors in the range or any other subject, please contact Alphasense Ltd. For detailed application notes go to "www.alphasense.com".

Annexe B

Datasheet de la digital transmitter baord
conçu pour le capteur CO-CX



4 to 20 mA Digital Transmitter Board Alphasense Type A and B Toxic Gas Sensors



Alphasense 4-20mA digital transmitters offer the following features:

- Factory calibration, custom-set for immediate use
- Digital zero, sensitivity and temperature compensation
- Digital and 4-20mA output
- Biased or unbiased operation
- Calibration and range change

Alphasense 4-20mA digital transmitter boards provide a cost effective way for Original Equipment Manufacturers to include 4-20mA gas sensor transmitters for fixed installation systems. The range of sensors are shown in Table 1. Transmitters are supplied with pre-calibrated sensors.

The 4-20 mA output signal performance is as shown on individual sensor data sheets. Calibration and digital interface communication use the 2-wire power supply (HART-type communications).

Optional fitting kit and connector/leads are available on request (Fig 2)

Table 1. Transmitter Board and Sensors

GAS	SENSOR TYPE A	MAXIMUM CONCENTRATION (ppm)	SENSOR TYPE B	MAXIMUM CONCENTRATION (ppm)
Carbon Monoxide	CO-AF	5,000	CO-BF	5,000
	CO-AE	10,000	CO-B1	5,000
	CO-AX	2,000	CO-BX	2,000
Hydrogen Sulfide	H2S-A1	100	H2S-B1	200
	H2S-AH	50	H2S-BH	50
	H2S-AE	2,000	H2S-BE	2,000
Sulfur Dioxide	SO2-AF	50	SO2-BF	100
	SO2-AE	2,000		
Nitrogen Dioxide	NO2-A1	20	NO2-B1	20
	NO2-AE	200		
Chlorine	CL2-A1	20	CL2-B1	20
Nitric Oxide*	NO-A1	250	NO-B1	250
	NO-AE	5,000		
Phosphine	PH3-A1	10	PH3-B1	10
			PH3-BE	2,000
Ethylene Oxide*	ETO-A1	100	ETO-B1	100
Hydrogen Cyanide	HCN-A1	100	HCN-B1	100
Hydrogen Chloride	HCL-A1	20	HCL-B1	20
Ammonia			NH3-B1	100

* Biased sensors require at least 12 hours to stabilise after first powered on
Specify required full scale gas concentration. Do not exceed maximum gas concentration shown in table.

