

Mesure du méthane et de l'hydrogène à l'aide des capteurs MQ-4 et MQ-8 pour application dans l'électrification rurale.

D. A. S. Andriatoavina¹, D. A. H. Fakra², J. M. M. Andriamampianina¹

¹Ecole du Génie Industriel, Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo

²Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'Environnement et le Bâtiment, Université de La Réunion

Correspondant : andriatoavinadolly@gmail.com

Résumé

La mesure de la composition du gaz tient un rôle important dans la maîtrise des processus de valorisation énergétique de la biomasse, comme la méthanisation ou la gazéification. Grâce à leur bas prix, les capteurs résistifs à base d'oxydes métalliques semiconducteurs, comme les capteurs de la série MQ, sont l'un des plus utilisés dans la détection de gaz. Mais, comme ces capteurs sont dédiés à la détection des fuites de gaz dans les systèmes de sécurité, leurs gammes de mesure sont souvent limitées à des concentrations de l'ordre des ppm. Il est alors nécessaire de trouver des solutions pour pouvoir les adapter à la mesure de gaz dans le domaine énergétique où les concentrations sont beaucoup plus importantes. Nous proposons dans cet article un dispositif de mesure du méthane et de l'hydrogène avec des capteurs MQ-4 et MQ-8 respectivement. La gamme de mesure de ces capteurs MQ est limitée à 10 000 ppm mais la concentration du gaz à mesurer est ramenée dans cette gamme en le diluant dans un volume d'air connu. La technique proposée consiste à mesurer le gaz en l'injectant sur le capteur placé dans une capsule partiellement fermée. La dilution du gaz est effectuée dans la seringue d'injection. La mesure est évaluée suivant la linéarité caractérisée par le coefficient de corrélation linéaire R^2 et la répétabilité caractérisée par l'écart-type. Les résultats montrent des valeurs de R^2 de 0,9973 pour la mesure du méthane et de 0,9472 pour l'hydrogène. Concernant la répétabilité, on a obtenu un écart-type maximal de 14,26% pour la mesure du méthane et de 17,73% pour l'hydrogène. Cette technique a permis d'avoir une réponse linéaire des capteurs jusqu'à 20% de CH_4 et 13,33% de H_2 . L'utilisation de ce dispositif simple et à moindre coût dans les systèmes de valorisation de la biomasse permet aux opérateurs locaux de maîtriser et d'améliorer leurs installations tout en évitant les coûts élevés des appareils conventionnels. Cette étude contribue ainsi au développement des projets d'électrification rurale dans les zones isolées.

Mots-clés : mesure, capteurs, hydrogène, méthane, rural

1 Introduction

Dans l'ingénierie, la maîtrise de tout processus nécessite la mesure des phénomènes physiques mis en jeu dans la transformation d'éléments d'entrées en éléments de sorties. Dans le domaine scientifique, la compréhension de tous phénomènes physiques nécessite aussi sa mesure afin de pouvoir procéder à toute étude ou analyse. La mesure d'une grandeur physique fait appel à un capteur qui peut générer un signal de sortie, souvent électronique, en réponse à la stimulation du mesurande [1] [2]. Les capteurs trouvent donc leurs applications dans tous les domaines de la science et de l'ingénierie [1].

Cet article présente l'application des capteurs pour la mesure de gaz dans le secteur de la valorisation énergétique de la biomasse. L'objectif de la mesure est d'évaluer le pouvoir calorifique du gaz à partir de la concentration de ses éléments combustibles. Il faut savoir que des appareils de mesure tels que les chromatographes sont déjà disponibles sur le marché pour effectuer de telles analyses [3]. Toutefois, à cause de leur prix élevé et des difficultés de transport liées à leur encombrement, ces appareils sont souvent inadaptés à une utilisation dans les zones rurales éloignées [4]. C'est pourquoi cet article présente la conception et la validation d'un analyseur de gaz simple, à moindre coût et facilement transportable qui peut être utilisé dans les zones rurales isolées.

L'utilisation de capteurs de gaz à moindre coût dans le secteur de l'énergie de la biomasse est relativement récente et encore peu traitée. Deux exemples de l'utilisation de capteurs à bas prix pour mesurer la teneur en méthane du biogaz sont donnés dans les travaux d'Ahmed et al. [5] et Yang et al. [4]. Ahmed et al. [5] ont utilisé un capteur MQ-2 pour mesurer la production de biogaz à partir d'un biodigesteur de traitement des eaux usées. Yang et al. [4] ont conçu un dispositif basé sur le MQ-4 pour mesurer la teneur en méthane du biogaz produit par la digestion anaérobie des résidus de distillation d'une usine d'éthanol cellulosique. Ahmed et al. [5] et Yang et al. [4] ont utilisé les capteurs MQ pour surveiller la digestion anaérobie, qui est un processus de récupération d'énergie de la biomasse humide [6]. Pour la biomasse sèche (teneur maximale en humidité de 20% pour les gazogènes à lit fixe contre-courant et de 50% pour les gazogènes à lit fixe co-courant), le procédé approprié est la gazéification [7]. La gazéification consiste à transformer la biomasse riche en carbone en un gaz combustible par son oxydation partielle [8] [9]. Contrairement au biogaz analysé dans

les travaux d'Ahmed et al. [5] et Yang et al. [4], le gaz résultant de la gazéification, appelé gaz de synthèse, contient plusieurs gaz combustibles (H_2 , CH_4 , CO) [10]. Cet article propose donc une technique simple pour mesurer le méthane et l'hydrogène, qui peut être utilisée pour contrôler les systèmes de gazéification.

