

Validation of the theory of passive flux sampling for the measurement of greenhouse gases: study of pressure loss in animal housing

Validation de la théorie de l'échantillonnage à flux passif pour la mesure des gaz à effet de serre: étude de la perte de pression dans les bâtiments d'élevage

C.KEFFALA¹, N.MHAMDI², Y.MAHMOUDI³, S.GODBOUT⁴, J.PALACIOS⁴

¹Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem, BP 47, 4042 Chott Mariem (Sousse), Tunisie

²Laboratoire des ressources génétiques animales et alimentaire. Institut National Agronomique de Tunisie.

³Département des Sciences animales, Université Laval, Québec Canada

⁴Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) Québec Canada

*Corresponding author: keffalachema@yahoo.fr

Abstract - The work aims to study the theory of pressure loss within the passive sampler flow provided with a layer of zeolite 5A° at different thicknesses. The results showed that the spherical zeolite allows a lower average pressure with an average of (2.14 ± 0.09) compared to crude and powder zeolite form. Moreover, the analysis of variance revealed a significant difference of pressure variation between the tested thicknesses. To determine the type of relationship between the pressure loss and air speed inside the sampler, two types of regression (linear and potential) were tested. The regression coefficients (R^2) ranged from 0.862 to 0.950 in the case of potential regression; these values are higher than those calculated from linear regression with R^2 varying between 0.76 and 0.85, which confirms the potential relationship between the pressure loss and air speed within passive sampler. Moreover, the results showed that the trend was linear when the air speed was less than 0.2 m/s, but the trend was potential when the air speed was potential. This makes it possible to replace the orifice plate by zeolite layer. This study could be useful for the IRDA team for the design of the future sampler with validated theoretical bases.

Keywords: passive sampler flow, pressure drop, zeolite, potential regression, linear regression

Résumé - Ce travail consiste à l'étude de l'aspect théorique de la perte de pression à l'intérieur de l'échantillonneur à flux passif muni d'une couche d'adsorbant (zéolite 5A°) à différentes épaisseurs. Les résultats ont montré que la zéolite sphérique a permis une perte de pression la moins élevée avec une moyenne de $2,14 \pm 0,09$ par rapport à la zéolite sous forme grossière et poudre. Le test ANOVA a montré une différence significative de la perte de pression entre les différentes épaisseurs de zéolite. Deux types de régression (potentielle et linéaire) ont été appliqués pour déterminer le type de relation entre la perte de pression et la vitesse de l'air à l'intérieur de l'échantillonneur. Les coefficients de régression (R^2) déterminés à partir de la régression potentielle entre la perte de pression et la vitesse varient entre 0,862 et 0,950. Ces coefficients sont plus élevés que ceux calculés par la régression linéaire avec des R^2 qui varient entre 0,76 et 0,85. Ce qui confirme la relation potentielle entre la perte de pression et la vitesse de l'air à l'intérieur de l'échantillonneur. D'autre part, les résultats ont montré une tendance linéaire pour des vitesses inférieures à 0,2 m/s, alors que pour des vitesses supérieures à 0,2 m/s la tendance était potentielle. Il est donc possible de remplacer la plaque à orifice par une couche de zéolite. Cette étude pourrait être utile pour orienter l'équipe de l'IRDA avec des bases théoriques validées dans la conception du futur échantillonneur.

Mots clés : échantillonneur à flux passif, perte de pression, zéolite, relation potentielle



1. Introduction

L'émission de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre (GES) est une préoccupation environnementale récente pour le secteur agricole. Ce dernier se caractérise par l'émission de gaz causant un réchauffement plus important que le dioxyde de carbone (CO₂), soit le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O). Dans le cadre de la lutte contre le changement climatique et en vue de l'amélioration de la qualité de l'air, la maîtrise de ces émissions est à prendre en compte dans l'évolution des pratiques d'élevage (alimentation, choix des types de bâtiment, mise en place de procédés de traitement des émissions, pratiques de gestion des effluents...) mais aussi le développement des techniques de mesure des émissions de gaz. Dans la littérature, plusieurs méthodes de mesure des émissions de gaz ont été développées. On cite la méthode de la chambre de flux de gaz fondée sur le principe d'isoler un segment bien défini de la surface d'émission sous une coupole étanche (chambre ouverte (Husted 1993) ou fermée), les méthodes micro météorologiques pour mesurer le flux moyen du gaz à partir d'une grande surface par l'utilisation des capteurs météorologiques chimiques à réponse rapide et les méthodes optiques et celles de flux traceur (Siswoyo, 2003). Ces techniques sont très sophistiquées, coûteuses et peu pratiquées. Le recours à une technique de mesure des émissions peu coûteuse, facile à utiliser et applicable sur terrain rend le concept de réduction des GES plus abordable. L'échantillonnage à flux passif permet la mesure de l'émission ou de la concentration d'un gaz visé et reste la technique la plus pratique et économique pour être utilisée dans les conditions particulières des activités agricoles. La technique repose sur la diffusion de l'air et du gaz ciblé à travers une surface diffusivité constituée d'un adsorbant poreux (Sigma-Aldrich Co 2008) ou sur l'infiltration du gaz à travers une membrane semi-perméable ou un milieu poreux (Kot-Wasik et al. 2007). Le gaz ciblé est retenu par l'adsorbant par contre l'air continue son trajet et sort par le cône postérieur en traversant l'orifice qui permet la linéarité entre la vitesse de l'air extérieur et intérieur de l'échantillonneur (Palcios 2010). La désorption et l'analyse du gaz capturé se font au laboratoire au moyen d'une désorption thermique ou chimique (Palacios 2010).

