

Note technique

Travaux financés par le ministère chargé de l'environnement

INFLUENCE DU TRAITEMENT DE SIGNAL SUR LA REPONSE DES MICRO-CAPTEURS (ACTION 59)

N. REDON (IMT Lille Douai), S. CRUNAIRE (IMT Lille Douai)
E. MORELLE (IMT Lille Douai)

SYNTHESE DES TRAVAUX

L'un des questionnements issus de l'émergence des nouveaux outils d'évaluation de la qualité de l'air que sont les micro-capteurs, concerne l'impact de l'électronique sur leurs performances métrologiques. Dans le cadre de cette étude, des capteurs électrochimiques pour la mesure de NO₂ de marque AlphaSense ont servi d'éléments sensibles de référence pour la comparaison de quatre systèmes d'acquisition différents. Les systèmes d'acquisition/traitement des données sélectionnés pour être testés durant ces travaux sont les suivants : un module USB NI 6008 de National Instruments, la plateforme AirSenseEUR développée par le JRC, la plateforme Gases PRO v2 de Libélium et enfin un micro-ordinateur de type Raspberry Pi 2. *In fine* seulement deux de ces systèmes (module NI USB 6008 et AirSenseEUR) se sont avérés adaptés aux capteurs étudiés. En effet, les cartes d'acquisition ne sont pas toutes universelles, et ne permettent pas toujours d'accueillir directement des capteurs, a fortiori de marques différentes de ceux d'origine (cas Libelium uniquement adapté à des éléments sensibles de marque Solidsense (Honeywell)).

Les courbes de calibrage du couple élément sensible/système d'acquisition ont été réalisées sur des gammes de concentrations en NO₂ comprises entre 0 et 280ppb en suivant le protocole issu des travaux LCSQA 2017 [1]. Les réponses fournies par chacun des deux systèmes opérationnels sont radicalement différentes, mettant en lumière différents défauts en fonction du système utilisé : l'erreur de résolution liée à la numérisation pour le module NI, des problèmes d'hystérésis pour la plateforme AirSenseEUR.

[1] - N. REDON, F. DELCOURT, S. CRUNAIRE, N. LOCOGE, Protocole de détermination des caractéristiques de performance métrologique des micro-capteurs - étude comparative des performances en laboratoire de microcapteurs de NO₂, Rapport LCSQA, 2017

1. CONTEXTE

La définition d'un micro-capteur telle qu'entendu par le LCSQA est donnée dans le protocole d'évaluation métrologique des micro-capteurs de polluants gazeux réglementaires. Elle ne fait cependant pas la distinction entre les éléments sensibles en tant que tels et des systèmes plus complexes incluant le cas échéant un système d'aspiration par ventilateur mais aussi et surtout des cartes électroniques utilisées pour l'acquisition et le traitement du signal. Dès que l'information finale fournie permet d'établir un niveau de concentration du polluant mesuré, quels que soient le nombre et la nature des différentes couches de traitement ajoutée, l'instrument tombe dans le périmètre des micro-capteurs. Ce traitement de l'information est rarement détaillé par l'intégrateur, et pourtant il est indubitable qu'il existe une valeur ajoutée de ces modules sur la réponse globale du micro-capteur. L'objet de cette étude est d'évaluer le poids de cette mise en forme sur les performances finales des micro-capteurs de gaz et plus particulièrement de NO_2 .

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif comprend un élément sensible, choisi parmi les capteurs les plus courants de polluants réglementés et les plus robustes que l'on peut trouver sur le marché, une plateforme de mise en forme qui constitue l'objet de l'étude, et l'ensemble est testé sur le banc de caractérisation qui répond aux exigences du protocole de qualification des micro-capteurs de polluants réglementés défini par le LCSQA.