Les dispositifs présentés dans cet article sont basés sur les capteurs MQ-4 et MQ-8 pour la mesure du CH_4 et du H_2 respectivement. Les capteurs MQ sont des semi-conducteurs résistifs à base d'oxydes métalliques en oxyde d'étain (SnO_2). Le choix de ces capteurs est justifié par leur bas prix et une utilisation simplifiée. En effet, les capteurs MQ peuvent être alimentés par une simple carte Arduino UNO qui va aussi assurer la transmission du signal électrique émis par les capteurs vers un ordinateur.

Toutefois, un défi à relever dans l'adaptation des capteurs MQ pour la mesure de la concentration de gaz est l'amélioration de leur gamme de mesure. Comme les capteurs MQ sont à l'origine dédiés à la détection de fuite de gaz, leurs gammes de mesure sont comprises entre 200 et 10 000 ppm (0,02 à 1%). Or, le gaz à analyser dans le domaine énergétique peut contenir des éléments ayant des concentrations supérieures à 50%. La nouveauté proposée dans cet article consiste donc à trouver une solution simple pour permettre aux capteurs MQ-4 et MQ-8 de mesurer des concentrations supérieures à 1%.

La technique de mesure du CH_4 et du H_2 proposée dans cette étude consiste à injecter le gaz sur le capteur placé dans une capsule partiellement fermée. La mesure est évaluée suivant deux critères : la linéarité entre la concentration du gaz et la réponse du capteur, permettant d'établir la gamme linéaire de mesure ; et la répétabilité de la mesure. Le gaz étalon utilisé pour tester la mesure du méthane est composé de 20% de CH_4 , 10% de CO_2 et 70% d'He tandis que celui utilisé pour tester la mesure de l'hydrogène est composé de 99,99% de H_2 .

2 Matériels et méthodes

2.1 Les capteurs MQ

Les capteurs MQ sont des détecteurs de gaz classés dans la catégorie des capteurs résistifs. Leur principe de détection est basé sur la variation de la résistance électrique d'une couche sensible suivant la présence du gaz à mesurer. Pour les capteurs de la série MQ, la partie sensible est formée d'un tube en céramique Al_2O_3 recouverte d'une couche de SnO_2 . En présence d'air, les molécules d'oxygène sont absorbées à la surface du semi-conducteur, et font augmenter la résistance du

composant. En présence de gaz réducteur, une réaction d'oxydation s'opère entre le gaz et l'oxygène. Ainsi, la résistance du capteur diminue. L'absorption par la couche sensible du capteur est favorisée par la chaleur, ainsi une résistance chauffante est insérée à l'intérieur du tube en céramique pour le mettre dans les bonnes conditions de fonctionnement.

Pour pouvoir mesurer plusieurs types de gaz, la sensibilité de chaque type de capteur MQ est variée en dopant la couche sensible par d'autres éléments et à différentes concentrations. Ainsi, même si le MQ-8 et le MQ-4 détectent tous l'hydrogène et le méthane, leurs sensibilités diffèrent comme on peut le constater sur les graphes de calibrage fournis par le fabricant (Figure 2, Figure 3).

En plus de la résistance sensible (R_S), les capteurs MQ contiennent aussi une résistance de charge (R_L) variable qui permet de modifier la sensibilité. La Figure 1 montre le schéma électrique équivalent des capteurs MQ, où V_C représente la tension d'alimentation.

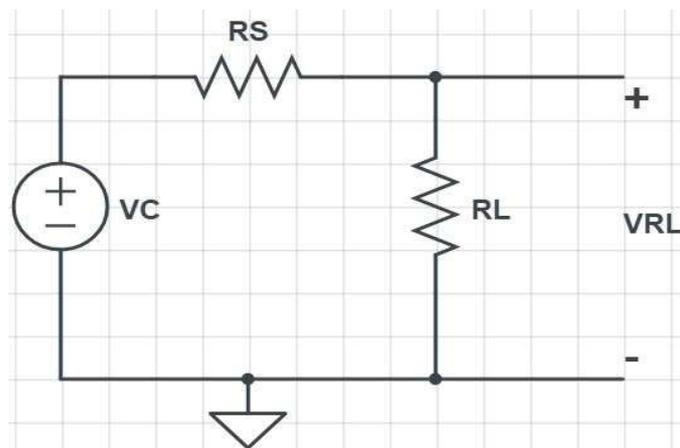


Figure 1 : Schéma équivalent électrique des capteurs MQ [11] [12]

La variation de la résistance de la couche sensible (R_S) est calculée à partir de la mesure de la tension de sortie (V_{RL}) selon l'équation(1).

$$R_S = \frac{V_C \times V_L}{V_{RL}} - R_L \quad (1)$$

La tension de sortie V_{RL} est déduite de la valeur du signal analogique (A) envoyé par le capteur vers la carte Arduino. Pour l'Arduino UNO, la valeur maximale de ce signal analogique est de 1 023, ainsi la tension V_{RL} est calculée suivant l'équation (2).

$$V_{RL} = A \frac{V_C}{1024} \quad (2)$$

Avant chaque mesure, une étape de calibrage est nécessaire pour déterminer la valeur de la résistance du capteur à l'air ambiant (R_0). La concentration du gaz à mesurer est alors déduite de la valeur du rapport R_s/R_0 à l'aide des courbes de calibrage (Figure 2, Figure 3).

