

# **Évaluation et optimisation des méthodes indirectes pour l'estimation du taux de ventilation servant au calcul des émissions de gaz en élevage de poules pondeuses**

**Thèse**

**Andrea Katherín Carranza Díaz**

Sous la direction de :

Sébastien Fournel, directeur de recherche

Stéphane Godbout, codirecteur de recherche

## Résumé

Les paradigmes émergents en élevage intègrent de plus en plus les considérations contemporaines du bien-être animal. Cependant, la transition vers des pratiques plus respectueuses du bétail pourrait entraîner une augmentation significative de la production d'émissions, liée à une plus grande surface par animal, une mobilité accrue et un environnement plus complexe. L'évaluation de celles-ci implique de calculer le taux de ventilation (TV) et de mesurer la différence de concentration de gaz entre l'air extrait et l'air entrant dans le bâtiment. Par conséquent, mesurer le TV avec précision est essentiel pour maintenir une surveillance efficace des émissions de gaz, particulièrement dans des élevages en transition comme en production d'œufs de consommation. Les objectifs de cette thèse étaient : (i) de comparer les émissions de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane et protoxyde d'azote) et d'ammoniac entre trois systèmes de logement pour poules pondeuses, soit les cages conventionnelles, les cages enrichies et les volières; (ii) d'évaluer la précision des méthodes indirectes (bilan thermique et bilan de dioxyde de carbone) pour le calcul du TV; et (iii) d'adapter et de développer un modèle basé sur ces méthodes pour évaluer le TV dans les trois types de poulailler. Les résultats ont révélé que les systèmes alternatifs, comme les cages enrichies et les volières, présentaient effectivement des émissions plus élevées que les systèmes conventionnels, soulignant ainsi toute l'importance d'une gestion rigoureuse de la ventilation pour contrôler les émissions. Par ailleurs, la méthode du bilan de dioxyde de carbone était plus précise que celle du bilan thermique, surtout avec des données agrégées quotidiennement, qui amélioraient nettement l'estimation du TV. Le modèle de bilan dioxyde de carbone a été adapté pour tenir compte des variations du métabolisme des poules pondeuses en ajustant, notamment, le quotient respiratoire et la production de dioxyde de carbone en fonction des moments de la journée, améliorant ainsi sa robustesse et son applicabilité en milieu commercial. L'étude met également de l'avant la nécessité d'intégrer des facteurs supplémentaires tels que le type et l'horaire d'alimentation, le type de gestion des déjections et les horaires de lumière et obscurité dans les modèles indirects pour obtenir des estimations plus précises. Pour accroître la portée du modèle, son adaptation à des conditions climatiques variées et une validation à plus grande échelle dans des systèmes en liberté seraient nécessaires.

## Abstract

Emerging paradigms in livestock production are increasingly integrating contemporary animal welfare considerations. However, the shift toward more compassionate practices in the industry reveals a significant increase in emissions, mainly due to increased space per animal, greater freedom of movement, and environmental enrichment. Assessing emissions involves calculating the ventilation rate (VR) and measuring the difference in gas concentrations between the barn's exhaust and inlet air. Therefore, accurately measuring VR becomes crucial for effective monitoring of gas emissions, particularly during transitions in animal production, as seen in the egg industry. The main objectives of this thesis were to: (i) compare greenhouse gas and ammonia emissions between three mechanically-ventilated housing systems for laying hens, namely conventional cages, enriched cages, and cage-free systems; (ii) assess the accuracy of indirect methods (thermal balance and carbon dioxide balance) for calculating the VR; and (iii) adapt and validate a model based on these methods to calculate the VR in these three laying systems. The results showed that alternative systems, such as enriched cages and cage-free systems, had higher emissions than conventional systems, highlighting the importance of rigorous ventilation management in controlling emissions. Additionally, the carbon dioxide balance method proved to be more accurate than the heat balance method, especially when using daily aggregated data, which significantly improved the estimation of the VR. The carbon dioxide balance model was adapted to account for variations in the metabolic activity of laying hens by adjusting the respiratory quotient and CO<sub>2</sub> production according to the time of day, thereby improving its robustness and applicability in commercial settings. Recommendations for future work include adapting the model to various climatic conditions and conducting additional studies in cage-free systems for extending its scope.