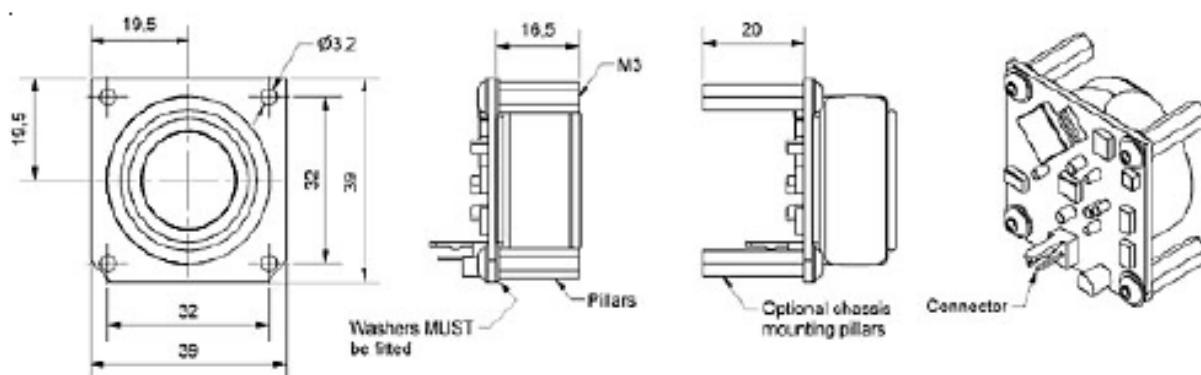
Technical Specification



4 to 20 mA Digital Transmitter Board Alphasense Type A and B Toxic Gas Sensors

INPUT	Type Maximum range: Minimum range: Sample rate: Thermal drift: Power-off state: Resolution: Bias: Temperature compensation:	3-electrode gas sensor: type A or type B -220uA to +320 uA $\pm 3 \mu\text{A}$ 500ms per sample 0.05 $\mu\text{A}/^\circ\text{C}$ Shorting FET connects working to reference electrode 11 nA Selectable: Off, +200 and +300mV ($\pm 10 \text{ mV}$ tolerance) On-board temperature sensor. Range -30°C to 60°C $\pm 0.5^\circ\text{C}$ Software correction of Zero and Span
OUTPUT	Connection:	2-pin MOLEX plug (ref 22-27-2021)
	Type: Output current range: Supply voltage: Supply sensitivity: Loop ripple effect: Thermal drift: Accuracy: Maximum loop resistance: Resolution: Sensor over-range: Protection: Connection:	4 mA to 20 mA 2-wire loop powered 3.8 mA to 21.5mA 10 to 30 VDC $< 0.03\%$ 10 to 30 VDC $\pm 2 \mu\text{A}$ measure @ 1 volt RMS 50Hz supply ripple $\pm 0.2 \mu\text{A}/^\circ\text{C}$ $\pm 5 \mu\text{A}$ 700 Ω @ 24VDC 0.75 μA $> 21.5\text{mA}$ Reverse connection and over-voltage protection 2-Pin MOLEX plug (Ref. 22-27-2021)
ENVIRONMENT	Ambient temperature: Ambient storage: Ambient humidity: Coating:	-30°C to 60°C -40°C to 70°C 0% to 95% continuous (non-condensing) Conformal spray coated
CE APPROVAL		BS EN 61326 (Industrial)

Fig 2. Transmitter Board Dimension Details



Optional fitting kit # 000-0420-KIT

4 x pillars	16.0 mm length, M3 tapped
8 x washers	M3 flat washers
4 x screws	M3 x 8 button head screws
1 x transmitter lead	Molex socket housing with 150 mm leads

For further information on the performance of sensors in the Alphasense range or any other subject, please contact Alphasense Ltd. For Application Notes visit "www.alphasense.com"

NOTE: as applications of use are beyond our control, the information provided is given without legal responsibility. Customers should test under their own conditions, to ensure that the sensors and transmitters are suitable for their own requirements.

In the interest of continued product improvement, we reserve the right to change design features and specifications without prior notification. The data contained in this document is for guidance only. Alphasense Ltd accepts no liability for any consequential losses, injury or damage resulting from the use of this document or the information contained in it. (©ALPHASENSE LTD) Doc. Ref. 4-20mA Digital/JUL13

Annexe C

Datasheet du Capteur de Dioxyde de Carbone, IRC-A1

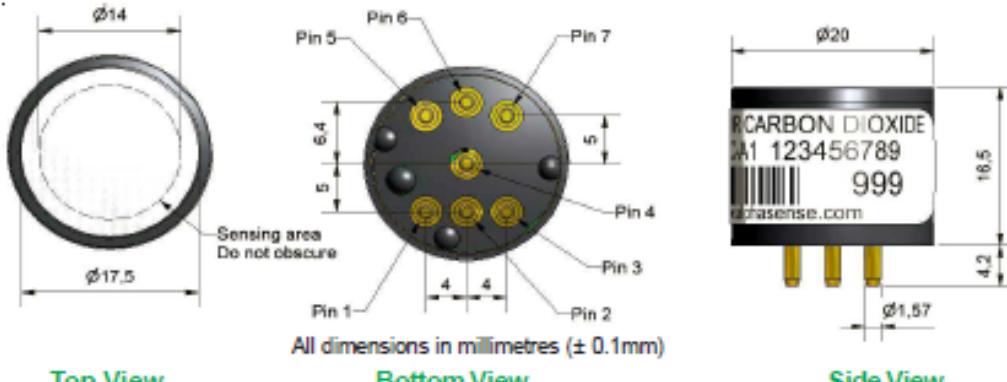


IRC-A1 CARBON DIOXIDE INFRARED SENSOR

PYROELECTRIC DETECTOR



Figure 1 NDIR-A Schematic Diagram



Top View

Bottom View

Side View

Pin out details:

1. Lamp return
2. Lamp +5V
3. +5V Pyro supply
4. Detector output
5. Reference output
6. Thermistor output
7. OV Pyro supply and case connection

Notes:

1. Dimensions without tolerances are nominal
2. Recommended PCB socket: Wearnes Cambion Ltd. code: 450-3326-01-06-00
3. Weight: 15g
4. Use antistatic precautions when handling
5. Do not cut pins
6. Do not solder directly to pins

PERFORMANCE

Maximum Power Requirements

5.0 VDC, 60mA max. (50% duty cycle source drive)

Minimum Operating Voltage

2.0 VDC, 20mA max. (50% duty cycle source drive)

Source Drive Frequency

1.5 to 3 Hz (recommended 2 to 2.25 Hz)

Active Output in N₂ (peak-to-peak)

60 - 100mV @ 2.1 Hz, 50% duty cycle

Reference Output in N₂ (peak-to-peak)

40 - 80mV @ 2.1 Hz, 50% duty cycle

Response Time (t₉₀)