2.1 L'élément sensible de référence : cellule électrochimique Alphasense NO_2

Le micro-capteur testé dans le cadre de cette étude est une cellule électrochimique de NO_2 de marque Alphasense (réf. : NO_2 B43F Nitrogen Dioxide Sensor 4-Electrode) - Figure 1. Si nécessaire, ce micro-capteur dispose lui-même d'une carte électronique de mise en forme du signal (réf : Individual Sensor Board (ISB) for Alphasense B4 4-Electrode Gas Sensors) sur laquelle on trouve une borne qui permet d'alimenter la cellule (bornes $V_{in+/-}$), et d'accéder à la mesure ($OP_{1+/-}$ ou $OP_{2+/-}$). Ce sont les signaux issus de ces bornes qui seront transmis aux plateformes USB NI 6008 et Raspberry Pi2, tandis que l'AirSensEUR et le Libelium intègrent une électronique qui leur est propre et ne nécessite pas cette carte.

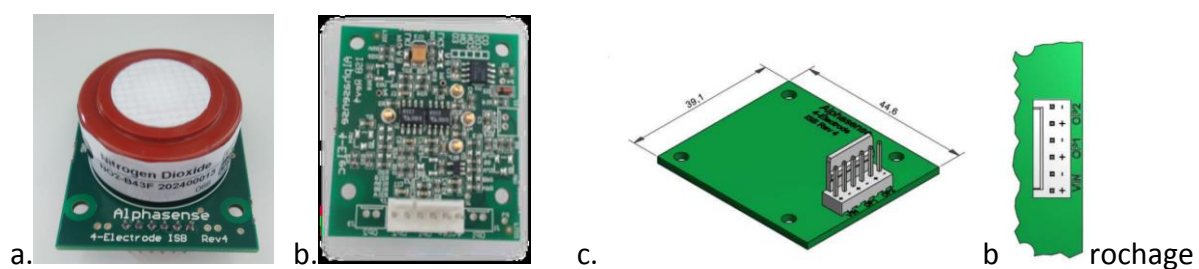


Figure 1 – Cellule électrochimique Alphasense NO_2 (a), son électronique associée (b), et sa connectique (c)

2.2 Les plateformes d'acquisition testées

2.2.1 Plateforme Libelium Gases PRO v2.0

La plateforme Libelium Gases Pro v2.0 est un système dit « plug&play » qui accepte différents types de sonde pour la mesure environnementale - Figure 2. L'utilisateur programme « à façon » le système d'acquisition en fonction du type de sonde qu'il a branché au système d'acquisition dit « waspmote ». Pour cela, le fabricant met à disposition un outil de programmation en ligne en « open source » qui facilite le développement d'un software adapté par l'utilisateur à l'usage qu'il souhaite faire de la plateforme. Les emplacements A, B, C et F sur la figure 2 peuvent accepter une sonde de mesure du NO₂. Le caractère « plug&play » de la plateforme pouvait laisser supposer que n'importe quel type de capteur électrochimique de NO₂ pouvait être branché sur cette plateforme. Il s'avère en réalité que ça n'est pas le cas : seules les cellules électrochimiques de marque Solidsens sont acceptées par le système Libélium. Une tentative d'adaptation a tout de même été menée avec la cellule AlphaSense, mais sans succès, la plateforme n'ayant remonté aucune information cohérente.



Figure 2 – Plateforme « Plug&Play » Libelium Gases PRO v2.0

2.2.2 Plateforme Raspberry Pi modèle A

Le Raspberry Pi modèle A est un nano-ordinateur équipé d'un système d'exploitation « open source » GNU/Linux-Debian, qui présente l'avantage d'avoir des entrées/sorties analogiques numériques directement accessibles via des pins GPIO pour General Purpose Input/Output - Figure 3. Comme leur nom l'indique, ces ports d'entrée/sortie sont configurables et permettent, entre autres, de mesurer directement des tensions analogiques, sous réserve que celles-ci soient comprises entre 0 et 3,3V. Malheureusement, aucun des logiciels d'instrumentation à notre disposition ne se sont avérés compatibles avec Linux au moment où ces essais ont été menés. Nous n'avons donc pas été en mesure de récupérer les données issues des expériences.