Echantillonneur à flux passif développé par Godbout et al. (2006) et Gaudet (2005)

L'échantillonneur à flux passif développé par Godbout et al. (2006) et Gaudet (2005) est basé sur le principe de l'échantillonneur de Ferm (1986) ainsi que les théories de Scholtens et al. (2003) et Schjoerring et al. (1992). L'échantillonneur a une longueur de 175mm et un diamètre de 50mm. Il est fabriqué en acier inoxydable et composé d'un cône antérieur (1) qui correspond à l'entrée de l'air à partir d'un tube de 6,35 mm de diamètre suivi d'une section conique avec un angle de 14,6; d'une cartouche (2) qui lie les cônes antérieur et postérieur et contient l'adsorbant et d'un cône postérieur (3) qui correspond à la sortie de l'air vers l'extérieur à travers un tuyau de diamètre de 6,35mm (figure 1).

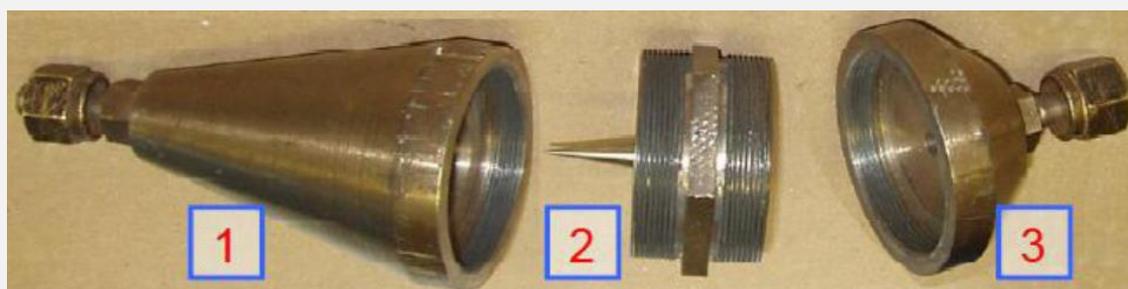


Figure 1 : Echantillonneur à flux passif développé par Godbout et al. 2006) et Gaudet (2005)

Une petite plaque circulaire avec un orifice de 0,52 mm est associée au cône postérieur afin de contrôler et de réduire le débit d'air dans l'échantillonneur. Ce type d'échantillonneur utilise la circulation de l'air comme force motrice: lorsque l'air passe à travers l'échantillonneur, le gaz cible est collecté par un lit d'adsorbant. Après l'échantillonnage et la mesure du gaz adsorbé, l'émission est déterminée au moyen de l'équation 1 suivante :

$$F = \frac{M}{\pi r^2 K_s \Delta t} = \frac{M}{\pi r^2 K \Delta t} \quad (1)$$

Avec:

F= Flux du gaz (exprimé en $\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), M: Masse de gaz ciblé collecté (exprimée en g), r : rayon de l'orifice (exprimé en m), K_s : Constante de calibration de l'échantillonneur à partir de la vitesse de l'air dans l'orifice, R: Rayon du tuyau de sortie (exprimé en m), K: Constante de calibration de l'échantillonneur à partir de la vitesse de l'air dans le tuyau de sortie, et Δt : Temps d'échantillonnage (exprimé en s). Dans le but de concevoir un échantillonneur présentant un nouveau design et la commercialisation de l'appareil, l'équipe de recherche en charge ont proposé d'ôter l'orifice de l'échantillonneur et le remplacer par une couche d'adsorbant d'une épaisseur déterminée. Palacios et al. (2009) ont étudié cette possibilité en évaluant le type de perte de pression de l'air lorsqu'il traverse la couche d'adsorbant dans l'échantillonneur. Palacios et al. (2009) ont proposé de représenter la couche de zéolite comme un milieu poreux. Ainsi, en mécanique de fluides, l'équation d'Ergun (équation 2) est l'expression couramment employée reliant, entre autres, la vitesse et la chute de pression dans un milieu poreux (Ergun, 1952, Liu et al. 1994;Niven, 2001.)

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \mu v_s}{D_p^2} + \frac{1.75 \rho v_s^2}{D_p} \quad (2)$$

Avec,

L est l'épaisseur du tamis en m, μ est la viscosité dynamique du fluide en $\text{kg m} / \text{s}$, D_p est le diamètre moyen des particules en m, ϵ est la fraction de vide, défini comme étant le volume des vides divisé par le volume du milieu poreux et v_s est la vitesse superficielle en m / s . Toutefois, l'application de l'équation d'Ergun dépend du type de régime d'écoulement dans le milieu poreux. Le type de régime d'un écoulement est normalement défini par le nombre de Reynolds. Mais le calcul du nombre de Reynolds d'un écoulement dans un milieu poreux (Re_p) est modifié particulièrement tel que montré à l'équation 3.

$$Re_p = \frac{\rho v_s D_p}{\mu} \quad (3)$$

Ainsi, pour les écoulements de type laminaire, soit lorsque $Re_p < 10$, où le flux agit sous les effets visqueux, la deuxième partie de l'équation d'Ergun (équation 1) peut être diminuée, résultant donc l'équation 4, connue comme l'équation de Blake-Kozeny (Fluent Inc., 2003).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 \mu v_s}{D_p^2} \quad (4)$$

Pour les écoulements de type turbulent, soit lorsque $Re_p > 1000$, où les forces cinétiques dominent le flux, la première partie de l'équation d'Ergun (équation 2) peut être diminuée, résultant donc l'équation 5, connue comme l'équation de Burke-Plummer (Burke et Plummer, 1928 et Wilkers 2006).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{1.75 \rho v_s^2}{D_p} \quad (5)$$

Dans ce dernier cas, la relation entre la vitesse du flux et la perte de pression produite par le milieu poreux (soit l'adsorbant dans l'échantillonneur) est de forme potentielle ($\Delta P \approx V^2$), similaire à l'effet produit par la plaque à orifice. Dans ce cas, il serait possible de remplacer l'orifice par une couche d'adsorbant. Cependant, lorsque Palacios et al (2009) ont tenté de déterminer la relation entre la vitesse d'écoulement et la perte de pression, des problèmes de précision de mesure ont survécu dû, entre autres, aux faibles débits d'air évalués dans l'échantillonneur. En conséquence, une façon différente d'étudier le phénomène pour répondre à la question doit être envisagé.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer expérimentalement, et de façon standard, la corrélation entre la perte de pression et la vitesse de l'air traversant une couche de zéolite (adsorbant) en vue de remplacer la plaque à orifice de l'échantillonneur à flux passif par une couche de zéolite à une épaisseur appropriée.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Montage expérimental

Le montage expérimental a été construit en suivant les indications de la norme ISO 5167-2:2003 (E). Des tubes et des joints en PVC ont été utilisés pour la construction de la conduite. Cette dernière est branchée à une pompe (source de propulsion de l'air), un débitmètre et un senseur de pression. La

jointe reliant la partie antérieure (A) et postérieure (C) du conduit servait de cartouche (B) pour l'installation de la couche d'adsorbant (figure 2). Plusieurs épaisseurs de couche d'adsorbant ont été testées : 3, 5, 7, 9 et 11 mm d'épaisseur.