< 40s @ 20°C ambient

Warm-up Time

To final zero ± 100ppm: < 30 s @ 20°C

To specification: < 30 minutes @ 20°C

LIFETIME

MTBF

> 5 years

KEY SPECIFICATIONS

Temperature Signal

Integral thermistor (NTC, R₂₅ = 3000 Ω B = 3450 K)

Operating Temperature Range

-20°C to +55°C (linear compensation from -10 to 40°C)

Storage Temperature Range

-40°C to +75°C

Humidity Range

0 to 95% rh non-condensing

TYPE*	Range (Application)	Accuracy (%FS, using universal linearisation coefficients)	Zero Resolution	Full Scale Resolution	Zero Repeatability	Full Scale Repeatability
IAQ	0 to 5000ppm (IAQ)	1	1ppm	15ppm	±10ppm	±50ppm
	0 to 5 % vol (Safety)	1.5	1ppm	100ppm	±10ppm	±500ppm
Other	0 to 20 % vol (Combustion)	2.5	1ppm	500ppm	±10ppm	±2500ppm
	0 to 100 % vol (Process Control)	4	1ppm	0.5 % vol	±10ppm	±5000ppm

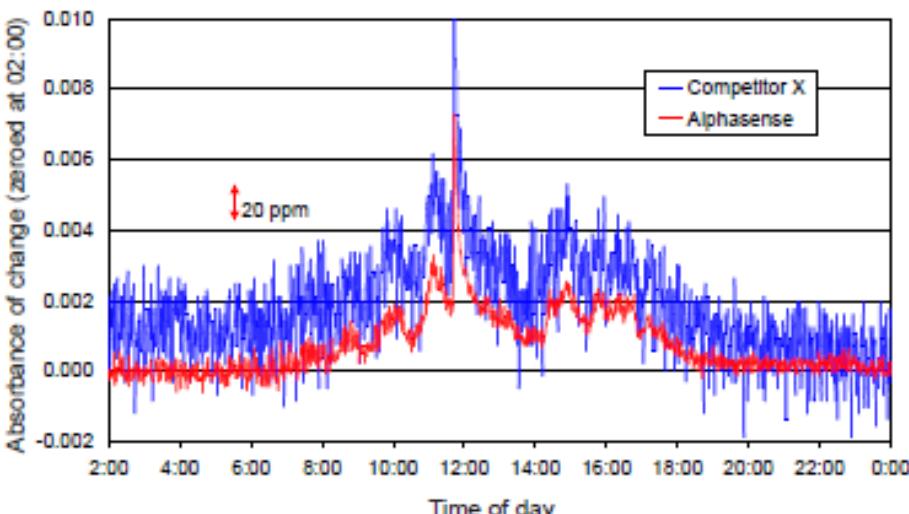
* When ordering, select 'IAQ' or 'Other', depending on your application.

NOTE: all sensors are tested at ambient environmental conditions, unless otherwise stated. As applications of use are outside our control, the information provided is given without legal responsibility. Customers should test under their own conditions, to ensure that the sensors are suitable for their own requirements.



IRC-A1 Performance Data

Figure 2 Comparison of Resolution

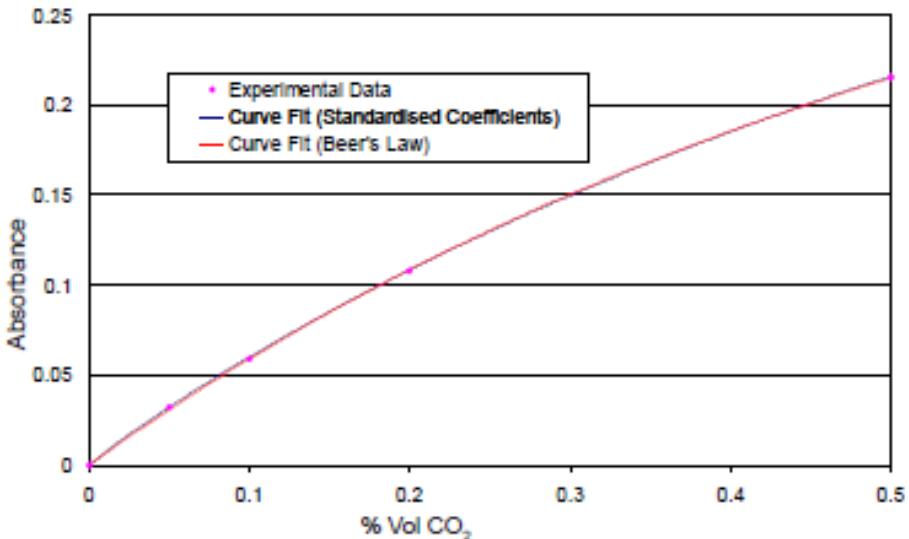


Comparison of resolution of IRC-A1 (red) and competitor's 20mm diameter NDIR cell (blue).