Figure 3 – Raspberry Pi modèle A

2.2.3 Plateforme NI USB 6008

Le module NI USB 6008 est un convertisseur analogique numérique développé par National Instrument. Cette interface est pilotée via un port USB grâce à un software développé sous LabView. Elle permet l'acquisition simultanée de 4 entrées analogiques différentielles (notées AI0± à AI3± sur la figure 4), pour des tensions comprises entre ±10V, et codées sur 12 bits, soit une résolution en tension de $(20V/2^8)=4,88mV$.

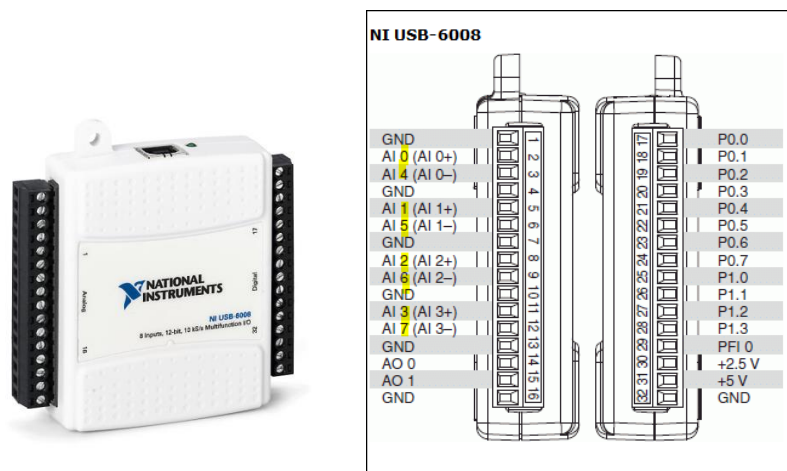


Figure 4 – Module National Instrument USB 6008 et son schéma de brochage

Cette interface est représentative des cartes d'acquisition analogique/numérique « low cost » largement distribuées actuellement sur le marché de l'électronique. Voici quelques exemples de systèmes concurrents : modules Arduino, Maple, Picaxe, micro:bit, Mbed, Fez, Parallax, etc. La plupart d'entre eux sont des cartes « open source », ce qui n'est pas le cas du module USB 6008 ici présent, dont NI est propriétaire. Selon la configuration choisie (nombre de ports analogiques d'acquisition, nombre de bits de sortie, gamme de tensions converties, fréquence d'échantillonnage), le coût peut varier de quelques dizaines à quelques centaines d'euros. D'un point de vue purement théorique, il ne s'agit de rien d'autre que d'un multimètre numérique. Aucune amplification ou mise en forme de signal n'est incluse dans le système. En revanche, il sera possible via le soft développé à façon avec un logiciel d'instrumentation, d'introduire des corrections.

2.2.4 Plateforme AirSenseEUR

Cette plateforme développée par le JRC est censée pouvoir permettre de connecter, pour une même espèce mesurée, plusieurs capteurs de marques différentes. En l'état actuel de son développement, seule deux marques de capteurs électrochimiques sont susceptibles d'y être connectés : les cellules développées par Alphasense, et les cellules développées par Membrapor. A notre connaissance, les cellules développées par Solidsense qui équipent le système Libelium vu précédemment, ne sont pas adaptables sur cette plateforme.



Figure 5 - Plateforme AirSenseEUR développée par le JRC

Ce module d'acquisition comporte deux cartes :

- La carte « shield » : il s'agit de la carte sur laquelle les micro-capteurs sont connectés ; elle permet l'acquisition du signal de plusieurs micro-capteurs, incluant la conversion analogique/numérique, le traitement du signal, l'échantillonnage, le moyennage, et l'attribution de l'horodatage.
- La carte « host » : cette carte récupère les données de la carte shield, applique des coefficients de conversion et complète les mesures par des coordonnées géographiques. Elle permet de stocker les données et se charge de leur transmission sur des serveurs externes.