# Table des matières

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Résumé.....                                                                                                                            | ii  |
| Abstract .....                                                                                                                         | iii |
| Table des matières.....                                                                                                                | iv  |
| Liste des figures .....                                                                                                                | vii |
| Liste des tableaux.....                                                                                                                | x   |
| Liste des symboles .....                                                                                                               | xi  |
| Remerciements.....                                                                                                                     | xiv |
| Avant-propos.....                                                                                                                      | xv  |
| Introduction générale .....                                                                                                            | 1   |
| Contexte de la production ovicole québécoise .....                                                                                     | 1   |
| Importance économique .....                                                                                                            | 1   |
| Gestion de la production d’œufs.....                                                                                                   | 2   |
| Ventilation des poulaillers .....                                                                                                      | 2   |
| Systèmes de logement .....                                                                                                             | 4   |
| Émissions de gaz à effet de serre et d’ammoniac.....                                                                                   | 8   |
| Réactions chimiques des gaz dans l’environnement .....                                                                                 | 8   |
| Production de GES et de NH <sub>3</sub> en production d’œufs de consommation .....                                                     | 10  |
| Facteurs d’émission par système de logement .....                                                                                      | 12  |
| Évaluation des émissions de gaz en élevage .....                                                                                       | 14  |
| Mesure des conditions environnementales .....                                                                                          | 15  |
| Mesure des concentrations de gaz .....                                                                                                 | 16  |
| Mesure du taux de ventilation .....                                                                                                    | 19  |
| Analyse critique de la littérature .....                                                                                               | 24  |
| Défis à surmonter .....                                                                                                                | 24  |
| Limites et opportunités des méthodes directes et indirectes.....                                                                       | 25  |
| Retombées potentielles sur la détermination et la gestion des émissions et le bien-être animal .....                                   | 27  |
| Objectifs et hypothèses de recherche .....                                                                                             | 27  |
| Chapitre 1. Données et analyse des émissions dans la production d'œufs : comparaison des systèmes et rôle du débit de ventilation..... | 29  |
| 1.1. Présentation des données et contexte de la recherche.....                                                                         | 29  |

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.2. Évaluation des émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac : Comparaison de trois systèmes de production d'œufs au Québec, Canada ..... | 30 |
| 1.2.1. Experimental setup and design.....                                                                                                        | 32 |
| 1.2.2. Data collection .....                                                                                                                     | 32 |
| 1.2.3. Ventilation rate and gas emissions .....                                                                                                  | 33 |
| 1.2.4. Statistical analyses .....                                                                                                                | 33 |
| 1.2.5. Environmental conditions .....                                                                                                            | 34 |
| 1.2.6. Indoor and outdoor concentrations.....                                                                                                    | 34 |
| 1.2.7. Greenhouse gas and ammonia emissions .....                                                                                                | 36 |
| 1.2.8. Emissions by type of manure management.....                                                                                               | 36 |
| 1.2.9. Correlation Analysis.....                                                                                                                 | 37 |
| 1.2.10. Emissions variability analysis .....                                                                                                     | 39 |
| Greenhouse gases .....                                                                                                                           | 40 |
| Ammonia .....                                                                                                                                    | 41 |
| 1.3. Importance de la mesure du débit de ventilation .....                                                                                       | 43 |
| Chapitre 2. Assessing ventilation rate using indirect measurement methods in experimental bench-scale houses for laying hens .....               | 45 |
| 2.1. Résumé.....                                                                                                                                 | 45 |
| 2.2. Abstract .....                                                                                                                              | 46 |
| 2.3. Introduction .....                                                                                                                          | 46 |
| 2.4. Materials and methods .....                                                                                                                 | 49 |
| 2.4.1. Experimental rooms and animal housing .....                                                                                               | 49 |
| 2.4.2. Environmental and CO <sub>2</sub> concentrations data collection .....                                                                    | 50 |
| 2.4.3. Assessment methods.....                                                                                                                   | 51 |
| 2.4.4. Model evaluation and error determination .....                                                                                            | 51 |
| 2.4.5. Sensitivity analysis .....                                                                                                                | 52 |
| 2.5. Results .....                                                                                                                               | 53 |
| 2.5.1. Laying hens .....                                                                                                                         | 53 |
| 2.5.2. Environmental parameters.....                                                                                                             | 53 |
| 2.5.3. CO <sub>2</sub> concentrations .....                                                                                                      | 54 |
| 2.5.4. Ventilation rate.....                                                                                                                     | 54 |
| 2.5.5. Sensitivity analysis .....                                                                                                                | 58 |
| 2.6. Discussion .....                                                                                                                            | 59 |
| 2.6.1. Estimated ventilation rate by indirect methods .....                                                                                      | 60 |