Both cells were operated at 2.25 Hz with the same electronic circuit. Both cells use the same light source and dual pyroelectric detector.

The improved resolution of the IRC-A1 is due to the patent pending optical design.

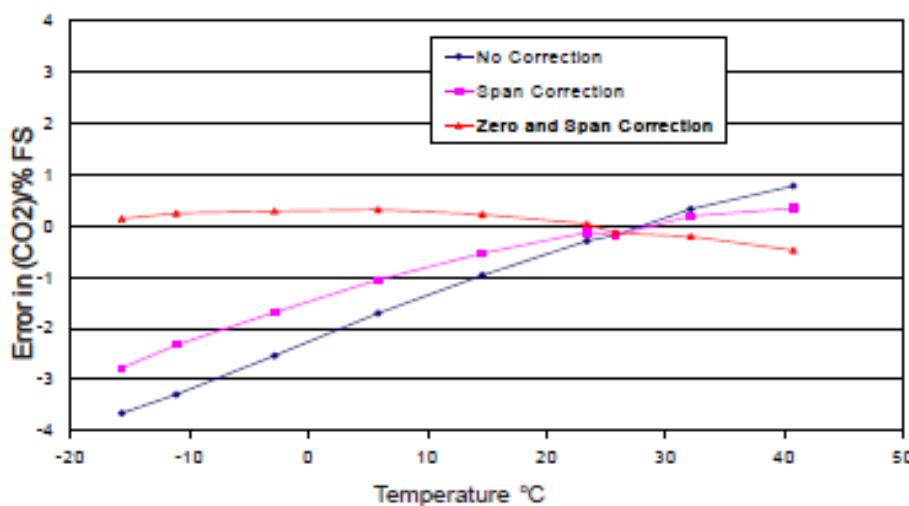
Figure 3 Beer-Lambert Performance



Typical response from 0 to 5000ppm CO₂.

The fit is very close to the theoretical curve, predicted by the Beer-Lambert Law.

Figure 4 Temperature Compensation



Temperature compensation corrects for temperature error in the detector.

Best compensation includes both span and zero correction; span correction can be a universal correction, but zero temperature correction will vary with each cell.

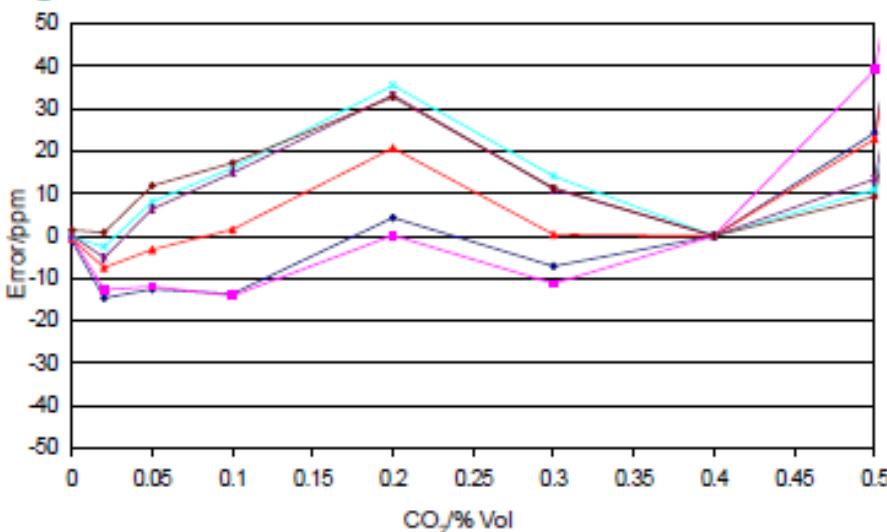
The graph shows error at 5,000 ppm CO₂.

For further information on the performance of this sensor, on other sensors in the range or any other subject, please contact Alphasense Ltd. For Application Notes visit "www.alphasense.com".