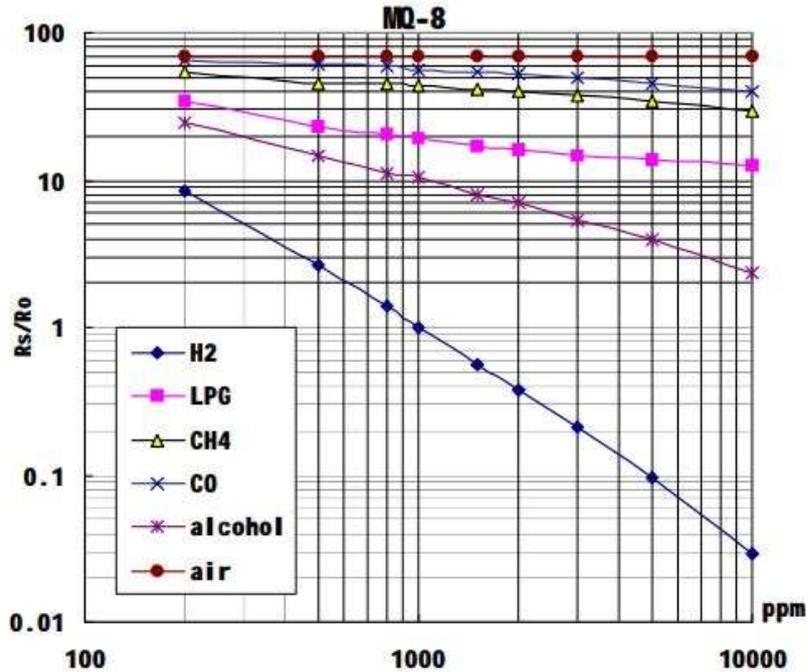


Figure 2 : Sensibilité du MQ-8 à une température de 20°C, une humidité relative de 65%, et une résistance de charge $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ [12]

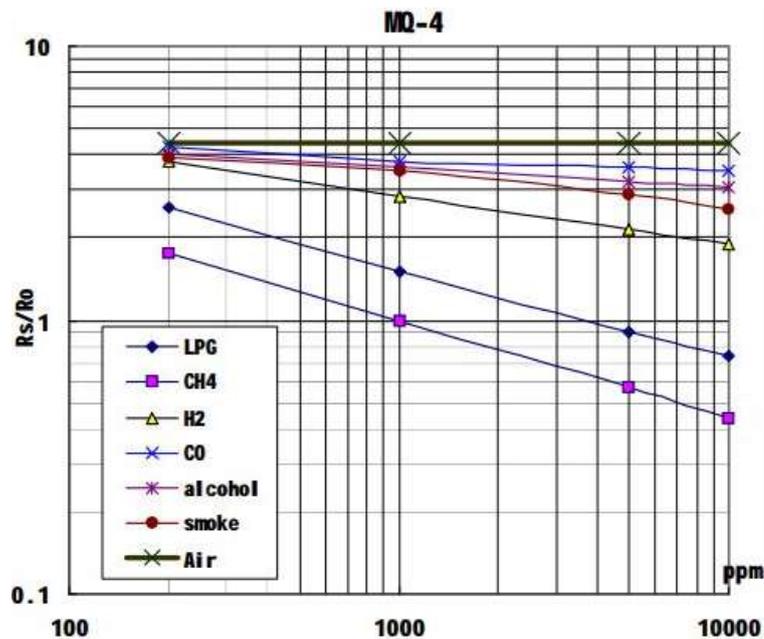


Figure 3 : Sensibilité du MQ-4 à une température de 20°C, une humidité relative de 65%, et une résistance de charge $R_L = 20 \text{ k}\Omega$ [11]

2.2 Dispositif expérimental

La Figure 4 montre le capteur placé dans une capsule partiellement fermée. La capsule a un volume réduit qui limite le mouvement du gaz à l'intérieur. Le peu d'espace disponible entre les parois internes de la capsule et la surface active du capteur permet à ce dernier de mieux réagir au gaz.



Figure 4 : Le capteur placé dans une capsule partiellement fermée

Pour permettre l'injection du gaz, la capsule dispose d'un tube de 25 mm de longueur dont l'extrémité est ouverte. À part cette ouverture, la capsule isole le capteur de l'environnement extérieur. Cette isolation partielle ralentit l'évacuation du gaz et augmente le temps de contact entre le gaz et le capteur. De plus, l'isolation du gaz par la capsule élimine les influences sur la mesure des mouvements d'air de l'environnement extérieur et peut améliorer la répétabilité. Cependant, comme la capsule n'est pas totalement hermétique et ne permet donc pas la mesure d'une valeur stabilisée, la valeur considérée est le pic enregistré après chaque injection.

La Figure 5 montre la chaîne d'acquisition des mesures comprenant le capteur MQ encapsulé, une seringue graduée pour la dilution et l'injection du gaz, et une carte Arduino UNO qui relie le capteur à un ordinateur pour la collecte des données.