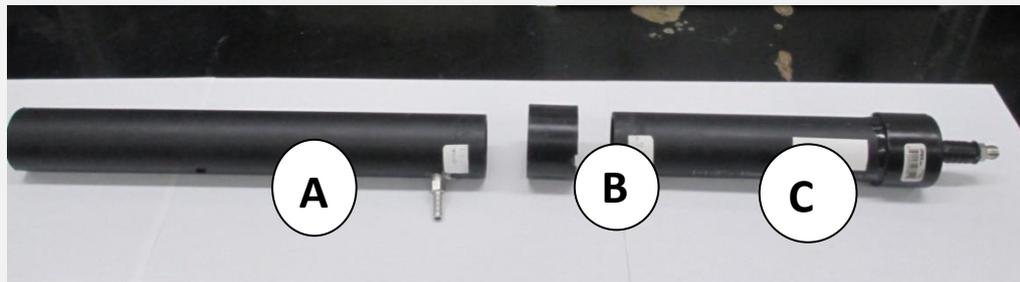


Figure 2. Montage expérimental

L'adsorbant utilisé est la zéolite sous forme granuleux, sa masse volumique est de $0,7\text{g/cm}^3$. Afin de retenir l'adsorbant dans la cartouche, des maillages sous formes de cercles ayant le même diamètre interne du conduit ont été utilisés.

2.2. Détermination des diamètres des différents types de zéolite

La zéolite a été évaluée sous trois formes différentes: sphérique, grossière et poudre. Le diamètre des sphères a été mesuré avec un pied à coulisse. Sept échantillons ont été mesurés et la moyenne a été calculée. Le diamètre moyen est de 2,3 mm. Le diamètre de la zéolite grossière (concassée grossièrement à l'aide d'un mortier) a été mesuré par la méthode de tamisage qui consiste à introduire la zéolite désagrégée dans le tamis supérieur d'une colonne de tamisage. A chaque fois, le contenu de chaque tamis est pesé. Le diamètre a été déterminé en interpolant le diamètre de particules correspondant au 50% du poids cumulé moyen des échantillons (figure 3). Le diamètre moyen est de 0,53 mm. Alors que pour la zéolite sous forme poudre, le diamètre n'a pas été déterminé par manque d'équipements nécessaires.

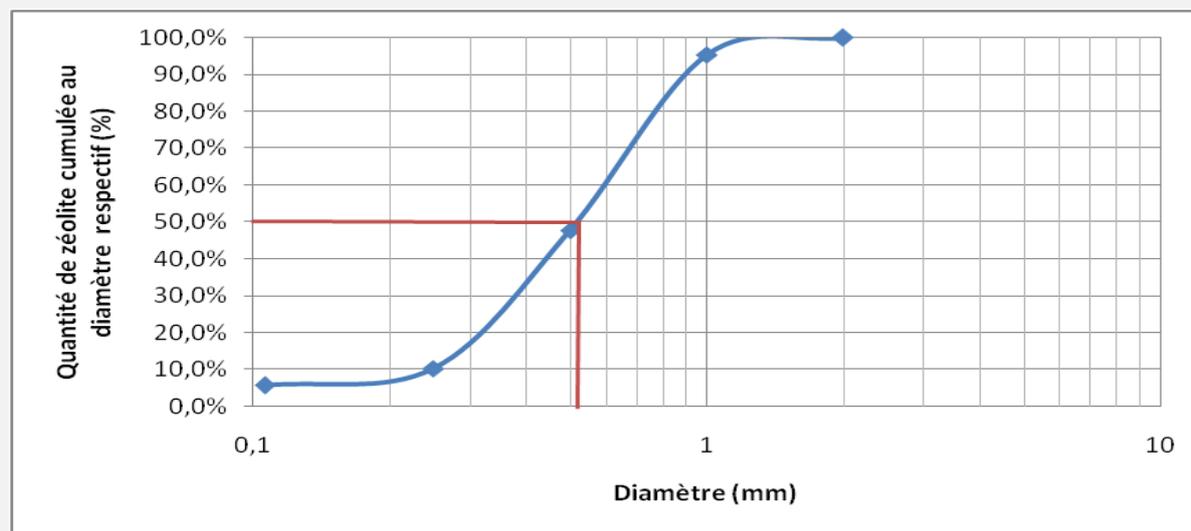


Figure 3. Détermination du diamètre de la zéolite sous forme grossière

Le plan expérimental est composé de trois répétitions. Chaque répétition est composée de l'évaluation de la perte de pression de cinq épaisseurs de zéolite (3, 5, 7, 9 et 11 mm) en formes de granules sphériques et deux épaisseurs de zéolite (5 et 9 mm) en forme grossière (concassée grossièrement) et poudre. Finalement, la perte de pression a été déterminée pour une plaque à orifice.

2.3. Mesure de la perte de pression

L'entrée du montage expérimental est connectée à la pompe reliée à une vanne pour le réglage du débit. Un anémomètre branché au montage permet l'enregistrement des débits, des vitesses et des pertes de pression en même temps. Afin de vérifier de la possibilité de remplacer la plaque à orifice par une couche de zéolite, le même montage a été utilisé tout en remplaçant le maillage et la couche de zéolite par une plaque à orifice.