Les différents canaux de branchement de capteurs sont les suivants :

- Canal 0, SENS1 : NO₂ B43f d'Alphasense
- Canal 1, SENS2 : CO MF200 de Membrapor
- Canal 2, SENS3 : O₃ M5 de Membrapor
- Canal 3, SENS4 : NO B4 d'Alphasense
- Canal 4, carte auxiliaire R13 : pression
- Canal 5, carte auxiliaire R13 : température
- Canal 6, carte auxiliaire R13 : humidité

La connexion wifi permet d'accéder au système Linux de la carte host (pour récupérer les données) depuis un terminal (Putty). Un software, également développé par le JRC, permet la lecture et l'enregistrement des données.

2.3 Banc de caractérisation au NO₂

Le synopsis du banc de caractérisation en gaz correspond à celui proposé par le protocole LCSQA 2017. Les cellules électrochimiques sont placées dans la chambre d'exposition de 36L dans laquelle on fait circuler une concentration contrôlée en NO₂. Les conditions de température et de pression sont maintenues constantes à 23±1°C et 50±5% durant l'ensemble des essais. La concentration en NO₂ est vérifiée en sortie de chambre par un analyseur 42i – TL de marque Thermo Fisher Scientific et sert de valeurs de référence pour établir la courbe d'étalonnage des systèmes micro-capteurs. Selon les cas la plateforme peut être placée à l'intérieur de la chambre d'exposition (cas AirsenseUR et Libélium), ou à l'extérieur de la chambre (cas NI USB 6008 et Raspberry Pi).