IRC-A1 Performance Data

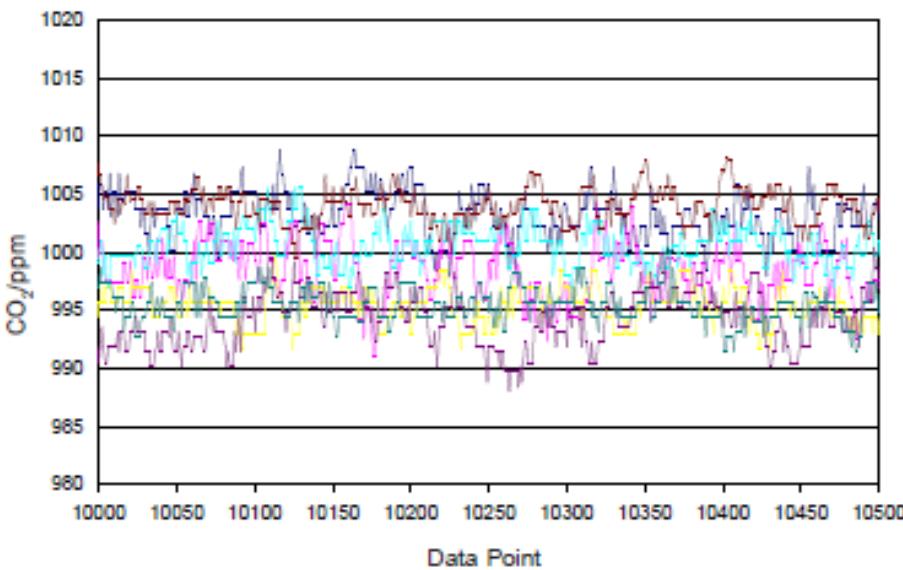
Figure 5 Linearisation



Custom linearisation is not necessary with the IRC-A1. Using universal linearisation constants, repeatability between cells is very good, allowing easy implementation.

For an IAQ application, a zero and then single calibration at 4,000ppm CO₂ gives the error shown above: less than 2% of reading and typically less than 0.5% of reading for six different IRC-A1 cells.

Figure 6 Resolution



Excellent stability and resolution at 1000ppm CO₂ for the IRC-A1 is achieved by better design, not by using more expensive components.

NOTE:

For applications where fluctuating ambient light will fall on the white dust filter (top of sensor), order with the optional ambient light filter (IRC-AF).



At the end of the product's life, do not dispose of any electronic sensor, component or instrument in the domestic waste, but contact the Instrument manufacturer, Alphasense or its distributor for disposal instructions.

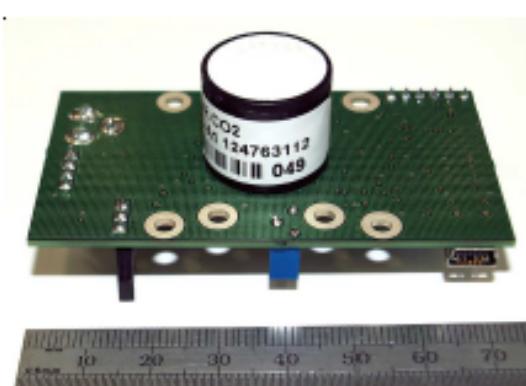
For further information on the performance of this sensor, on other sensors in the range or any other subject, please contact Alphasense Ltd. For Application Notes visit "www.alphasense.com".

Annexe D

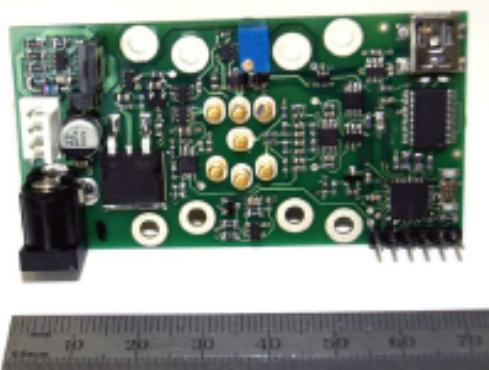
Datasheet de la transmitter board
IRC-TX conçu pour le capteur IRC-A1



IRC-TX NDIR CO₂ Transmitter Board



Top view



Base view

- » Both 4-20mA and USB output
- » Uses Alphasense IRC-A1 NDIR cell
- » Adjustable bulb voltage to optimise long-term stability vs. resolution

Four ranges	0-5,000ppm 0-5% vol CO ₂ 0-20% vol CO ₂ 0-100% vol CO ₂
-------------	---

Please specify required range when ordering

Excellent linearity/accuracy ±50ppm from 5,000ppm at 20°C using generic linearisation

Full sensor specification see [IRC-A1 data sheet](#)

USB interface plugs directly into PC for simple data capture

4-20mA output 4-wire or 2-wire and separate power supply (2.1mm DC socket)

Power options USB port (4-20mA output switched off)
2.1mm DC socket 12 to 40 VDC
Molex connector 12 to 40 VDC



At the end of the product's life, do not dispose of any electronic sensor, component or instrument in the domestic waste, but contact the instrument manufacturer, Alphasense or its distributor for disposal instructions.

NOTE: all sensors are tested at ambient environmental conditions, with 47 ohm load resistor, unless otherwise stated. As applications of use are outside our control, the information provided is given without legal responsibility. Customers should test under their own conditions, to ensure that the sensors are suitable for their own requirements.