La perte de pression théorique a été calculée selon l'équation 6 suivante

$$\Delta P_D = \frac{F_D}{A_P} = \frac{1}{2} C_D \rho V_m^2 \quad (6)$$

Avec:

ΔP = Différence de pression causée par le corps de l'échantillonneur, exprimée en Pascal (Pa), F_D = Force de résistance à la surface de l'échantillonneur, exprimée en Newton (N), A_P = Aire du corps projeté perpendiculairement au flux de l'air, exprimée en m^2 , C_D = Coefficient de friction, adimensionnel, ρ = Densité de l'air, exprimée en $kg.m^{-3}$ et V_m = Vitesse de l'air après l'échantillonneur, exprimée en $m.s^{-1}$.

2.4. Analyses statistiques

Les données ont fait l'objet d'analyses statistiques descriptives générées par le logiciel SAS (version 9.13) (SAS, 2001). L'analyse de la perte de charge (ΔP) a porté sur les valeurs obtenues après transformation logarithmique, cette procédure étant classiquement appliquée pour normaliser les données. L'équation de transformation est :

$$\Delta P = \log_{10}(\Delta P) + 1$$

L'analyse de la variance (ANOVA) par la procédure GLM (Modèle Linéaire Général) avec le test LSD (least-significant-difference) a été utilisée pour étudier la variation de la perte de pression en fonction de la forme et de l'épaisseur ainsi que la combinaison forme-épaisseur de la zéolite. Une différence de ($P < 0,05$) a été considérée statistiquement significative.

Le modèle linéaire est :

$$Y_{ijk} = \mu + F_i + E_j + F^*E_{ij} + e_{ijk}$$

Avec:

Y_{ijk} = la perte de pression, μ = la moyenne, F_i = effet fixe de la forme de la couche de zéolite, E_j = effet fixe de l'épaisseur de la zéolite, F^*E_{ij} = effet fixe de l'interaction épaisseur- forme de la zéolite et e_{ijk} = l'erreur résiduel.

Ainsi deux types de régression ont été appliqués pour identifier le type de relation entre la perte de pression et la vitesse à l'intérieur de l'échantillonneur passif : la régression linéaire et la régression potentielle. En se basant sur le coefficient de régression on peut déterminer le type de relation et par conséquent voir la possibilité de remplacer l'orifice par une couche de zéolite. Le test de Student (T-test) a été appliqué pour comparer la perte de pression en utilisant un orifice et une couche de zéolite.

3. Résultats et discussions

Le coefficient de régression nous renseigne sur la qualité du modèle appliqué sur les données mesurées. De plus, il nous donne une idée sur le type de relation entre la variable expliquée et la variable explicative. Afin de déterminer le type de relation entre la perte de pression et la vitesse d'air traversant les différentes couches de zéolite, deux types de régression ont été appliquées à différentes épaisseurs : une régression linéaire et une régression potentielle. Les résultats ont montré que les coefficients de régression (R^2) varient entre 0,862 et 0,950 dans le cas de la régression potentielle alors que ces coefficients varient entre 0,76 et 0,85 dans le cas de la régression linéaire (tableau I).

Tableau I. Coefficients de régression (R^2) calculés pour la zéolite sous forme sphérique

| Epaisseurs (mm) | R^2 (relation potentielle) | R^2 (relation linéaire) |
|-----------------|------------------------------|---------------------------|
| 3 | 0.862 | 0.850 |
| 5 | 0.908 | 0.784 |
| 7 | 0.876 | 0.820 |
| 9 | 0.912 | 0.760 |
| 11 | 0.950 | 0.837 |

Lorsque le montage (contenant la zéolite sous forme sphérique) est branché à une source d'air, la chute de pression à l'intérieur de l'échantillonneur est potentielle à la vitesse d'air à l'intérieur (figure 4). Cette relation potentielle est confirmée par les coefficients de régression qui sont plus importants dans la régression potentielle pour les différentes épaisseurs de la zéolite.

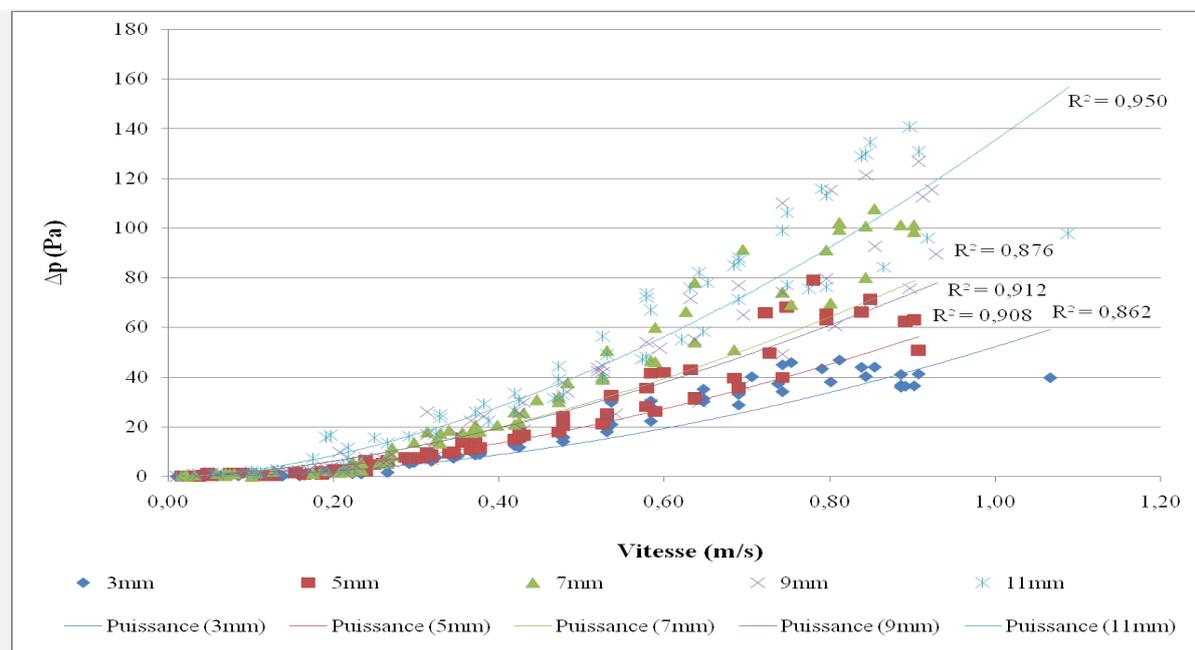


Figure 4. Régression potentielle de la chute de pression en fonction de la vitesse