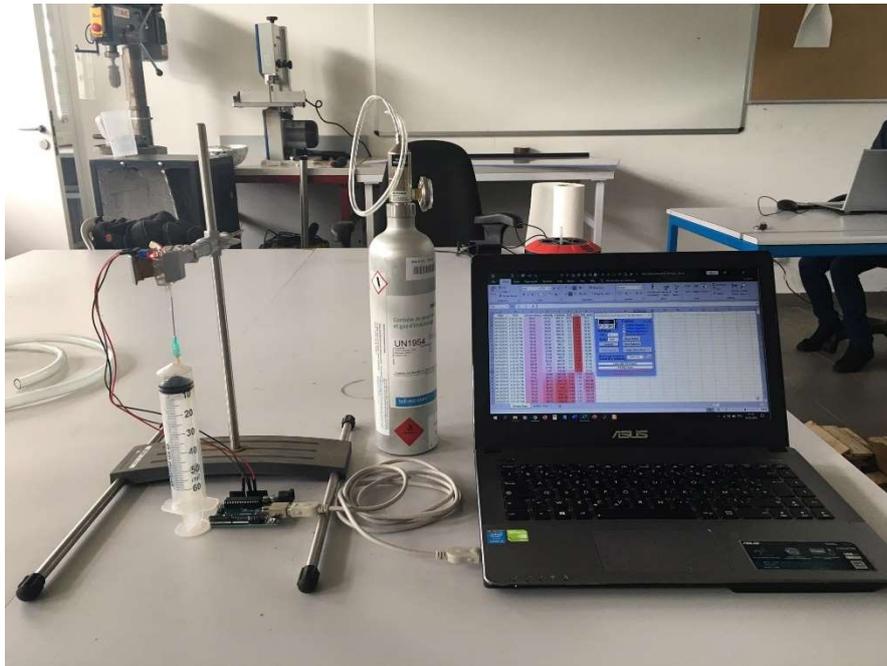


Figure 5 : Le dispositif expérimental composé du capteur encapsulé, de la seringue d'injection et de la chaîne d'acquisition des données

Toutefois, comme les capteurs MQ ne sont pas adaptés pour la mesure de concentration de gaz supérieur à 10 000 ppm, un coefficient correcteur C doit est défini pour chaque capteur pour corriger la mesure. Le coefficient d'étalonnage C est défini dans cette étude par l'équation (3).

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (3)$$

avec

$$Y_i = \frac{R_i}{M_i} \quad (4)$$

où

- Y_i est le rapport de proportionnalité pour un volume donné i ;
- M_i est la valeur de la concentration de gaz mesurée par le capteur pour un volume donné i
- R_i est la concentration de gaz cible dans le mélange injecté pour un volume donné i et n est le nombre d'injections considéré.

Le coefficient d'étalonnage C permet alors d'ajuster la mesure et d'obtenir les valeurs de concentration réelles

3 Résultats

3.1 Mesure du méthane avec le MQ-4

La Figure 6 montre les résultats enregistrés pour 6 séries de mesures du CH₄ dans le gaz étalon composé de 20% de CH₄, 10% de CO₂ et 70% d'He. Six différents volumes de gaz sont prélevés puis mélangés avec de l'air pour former un mélange de 10 ml : 2 ml de gaz + 8 ml d'air, 4 ml de gaz + 6 ml d'air, 6 ml de gaz + 4 ml d'air, 8 ml de gaz + 2 ml d'air et 10 ml de gaz. On constate que le capteur arrive à détecter jusqu'à 42 924 ppm dans la capsule partiellement fermée. Il est à remarquer que cette valeur dépasse la gamme de mesure de 200 à 10 000 ppm indiquée par le fabricant. Cependant, la courbe des moyennes des concentrations des six séries de mesures montre que la réponse du capteur est bien linéaire par rapport au volume de gaz injecté avec un coefficient de corrélation linéaire 0,9973. Il est donc justifié de prendre en compte ces valeurs. Cette possibilité d'utiliser le capteur au-delà de la gamme de mesure indiquée par le fabricant a aussi été constatée par Yang et al. [4], qui ont même mesuré jusqu'à 110 000 ppm de CH₄ dans le biogaz avec le MQ-4.

Concernant la répétabilité des mesures, l'écart-type maximal pour les six volumes de gaz est de 14,28% de la moyenne avec 10 ml de gaz étalon.