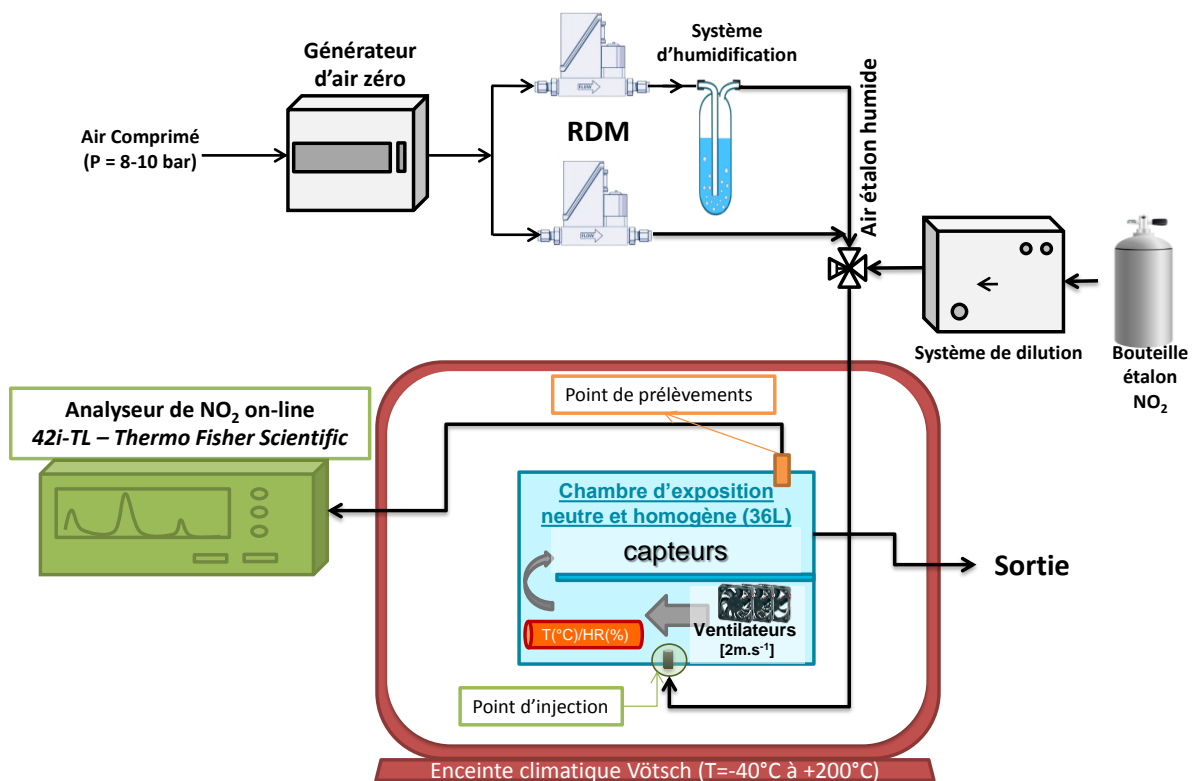


Figure 6 - Synopsis du banc de qualification en NO₂

3. RESULTATS OBTENUS

Les concentrations en NO₂ générées vont de 0 ppb à 280 ppb. Les mesures des systèmes micro-capteurs sont relevées avec une résolution temporelle de 5 secondes. Une série de 9 tests consécutifs ont été menés sur le banc de qualification en NO₂ pour le module NI USB 6008 et 6 tests consécutifs pour la plateforme AirSensEUR.

3.1 Courbe de calibration via module NI USB 6008

Etant donné les caractéristiques du module NI USB 6008, les résultats obtenus avec cette carte d'acquisition correspondent à des niveaux de tensions que l'on peut relier aux niveaux de concentrations en NO_2 générés. La courbe de calibration obtenue est présentée sur la Figure 7 :

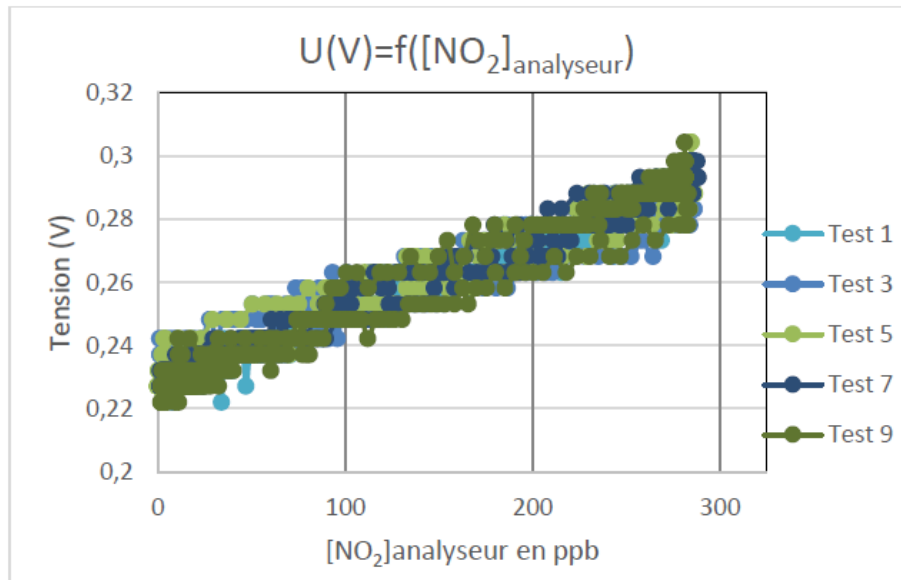


Figure 7 - Courbe de calibration de l'Alphasense obtenue via un module NI-USB 6008

On note tout d'abord que les niveaux de tension mesurés sont relativement faibles. L'absence de toute amplification témoigne que la réponse brute fournie par la cellule Alphasense est très faible et nécessiterait un traitement pour améliorer sa sensibilité.

Par ailleurs, on observe une réponse en « marche d'escalier ». Ce phénomène est lié au codage sur 12 bits qui induit une erreur de résolution. Pour rappel, cette erreur de résolution est équivalente au quantum de la carte de conversion analogique-numérique, qui vaut 4,88mV (voir § 2.2.3).