D'autre part, les pertes de charges mesurées dans le cas de la zéolite sous forme sphérique sont plus élevées que celles théoriques (figure 5), ceci pourrait être du soit à un problème de calibration, soit au maillage qui peut augmenter la perte de charge ou aussi au montage, qui, assez petit aboutissant à une mesure non précise. La figure 5 montre que la tendance est potentielle à des vitesses supérieures à 0,2 m/s tandis que, pour des vitesses inférieures à 0,2 m/s, la tendance est linéaire. Ainsi, il est possible de remplacer la plaque à orifice par une couche de zéolite si les vitesses d'air à l'intérieur de l'échantillonneur sont supérieures à 0,2 m/s.

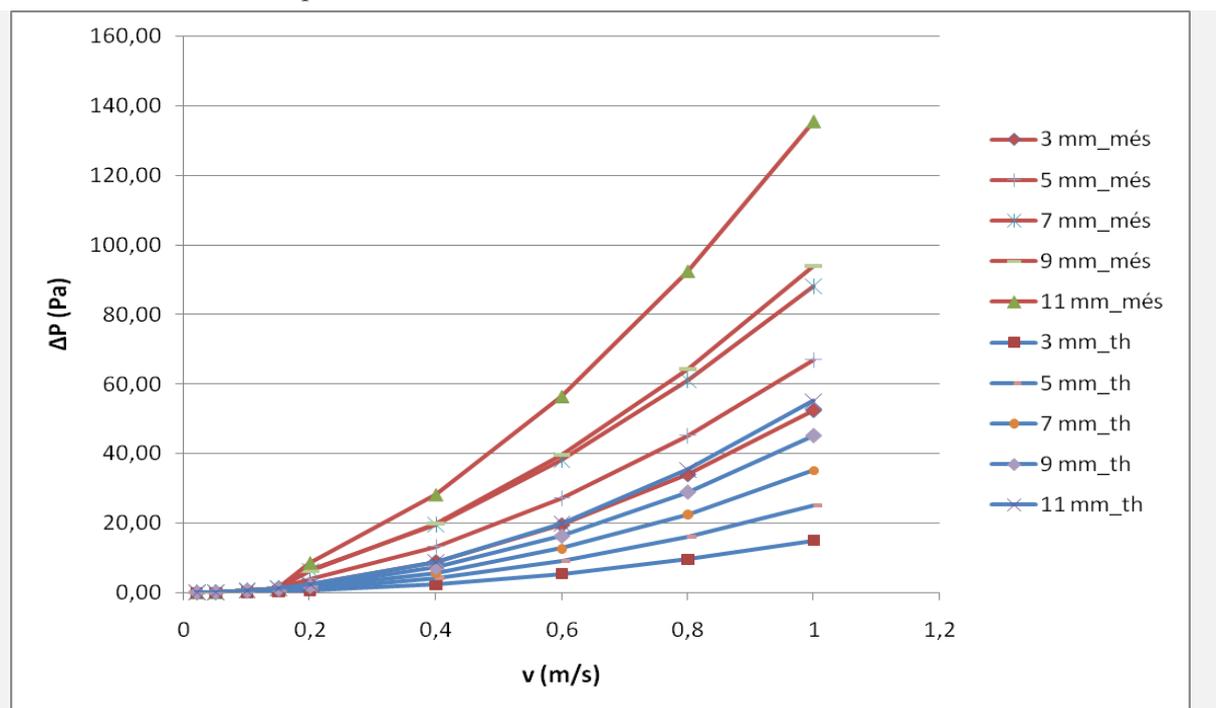


Figure 5. Variation de la perte de pression mesurée et théorique en fonction de la vitesse

La régression linéaire (figure 6) et la régression potentielle (figure 7) de la perte de pression à des faibles vitesses (<0,2 m/s) montre une relation linéaire en utilisant la zéolite sous forme de poudre ($R^2 = 0,74- 0,92$) et une relation potentielle en utilisant la zéolite sous forme grossière ($R^2 = 0,95- 0,97$). L'utilisation de zéolite en poudre est donc déconseillée.