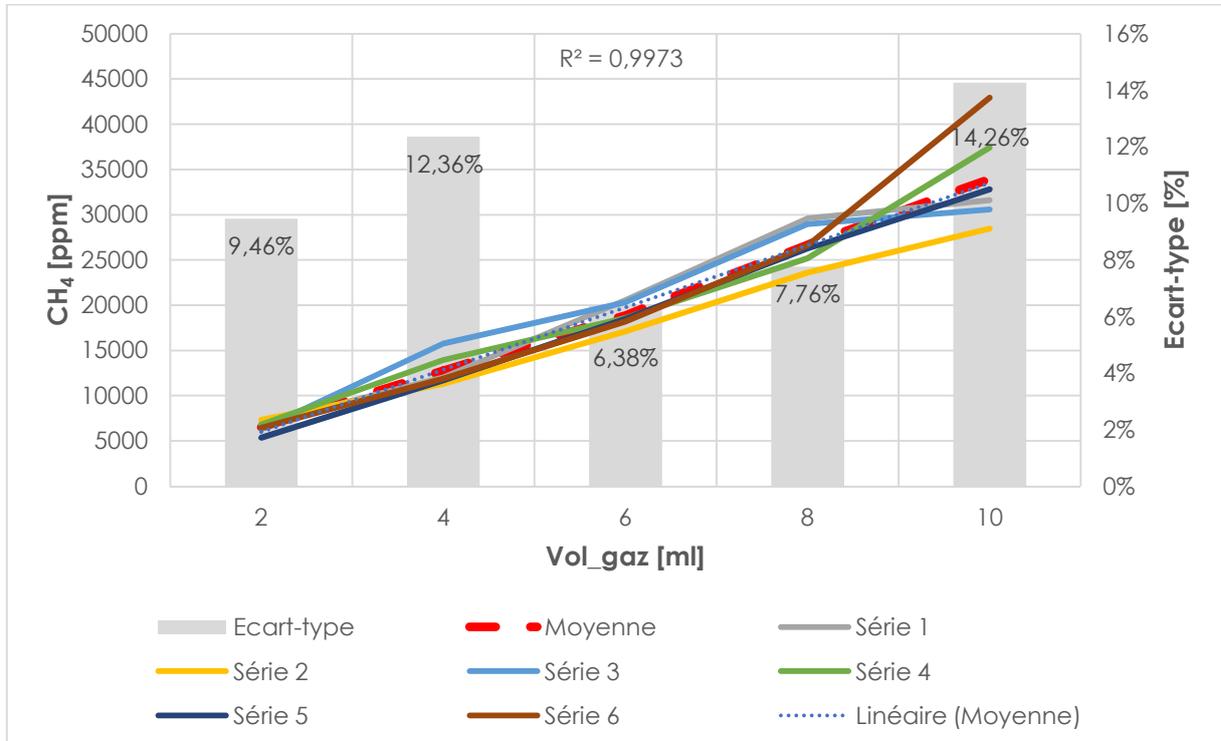


Figure 6 : Variation de la concentration de CH₄ mesurée suivant le volume injecté pour 6 séries de mesures dans une capsule partiellement fermée

Les résultats illustrés dans la Figure 6 montrent que l'utilisation de la capsule partiellement fermée permet d'avoir une bonne linéarité entre le volume injecté et la concentration mesurée, mais aussi une bonne répétabilité de la mesure. Toutefois, les valeurs enregistrées ne correspondent pas encore à la concentration du CH₄ dans le mélange injecté, même si le capteur arrive mieux à le détecter. Il est donc nécessaire de déterminer le coefficient d'étalonnage C à multiplier aux valeurs expérimentales (CH_{4_mes}, M_i dans l'équation (4)) données par le capteur pour calculer la teneur réelle du gaz. Le coefficient d'étalonnage C est déterminé à partir des moyennes des coefficients correspondant à chaque volume injecté. La valeur considérée pour chaque volume est la moyenne des concentrations mesurées pour chaque série. Comme montré dans le Tableau 1, la valeur de C calculée pour la mesure de CH₄ est de 6,19. L'application de ce coefficient pour chaque volume de gaz permet de corriger la mesure du capteur et d'avoir les valeurs de concentration CH_{4_corr}. Les erreurs absolues entre les concentrations du gaz injecté (CH_{4_inj}, R_i dans l'équation (4)) et les mesures corrigées (CH_{4_corr}) sont comprises entre 0,03% et 1,02% avec une moyenne de 0,40%.

Tableau 1 : Calcul du coefficient d'étalonnage du MQ-4

Vol_gaz [ml]	CH_{4_inj} [%]	CH_{4_mes} [%]	Y_i	CH_{4_corr} [%]	Erreur [%]
2	4	0,65	6,14	3,99	0,03
4	8	1,28	6,27	7,83	0,10
6	12	1,89	6,36	11,57	0,32
8	16	2,67	5,99	16,36	0,52
10	20	3,40	5,89	20,82	1,02
Moyenne			6,13		0,40

3.2 Mesure de l'hydrogène avec le MQ-8

Le même protocole utilisé pour la mesure du CH₄ est appliqué pour la mesure du H₂ avec le capteur monté dans une capsule partiellement fermée. Pour limiter la fuite de l'hydrogène injecté favorisée par sa faible densité, le capteur est positionné à l'envers comme illustré sur la Figure 7.



Figure 7 : Positionnement du MQ-8 pour la mesure du H₂ dans la capsule

La Figure 8 montre les valeurs de concentration données par le capteur pour des volumes de H₂ de 2 à 10 ml mélangé avec de l'air pour avoir un mélange de 10 ml. On constate que le capteur n'arrive pas à distinguer les différentes concentrations correspondant à chaque volume, car la teneur trop élevée du H₂ dans le mélange ne permet pas au capteur de fonctionner correctement. Toutefois, on remarque une bonne répétabilité de la mesure pour les volumes de 4 à 10 ml avec un écart-type maximal de 4,81%.