En revanche, les mesures sont bien répétables, et il est possible de déterminer la pente de la courbe de calibration. Elle vaut $2,0 \cdot 10^{-4} \pm 11,2 \cdot 10^{-20}$ mV/ppb (avec une incertitude élargie $k=2$)

3.2 Courbe de calibration via la plateforme AirSensEUR

Les données fournies par la plateforme AriSensEUR n'ont pas d'unités comparables à celles du module NI USB 6008. Aucune correspondance judicieuse n'a été trouvée. Les résultats obtenus sont donc présentés sans dimension sur la courbe de la Figure 8 :

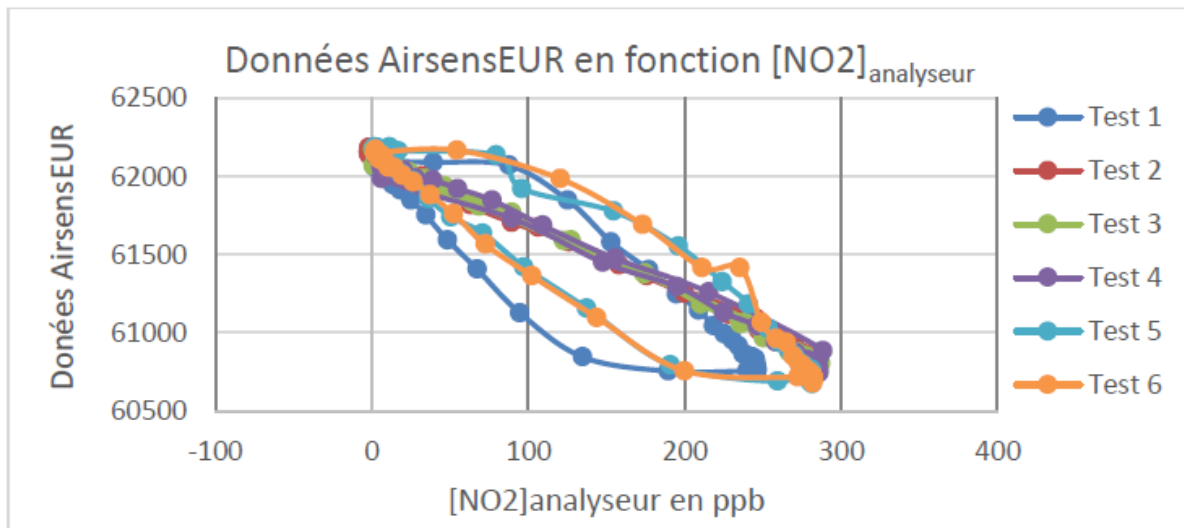


Figure 8 - Courbe de calibration de l'Alphasense obtenue via la plateforme AirSensEUR

Sur l'ensemble des tests menés, on observe un phénomène d'hystérésis dans 3 cas sur 6 (test 1, 5 et 6) sans que la cause soit clairement identifiée. Autrement dit, selon que la concentration en NO_2 est en train d'augmenter ou de diminuer, la courbe de calibration diffère. Il est difficile en l'état de déterminer l'équation de la réponse du système et de tirer d'avantage de conclusions sur les traitements effectués par cette plateforme.

4. CONCLUSION

Même si la plupart des mini-stations ou systèmes micro-capteurs sont constitués d'un élément sensible et d'une carte de traitement de signal associée, il est difficile d'estimer l'influence de la partie dédiée au traitement sur la réponse globale du micro-capteur. En effet, dans la plupart des cas, outre les difficultés d'accès à l'élément sensible lui-même, il n'est pas possible de le remplacer par un équivalent d'une autre marque. Même si les questions autour de cet impact du traitement de signal sont justifiées, il vaut mieux considérer le micro-capteur dans son ensemble lors de sa qualification métrologique et ne pas chercher à le décrire en deux fonctions séparées (captation + traitement). Ce point conforte la définition du périmètre de la notion de « micro-capteur », déjà établie dans le rapport LCSQA 2017.