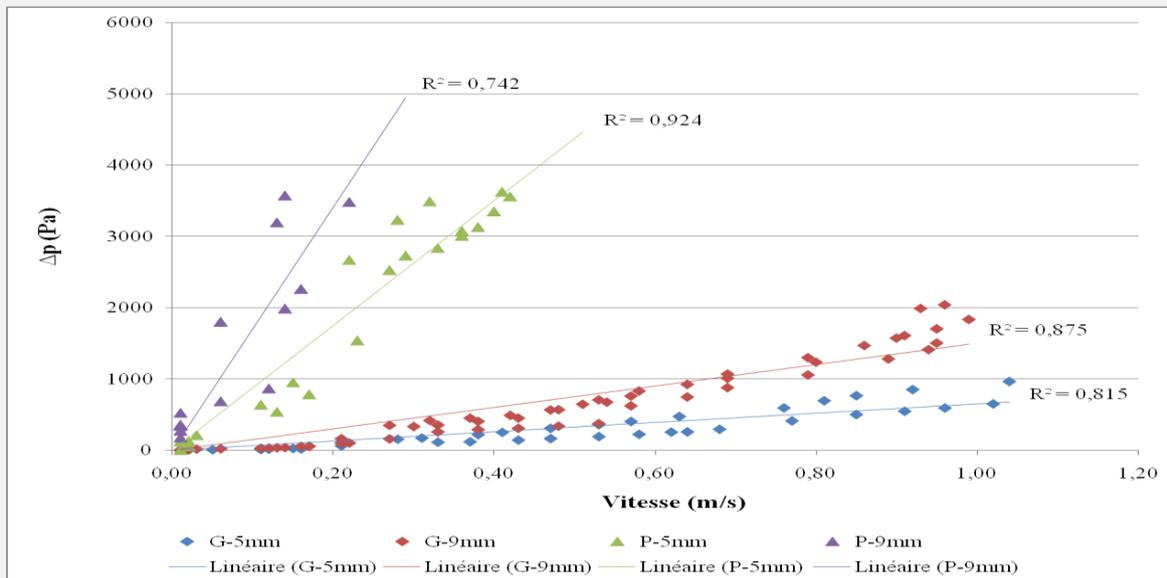


Figure 6. Régression linéaire de la chute de pression en utilisant la zéolite sous forme grossière et poudre

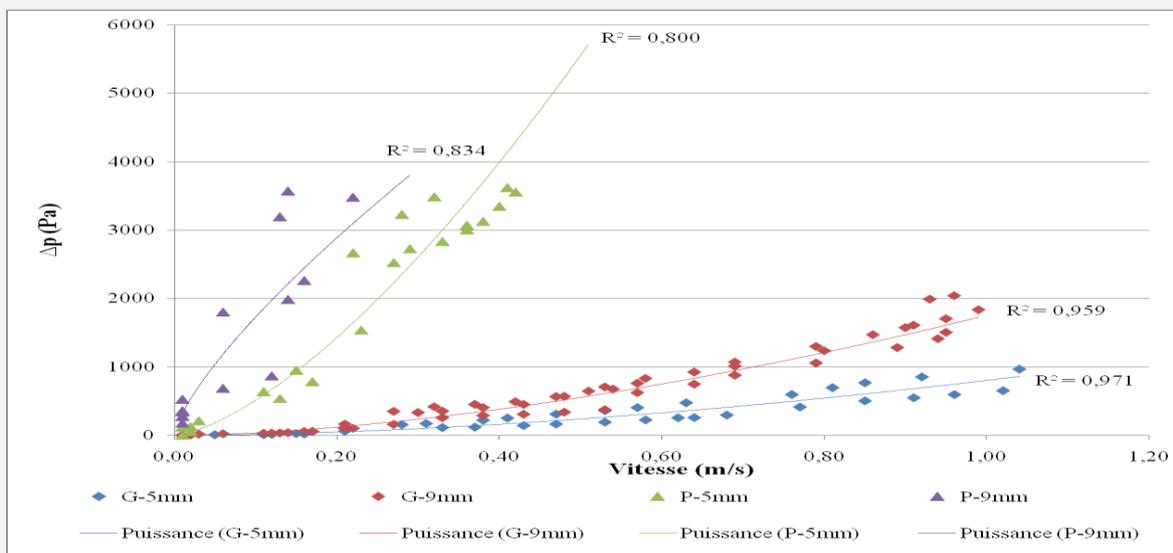


Figure 7. Régression potentielle de la chute de pression en utilisant la zéolite sous forme grossière et poudre

Cependant, dans le cas de l'utilisation d'une plaque à orifice dans l'échantillonneur à flux passif, le coefficient de régression R^2 est de 0,556 pour la régression linéaire, alors que ce coefficient est de l'ordre de 0,827 pour la régression potentielle (figure 8). Il existe donc une relation potentielle entre la perte de pression et la vitesse.

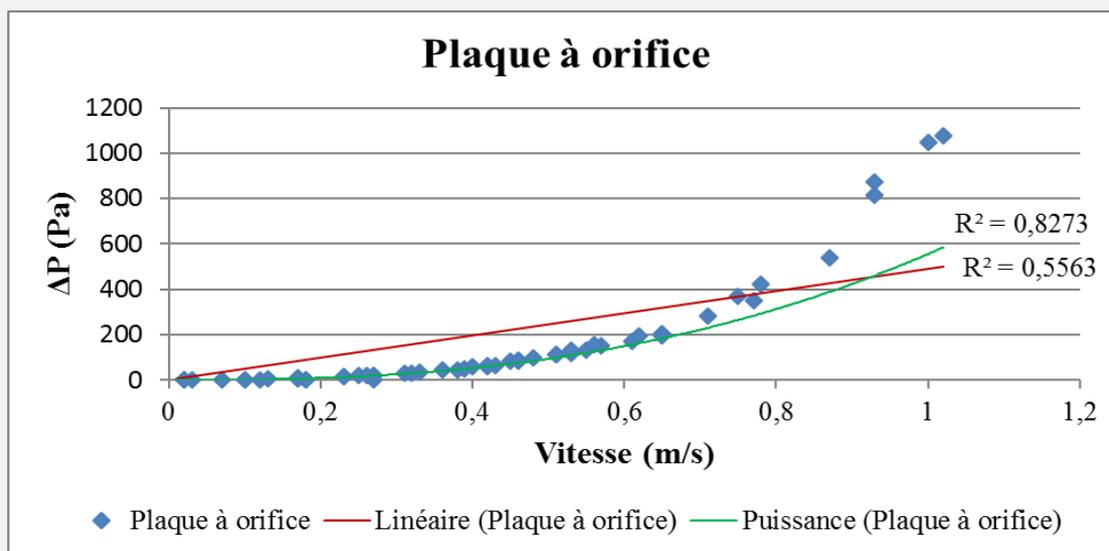


Figure 8. Variation de la perte de pression en fonction de la vitesse à travers une plaque à orifice

Le nombre de Reynolds calculé pour la zéolite sphérique est proche de 1000 (tableau II), des vitesses plus grandes de 3,55 m/s, c'est-à-dire que le régime d'écoulement est turbulent ce qui explique la relation potentielle entre la chute de pression et la vitesse d'air à l'intérieur de l'échantillonneur.