Annexe E

AAN 202-04 : NDIR Electronic Interface and signal Extraction for Pyroelectric Sensor

NDIR: Electronic Interface and Signal Extraction for Pyroelectric Sensor

1. Introduction

The Alphasense IRC-A1 NDIR sensor consists of an infrared source, optical cavity, dual channel pyroelectric detector and internal thermistor. This application note details the electronic interface necessary to obtain useful signals from the sensor.

2. Source Drive

The infrared source should be switched at a low frequency with a 50% duty cycle. A switching frequency of 2 to 2.5Hz, derived from a crystal oscillator source is recommended. The source should be driven from a constant voltage source and care should be taken to ensure the supply does not contain low frequency ripple that would otherwise modulate the output. The nominal resistance of the source is approximately 9 to 10 Ohms at ambient temperatures and will draw approximately 50 to 60 mA at 5 V. The average current will be half of this figure when driven at 50% duty cycle.

The circuit shown in Figure 2 uses an n-channel MOSFET to switch the low side of the source with the high side connected to a stable supply (typically +5 VDC). The MOSFET should have a low RDS ON resistance to minimise its voltage drop. If the high side is driven and the low side is grounded, care must be taken to keep the detector ground separate from the source ground to avoid pickup due to the source current circulating in the detector ground. The source is galvanically isolated from the detectors and thermistor in the sensor.

3. Detector Signal Amplification and Filtering

The raw active and reference signals are composed of a DC offset voltage (typically 0.7 V - 1.0 V) with a small (~20 - 50 mV peak-to-peak) superimposed response signal alternating in phase with the source drive voltage (see Figure 1 (a) and (b), which show the active channel only). The alternating signal should be extracted and amplified (Figure 1 (c)) in order to obtain a measure of the peak-to-peak amplitude of this oscillating component. This peak-to-peak amplitude can then be used to determine the gas concentration (see Application Note AAN 201).

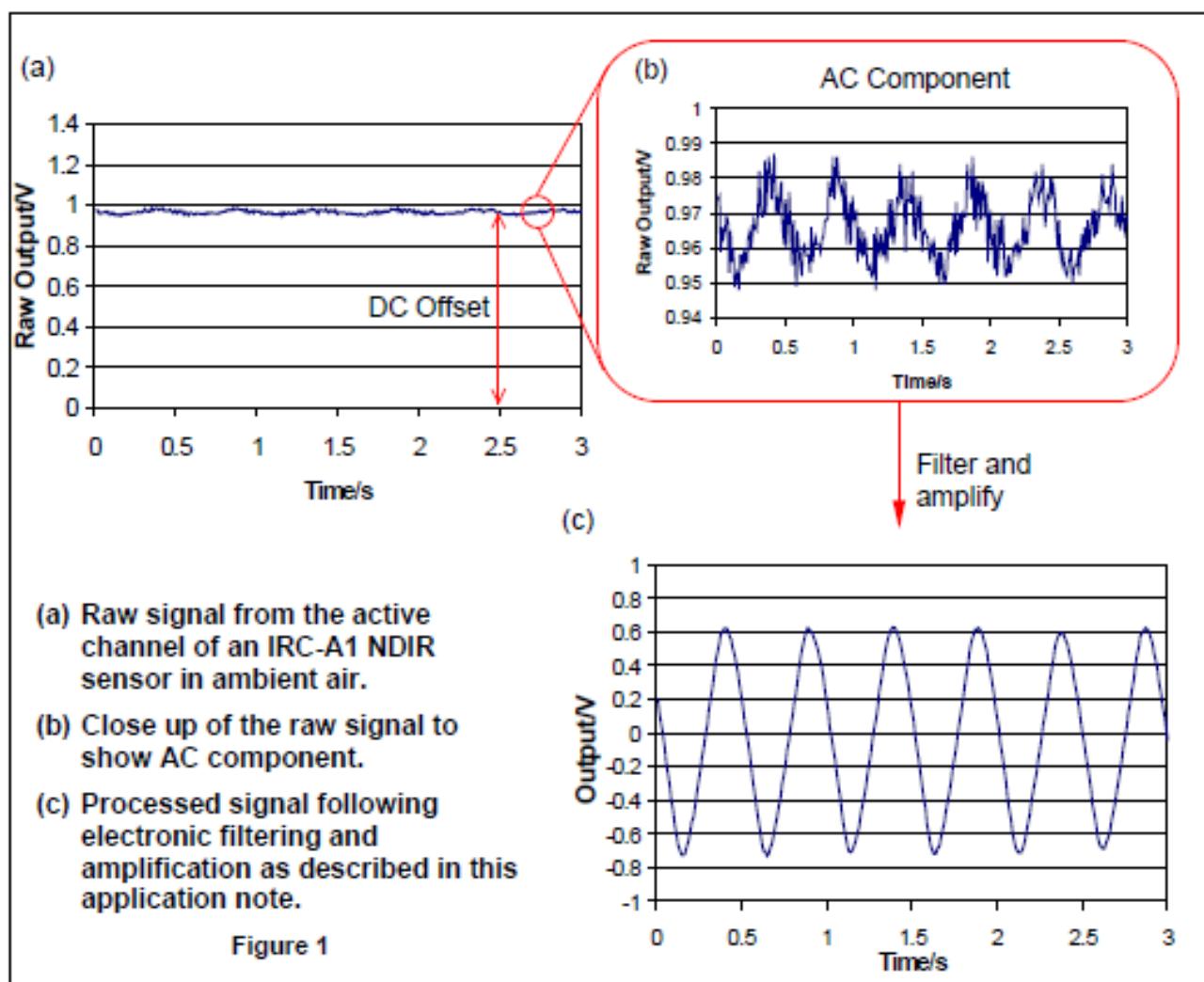
A suitable circuit for driving an Alphasense IRC-A1 sensor is shown in Figure 2. There are two identical detector FET's inside the dual sensor pyroelectric detector. The CO₂ detector will respond to changes in CO₂ levels while the reference will be substantially unaffected by CO₂ levels. Both detectors will be affected by ambient temperature and the IR source luminosity and appropriate processing of both channels will alleviate these unwanted effects (see Application Note AAN 201).