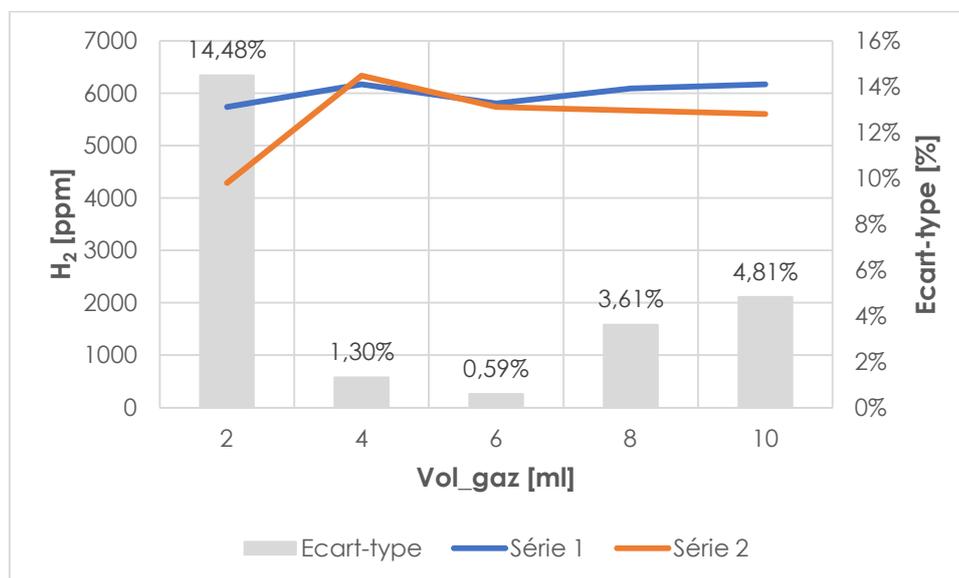


Figure 8 : Variation de la concentration de H₂ mesurée suivant le volume injecté pour un mélange de 10 ml

Pour éviter le problème de saturation du capteur, on augmente la proportion de l'air pour avoir un mélange de 60 ml. La Figure 9 montre les résultats obtenus pour un volume de H₂ variant de 2 à 12 ml avec quatre séries de mesures. On constate une meilleure réponse du capteur vis-à-vis des différents volumes de gaz, même si les

écarts-types croissent par rapport à ceux rapportés dans la Figure 8. On remarque aussi que les écarts entre les valeurs obtenues pour chaque série sont plus faibles avec des volumes de H₂ de 2 à 8 ml. Quand on exclut les résultats correspondants à 10 et 12 ml de H₂, le coefficient de corrélation linéaire entre le volume et la concentration passe de 0,8165 à 0,9472 (Figure 10). Les résultats sont donc plus cohérents pour ces volumes de 2 à 8 ml de H₂.

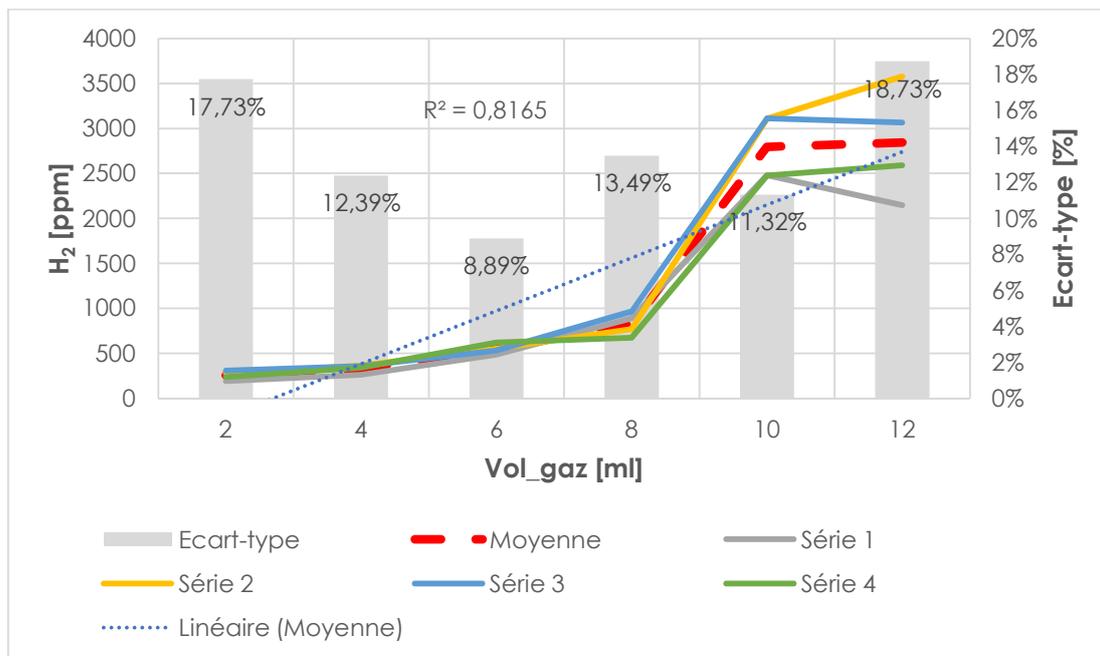


Figure 9 : Variation de la concentration de H₂ mesurée suivant le volume injecté pour un mélange de 60 ml (2 à 12 ml de H₂)