Tableau II : Calcul du nombre de Reynolds

| Type de zéolite | | Sphérique | Re | Concassé | Re | Poudre | Re |
|--------------------------------|----------------------|-----------|------|-----------|-------|-----------|----|
| Densité ap. zeol | (g/cm ³) | 0,7 | | 0,75 | | 0,75 | |
| desitéréellezeol. | (g/cm ³) | 1,3 | | 1,3 | | 1,3 | |
| Diamètre des particules | (m) | 0,0023 | | 0,00053 | | | |
| Viscosité | (kg/m/s) | 0,0000182 | | 0,0000182 | | 0,0000182 | |
| Porosité | - | 0,46 | | 0,42 | | 0,42 | |
| Densité air | (kg/m ³) | 1,204 | | 1,204 | | 1,204 | |
| | | 0,02 | 6 | 0,02 | 1,2 | | - |
| | | 0,2 | 57 | 0,2 | 12,2 | | - |
| Vitesse superficielle | (m/s) | 0,5 | 141 | 0,5 | 30,4 | | - |
| | | 1 | 283 | | 60,8 | | - |
| | | 3,55 | 1003 | | 215,7 | | - |

L'analyse de la variance (ANOVA) a révélé un effet hautement significatif ($P < 0,001$) de la forme de la zéolite sur la perte de pression de l'échantillonneur. En effet, la zéolite sphérique a permis une perte de charge la moins élevée avec une moyenne de $2,14 \pm 0,09$ (Pa) alors qu'aucune différence significative n'a été démontrée entre la zéolite en poudre et grossière ($3,45 \pm 0,27$ (Pa) et $3,33 \pm 0,17$ (Pa), respectivement), cela a été confirmé par le test Duncan qui a permis de classer les formes de la zéolite en deux classes a et b (figure 9).

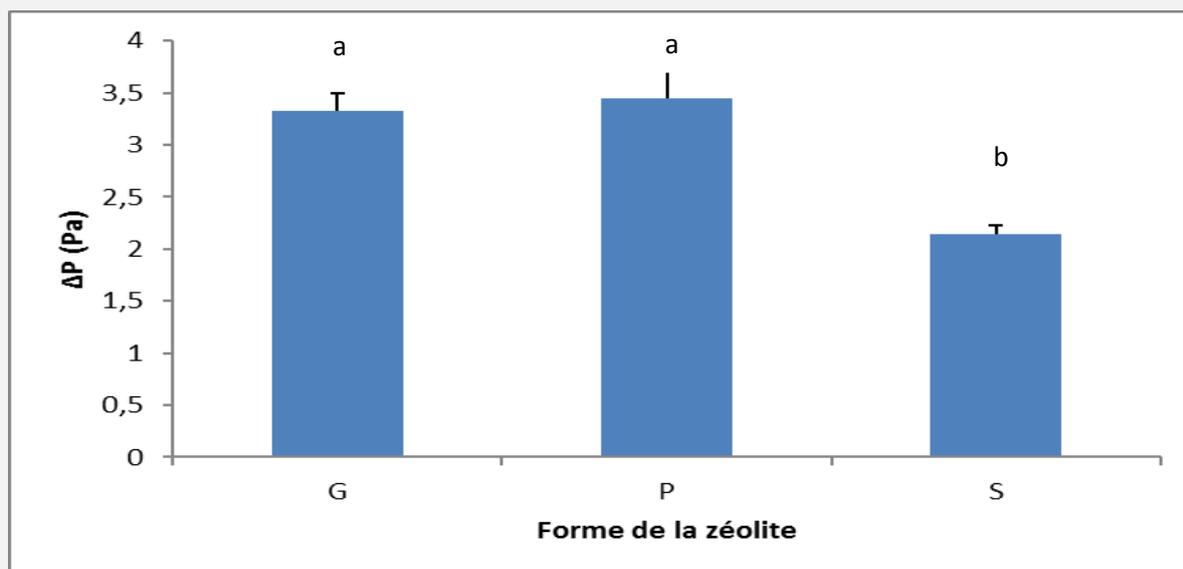


Figure 9. Variation de la perte de charge en fonction de la forme de la zéolite (avec G : forme grossière ; P : forme poudre ; S : forme sphérique)

Quelle que soit la forme de la zéolite, l'épaisseur de la couche des particules a un effet hautement significatif ($P < 0,001$) sur la perte de pression de l'échantillonneur. La perte de pression la moins élevée (2,8) a été obtenue pour la plus faible épaisseur (3mm) (figure 10).