The detector FET's are arranged as source followers. The load resistors (R1 and R2 in Figure 2) should be set to give approximately 30 μ A bias current in the FET's. The nominal output voltage on the FET sources is between 0.6 and 1.2 V. The load resistors should be connected to a negative bias supply to allow a greater output voltage swing that may be necessary if the sensor is subjected to sudden temperature changes. A -2 VDC supply is recommended, which must be well de-coupled to AGND.

The source and detectors have a significant response time (hence the reason for the relatively low pulse frequency). The amplification stage should include a high pass response with a roll off of about four times the switching frequency to reduce high frequency noise, and a low pass (AC coupling) stage of approx. 0.1 Hz to remove the DC bias from the FET's.

The frequencies need not be exact, but both detectors (reference and active) should have matching characteristics. The detectors will have a typical output of 45 mV peak-to-peak so the circuit should provide sufficient gain to give a reasonable input to any ADC used.

The circuit shown in Figure 2 will give approximately 3 V peak-to-peak (bipolar around 0 V). For unipolar ADCs, C1, C2, R5, R6, R7 & R8 could be connected to a mid rail supply that is well decoupled to AGND.



- (a) Raw signal from the active channel of an IRC-A1 NDIR sensor in ambient air.
- (b) Close up of the raw signal to show AC component.
- (c) Processed signal following electronic filtering and amplification as described in this application note.

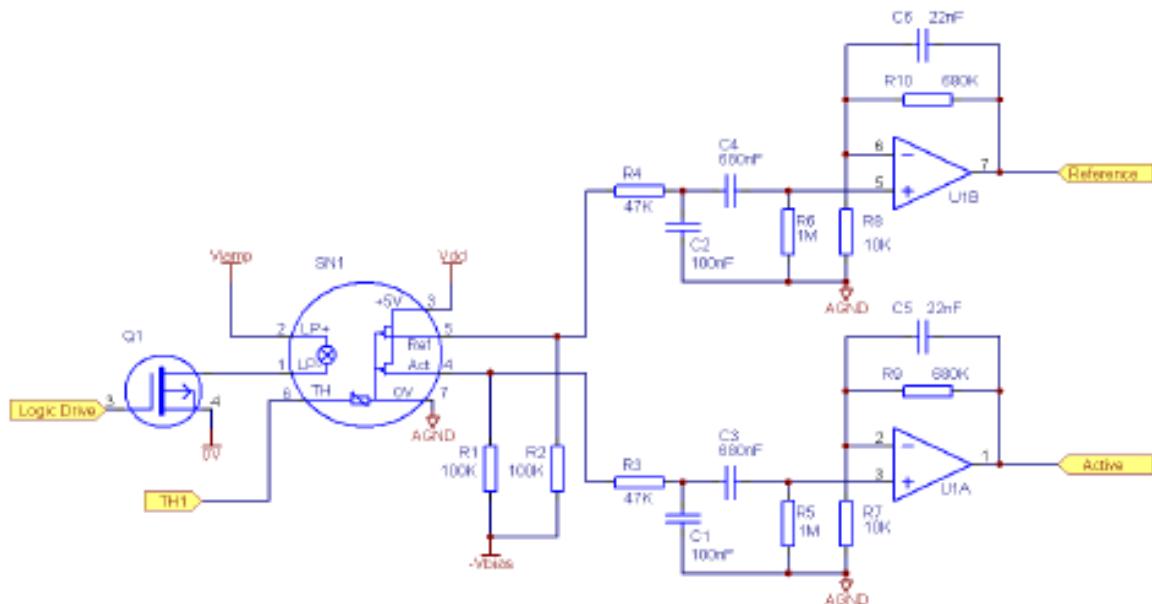


Figure 2: Circuit suitable for driving the lamp and amplifying the signal from an IRC-A1 sensor