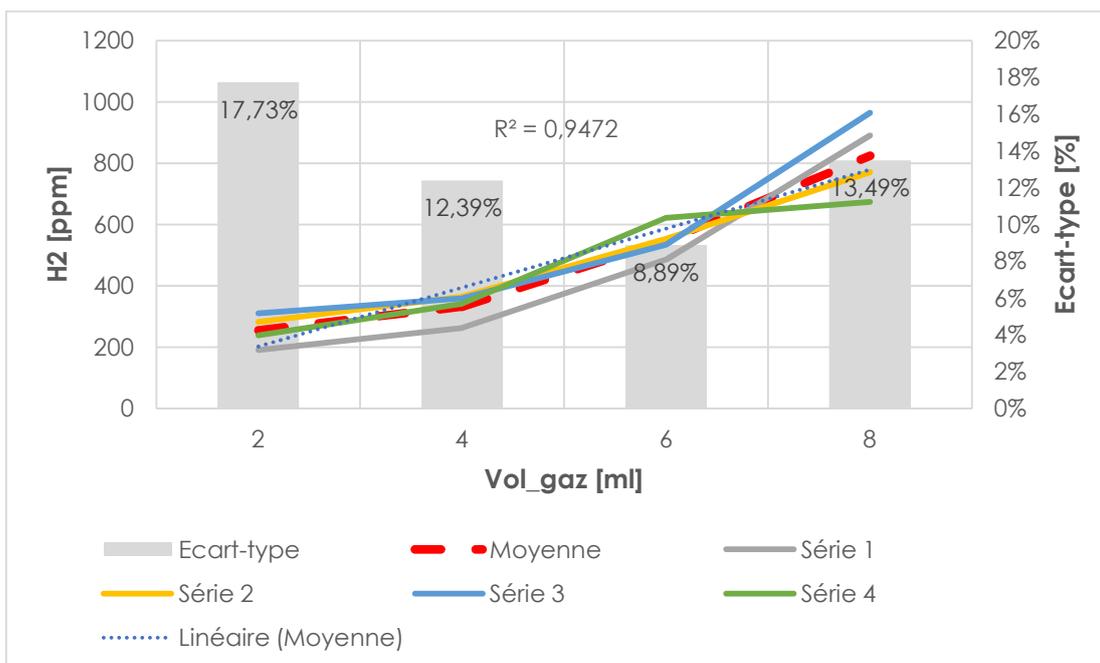


Figure 10 : Variation de la concentration de H₂ mesurée suivant le volume injecté pour un mélange de 60 ml (2 à 8 ml de H₂)

Comme lors de l'étalonnage du MQ-4, un coefficient multiplicateur C est déterminé à partir de la valeur mesurée (H_2_mes , M_i dans l'équation (4)) et de la teneur en H_2 de chaque mélange (H_2_inj , R_i dans l'équation (4)). La valeur du coefficient d'étalonnage C pour le capteur MQ-8 est de 168,77 (Tableau 2 : Calcul du coefficient d'étalonnage du MQ-8 Tableau 2). En utilisant ce coefficient pour corriger la mesure du capteur, on obtient des erreurs absolues allant de 0,58% à 1,06% entre les valeurs corrigées et les teneurs du mélange, avec une moyenne de 0,84%. Il est remarqué que cette erreur diminue quand la quantité de H_2 dans le mélange augmente. La quantité optimale à prélever avec cette technique est donc de 8 ml.

Tableau 2 : Calcul du coefficient d'étalonnage du MQ-8

Vol_gaz [ml]	H ₂ _inj [%]	H ₂ _mes [%]	Y _i	H ₂ _corr [%]	Erreur [%]
2	3,33%	0,026%	130,32	4,32%	0,98
4	6,67%	0,033%	200,82	5,60%	1,06
6	10,00%	0,055%	182,25	9,26%	0,74
8	13,33%	0,082%	161,69	13,92%	0,58
Moyenne			168,77		0,84

4 Discussion

La mesure de la concentration du gaz par injection sur le capteur monté dans une capsule partiellement fermée permet d'avoir une bonne répétabilité de la mesure, car l'environnement où se trouve le capteur est mieux contrôlé. Comme le mouvement du gaz est limité par le faible volume disponible dans la capsule, la couche sensible du capteur est en contact avec une plus grande quantité du gaz réducteur.

Cependant, comme la capsule n'est pas totalement hermétique, le gaz injecté n'est pas conservé au niveau du capteur. Les valeurs considérées sont alors les pics des mesures. De plus, à cause de la taille réduite de la capsule, il est difficile de placer à l'intérieur d'autres capteurs pour mesurer les paramètres de l'environnement comme la température, l'humidité et la pression. Enfin, des écarts sont encore constatés entre les valeurs mesurées et la teneur du mélange injectée. C'est pourquoi la technique utilisée nécessite une étape d'étalonnage, qui permet de corriger les valeurs données par le capteur.

Selon les expériences menées, la technique proposée permet d'avoir une mesure linéaire pour une concentration de CH_4 comprise entre 4 et 20% et une concentration de H_2 comprise entre 3,33 et 13,33%. Toutefois, suivant les datasheets

fournis par les fabricants (cf. Figure 2 et Figure 3), les capteurs MQ-4 et MQ-8 peuvent détecter la présence de CH₄ et de H₂ entre 200 ppm et 10 000 ppm c'est-à-dire de 0,02% à 1%. Comme la technique de dilution du gaz dans la seringue avant injection a permis de repousser la limite supérieure de détection, on peut donc affirmer que la mesure dans la capsule partiellement fermée a une gamme de mesure de 0,02% à 20% pour le CH₄ et de 0,02% à 13% pour le H₂. Pour le cas du H₂, la linéarité entre la concentration du gaz et la réponse du système n'est plus assurée au-delà de 13%. Mais pour le CH₄, la limite supérieure de détection de 20% est liée à la composition du gaz étalon utilisé (20% de CH₄, 10% de CO₂ et 70% de He). En effet, comme on peut voir sur la Figure 6, la réponse du système est restée linéaire même avec le maximum de CH₄ dans la seringue. Il est donc possible que la réponse du capteur reste linéaire pour des concentrations de CH₄ au-delà de cette valeur.