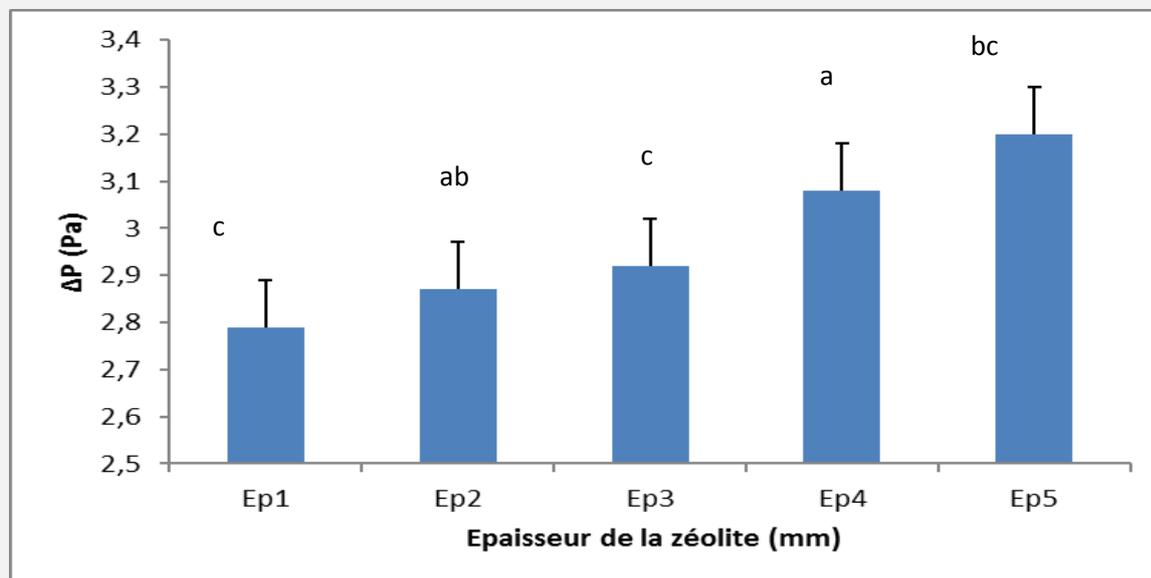


Figure 10. Variation de la perte de charge en fonction de l'épaisseur de zéolite (avec Ep1, Ep2, Ep3, Ep4 et Ep5 sont respectivement 3, 5, 7, 9, et 11 mm)

4. Conclusion

La potentialité des techniques d'échantillonnage passif et leur opérationnalité a été évaluée au sein de différents projets, soutenus par des organismes publics au Canada. Cette étude vise à valider l'aspect théorique de la perte de pression à l'intérieur de l'échantillonneur pour faciliter la conception d'un nouveau échantillonneur à flux passif afin d'améliorer son efficacité pour la mesure des émissions des gaz à effet de serre. Un montage expérimental capable de représenter et mesurer le phénomène de la

perte de pression de l'échantillonneur a été construit. En utilisant une conduite ayant un diamètre plus grand que l'échantillonneur a permis d'obtenir des données plus fiables. Ainsi, la perte de charge de l'air a été mesurée à différentes vitesses et à différentes épaisseurs de la zéolite. De plus, la mesure de la perte de pression de l'air traversant une plaque à orifice a été comparée à la perte de pression de l'air traversant différentes formes de zéolite dans le but d'évaluer la possibilité de remplacer la plaque à orifice de l'échantillonneur par une couche de zéolite. Pour cela, il a été vérifié si la relation est potentielle ou linéaire entre la perte de charge et la vitesse de l'air. Les résultats des expériences montrent une relation potentielle de la perte de pression en fonction de la vitesse à l'intérieur de l'échantillonneur ce qui confirme la possibilité de remplacer la plaque à orifice par une couche de zéolite sphérique. Toutefois, cette condition n'est valide que lorsque la vitesse du flux à travers l'échantillonneur est plus grande que 0,2m/s. En ce qui concerne la forme de la zéolite, l'étude a montré que l'utilisation de la zéolite sphérique comme adsorbant a permis de meilleurs performance, soit, une relation potentielle à faibles vitesses.

5. Références bibliographiques

- Ergun S.** Fluid Flow Through Packed Columns - *Chemical Engineering Progress*, 48, n°2, 1952: 89-94
- Ferm M. (1986)** Concentration measurements and equilibrium studies of ammonia, nitrate and sulphur species in air and precipitation. PhD Thesis, Department of Inorganic Chemistry, Chalmers TekniskaHögskola, Gothenburg, Sweden, 1986.
- Gaudet E. (2005)** The Optimization and testing of a passive flux sampler for methane and nitrous oxide, M. Sc. Thèse, Québec, Faculté des sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, Université Laval, 2005: 166p.
- Godbout S., Phillips V.R., and Sneath R.W. (2006)** Passive Flux Samplers to measure Nitrous Oxide and Methane Emissions from Agricultural Sources, Part 1: Adsorbent Selection - *Biosystems Engineering* 94 (4), 2006: 587-596.
- Godbout S., Phillips V.R., and Sneath R.W. (2006a)** Passive Flux Samplers to measure Nitrous Oxide and Methane Emissions from Agricultural Sources, Part 2: Desorption Improvements - *Biosystems Engineering* 95 (1), 2006a: 1-6
- Husted S. (1993)** An open chamber technique for determination of methane emission from stored livestock manure - *Atmospheric Environment*, 27A, 1993: 1635-1642
- Kot-Wasik A., Zabiegała B., Urbanowicz M., Dominiak E., Wasik A., Namiesnik J. (2007)** Advances in passive sampling in environmental studies - *Analytica Chimica Acta* 602, 2007: 141-163.
- Liu S., Afacan A., and Masliyah J. (1994)** Steady incompressible laminar flow in porous media - *Chemical Engineering Science*, 49, 1994: 3565-3586.
- Niven R.K.** Physical insight into the Ergun and Wen and Yu equations for fluid flow impacked and fluidised beds - *Chemical Engineering Science*, 57, 2002: 527-534.
- Palacios J., Godbout S., Pelletier F., Lemay S. P., Lagacé R., Phillips V. R., Sneath R. W. (2009)** Flow pattern study inside passive flux sampler using molecular sieve. Written for presentation at the CSBE/SCGAB 2009 Annual conference Rodd's Brudenell River Resort, Prince Edward Island. 11p.
- Palacios J.** Amélioration d'un Echantillonneur à Flux Passif pour la Mesure de L'oxyde Nitreux (N₂O). M. Sc. Mémoire. Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, 2010.
- Schjoerring J.K., Sommer S.G., Ferm M. (1992)** A simple passive sampler for measuring ammonia emission in the field - *Water, Air, and Soil Pollution*, 62, 1992: 13-24.
- Scholtens R., Hol J.M.G., Wagemans M.J.M., Phillips V.R.** Improved Passive Flux Samplers for Measuring Ammonia Emissions from Animal Houses, Part 1: Basic Principles - *Biosystems Engineering*, 85 (1), 2003: 95-100.
- Sigma-Aldrich Co. (1998)** AMBERLITE XAD POLYMERIC RESINS. Sigma Prod. Nos. XAD-4, XAD-7, XAD-16, 1-0377,1-0393, and 1-0379 Replacement for Product Code 21,648-8
- Siswoyo S. (2003)** Design of a flux measurement system for nitrous oxide. PhD Thesis, University of Manchester Institute of Science and Technology, 2003.