4. Thermistor Output

The sensor includes an integral thermistor to monitor the internal temperature. Internally, the thermistor is connected to AGND. The thermistor output should be connected in series with a known resistor and reference voltage. The potential at the junction between the resistors can then be used to determine the thermistor resistance and the temperature via the tables below.

Temp (°C)	IRC-A1 R (Ohms)
25	3000
-30	41222
-20	23519
-10	14003
0	8661
10	5541
20	3655
30	2478
40	1723
50	1225
60	889

Note that although you may have another temperature sensor in your gas detector to monitor ambient temperature, you should use the thermistor in the sensor to correct the NDIR readings for temperature because the NDIR sensor will operate between 2°C and 5°C warmer than the ambient temperature due to heat generated by the IR light source.

Annexe F

Liste des composants utilisés

Composant électronique

Nom de la pièce	Référence de la pièce	Lien du fabricant	U
Carte Arduino Uno	715-4081	https://fr.rs-online.com	1
Shield SD avec RTC	2144970	https://www.conrad.fr/	1
Module Bluetooth	174-3260	https://fr.rs-online.com	1
Capteur BMP280	2299838	https://www.conrad.fr/	1
Capteur chimique de CO	CO-CX	https://www.alphasense.com/	1
Carte électronique du CO-CX	Digital Transmitter Board	https://www.alphasense.com/	1
Capteur NDIR de CO2	IRC-A1	https://www.alphasense.com/	1
Carte électronique pour IRC-A1	IRC-TX	https://www.alphasense.com/	1
Prise grove	1793735	https://fr.rs-online.com	4
Prise molex 2-pin	4838461	https://fr.rs-online.com	1
Prise molex 4-pin	4838483	https://fr.rs-online.com	1
Boitier de connecteur molex 4-pin	6795307	https://fr.rs-online.com	2
Boitier de connecteur molex 2-pin	6795287	https://fr.rs-online.com	2
Contact à sertir	0467598	https://fr.rs-online.com	12
Bornier 14-pins	6488989	https://fr.rs-online.com	1
Connecteur 10 broches	765-5745	https://fr.rs-online.com	1
Fiche de connexion CC	0487854	https://fr.rs-online.com	3
Prise CC 12V	1241510	https://fr.rs-online.com	2
Bouton ON /OFF	7932563	https://fr.rs-online.com	2
Led verte	0212121	https://fr.rs-online.com	2
Porte-fusible	188-4630	https://fr.rs-online.com	

Composants mécaniques du boîtier de mesure

Nom de la pièce	Référence de la pièce	Lien du fabricant	U
Boîtier	1862252	https://fr.rs-online.com	1
Pilier pour cloison	0680498	https://fr.rs-online.com	
Cloison	8099695	https://fr.rs-online.com	
Vis de la liaison Cloison-pilier	2299838	https://fr.rs-online.com	4

Composants de plomberie du circuit d'air

Nom de la pièce	Référence de la pièce	Lien du fabricant	U
Embout PLC 6.4mm traverse cloison	7642752	https://fr.rs-online.com	2
Embout fileté PLC 6.4mm	PLC24004BSPT	http://www.dbigroupe.com/	1
Coupleur BSPT femelle - femelle	12010304048	http://www.dbigroupe.com/	1
Porte-filtre NILU	Nilu Filter holder	http://products.nilu.no/ProductsDivision/FilterHolders.aspx	1
Coupleur PLC 6.4mm – cannelé 3/8 pouce	7642702	https://fr.rs-online.com	3
Tube PVC $\frac{3}{4}$ de pouce	1J-705-10	http://www.dbigroupe.com/	1

Bibliographie

- [1] S. KEITA et al. “Particle and VOC emission factor measurements for anthropogenic sources in West Africa”. In : *Atmospheric Chemistry and Physics* 18.10 (2018), p. 7691-7708. DOI : 10.5194/acp-18-7691-2018. URL : <https://acp.copernicus.org/articles/18/7691/2018/>.
- [2] François LEPETIT-AIMON. *FLepeitAimon/CarbOnFire*. 2021. URL : <https://github.com/FLepeitAimon/CarbOnFire>.