Concernant la sélectivité du système, elle dépend notamment de la courbe d'étalonnage de chaque capteur (voir Figure 2 et Figure 3). Les capteurs MQ-4 et MQ-8 utilisés sont des capteurs semi-conducteurs résistifs à base d'oxyde d'étain (SnO₂) qui réagissent simultanément à plusieurs gaz réducteurs. Si un gaz contient à la fois du CH₄ et du H₂ en proportion égale, alors la réponse du capteur peut provoquer des valeurs confuses par rapport aux courbes d'étalonnage fournies par le fabricant [75, 91, 109, 124]. Dans notre champ d'application (gazéification), cela ne pose pas de problème, car la proportion de ces gaz (CH₄ et H₂) n'est pas équilibrée. En effet, dans le gaz de synthèse, la concentration du H₂ est bien plus élevée que celle du CH₄ [6]. Ainsi, l'influence du CH₄ lors de la mesure du H₂ avec le MQ-8 peut être négligeable.

5 Conclusion

Dans cet article, nous proposons une technique simple et à moindre coût pour la mesure du CH₄ et du H₂ à l'aide de capteurs MQ (MQ-4 pour le CH₄ et MQ-8 pour le H₂). L'objectif de l'étude est de trouver une solution simple et innovante pour pouvoir mesurer des concentrations de gaz supérieur à 1% avec les capteurs MQ qui ont une gamme de mesure limitée à 10 000 ppm. La mesure est évaluée suivant la linéarité et la répétabilité.

La technique proposée consiste à injecter le gaz sur le capteur placé dans une capsule partiellement fermée. Avant injection, le gaz à mesurer est dilué dans la seringue avant de ramener la concentration dans la gamme de mesure du capteur. Le capsule a pour rôle de réduire l'espace disponible entre le capteur et le gaz, améliorant ainsi la réaction entre les deux, et d'isoler le système par rapport à

l'environnement extérieur. Cette technique a ainsi permis d'avoir un coefficient R^2 de 0,9973 pour la mesure du méthane et de 0,9472 pour la mesure de l'hydrogène. L'utilisation de la capsule partiellement fermée a aussi permis de réduire les fluctuations avec un écart-type maximal de 14,26% pour la mesure du méthane et de 17,73% pour la mesure de l'hydrogène. Les expérimentations ont montré que le système a une réponse linéaire avec un gaz contenant jusqu'à 20% de CH_4 et 13,33% de H_2 .

Cette technique de mesure simple, à moindre coût et facilement transportable représente une solution très attrayante pour le contrôle des systèmes de gazéification de la biomasse localisés dans les zones rurales isolées. Elle permet aux opérateurs locaux de maîtriser et d'améliorer les installations existantes tout en évitant les coûts élevés liés à l'acquisition et à l'exploitation des appareils de mesure conventionnels comme les chromatographes. Ainsi, cette étude contribue au développement de l'électrification des zones rurales isolées du réseau.

Références

- [1] N. Ida, *Sensors, actuators, and their interfaces: a multidisciplinary introduction*. 2020.
- [2] S. Fericean, *Inductive sensors for industrial applications*. 2019.
- [3] F. Meng, H. Wang, Q. Ma, D. Wang, et J. Lin, « Emission characteristics of vehicles fueled by hydrogen-enriched syngas under no-load condition », *Int. J. Hydrog. Energy*, févr. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.007.
- [4] S. Yang, Y. Liu, N. Wu, Y. Zhang, S. Svoronos, et P. Pullammanappallil, « Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas », *Renew. Energy*, vol. 138, p. 224-229, août 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.01.083.
- [5] W. A. Ahmed, M. Aggour, et M. Naciri, « Biogas Control: Methane Production Monitoring Using Arduino », *Int. J. Biotechnol. Bioeng.*, vol. 11, n° 2, p. 4, 2017.
- [6] M. Tabatabaei et H. Ghanavati, Éd., *Biogas: Fundamentals, Process, and Operation*, vol. 6. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [7] P. Bajpai, « Biomass conversion processes », in *Biomass to Energy Conversion Technologies*, Elsevier, 2020, p. 41-151.
- [8] N. Indrawan, S. Thapa, P. R. Bhoi, R. L. Huhnke, et A. Kumar, « Engine power generation and emission performance of syngas generated from low-density biomass »,

Energy Convers. Manag., vol. 148, p. 593-603, sept. 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.05.066.

[9] R. Thomson, P. Kwong, E. Ahmad, et K. D. P. Nigam, « Clean syngas from small commercial biomass gasifiers; a review of gasifier development, recent advances and performance evaluation », *Int. J. Hydrog. Energy*, p. S0360319920319625, juill. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.160.

[10] Y. A. Situmorang, Z. Zhao, A. Yoshida, A. Abudula, et G. Guan, « Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 117, p. 109486, janv. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109486.

[11] « Technical Data MQ-4 Gas Sensor ». HANWEI ELETRONICS CO.,LTD.

[12] « Technical Data MQ-8 Gas Sensor ». HANWEI ELETRONICS CO.,LTD.