|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.6.2. Multiple regression and sensitivity analysis .....                                                                                      | 62  |
| 2.7. Conclusions .....                                                                                                                         | 63  |
| Chapitre 3. Adaptation and validation of the CO <sub>2</sub> balance method for estimating the ventilation rate in laying hen facilities ..... | 65  |
| 3.1 Résumé .....                                                                                                                               | 65  |
| 3.2. Abstract .....                                                                                                                            | 66  |
| 3.3. Introduction .....                                                                                                                        | 66  |
| 3.4. Materials and Methods.....                                                                                                                | 68  |
| 3.4.1. CO <sub>2</sub> balance method adaptations.....                                                                                         | 68  |
| 3.4.2. Adaptation of the model based on the CO <sub>2</sub> balance method.....                                                                | 72  |
| 3.4.3. Validation at the laboratory level .....                                                                                                | 73  |
| 3.4.4. Validation at the commercial level.....                                                                                                 | 75  |
| 3.5. Results and discussion .....                                                                                                              | 76  |
| 3.5.1. Environmental conditions and laying hen performances .....                                                                              | 76  |
| 3.5.2. Model adaptations .....                                                                                                                 | 77  |
| 3.5.3. Model validations.....                                                                                                                  | 83  |
| 3.5.4. Commercial validation.....                                                                                                              | 86  |
| 3.7. Conclusions.....                                                                                                                          | 88  |
| Conclusion.....                                                                                                                                | 90  |
| Sommaire .....                                                                                                                                 | 90  |
| Contributions.....                                                                                                                             | 93  |
| Recommandations pour l’avenir .....                                                                                                            | 94  |
| Bibliographie.....                                                                                                                             | 96  |
| Annexe A. Caractéristiques des fermes commerciales échantillonnées.....                                                                        | 110 |
| Annexe B. Combinaisons de taux de respiration (RQ) pour le jour et la nuit avec les valeurs correspondantes de R <sup>2</sup> et de RMSE.....  | 112 |

# Liste des figures

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1.</b> Nombre total de producteurs par province ou territoire (en bleu) et nombre moyen de quotas par producteur (en gris) au Canada (tirée du Gouvernement du Québec, 2024). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 1  |
| <b>Figure 2.</b> Répartition territoriale des producteurs d'œufs (tirée du Gouvernement du Québec, 2020). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2  |
| <b>Figure 3.</b> Systèmes d'élevage des poules pondeuses : cages conventionnelles (à gauche), cages enrichies (au centre) et volières (à droite). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 5  |
| <b>Figure 4.</b> Le cycle de l'oxygène libre et le couplage CO <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> (tirée de Bourque, 2010). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 9  |
| <b>Figure 5.</b> Le cycle de l'azote et les trois processus de base : la fixation de l'azote diatomique, la nitrification et la dénitrification (tirée de Bourque, 2010). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 9  |
| <b>Figure 6.</b> Hygro-thermo-anémomètres à fil chaud VT110 (à gauche) et hélicoïdal LV50 (à droite) de Kimo Instruments (Sauer mann Group, Montpon-Ménéstérol, France). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 16 |
| <b>Figure 7.</b> Analyseur de gaz à infrarouge à transformée de Fourier DX4040 (Gasmet, Vantaa, Finlande). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 17 |
| <b>Figure 8.</b> Chromatographe de gaz 690 (PerkinElmer, Woodbridge, ON, Canada). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 19 |
| <b>Figure 9.</b> Indoor concentrations of GHG and NH <sub>3</sub> across different systems: conventional cages (CC), enriched colonies (EC), and cage-free (CF). Each boxplot represents the distribution of concentrations for the gas, with the central line in the box indicating the median concentration. The lower and upper limits of the box represent the 25th and 75th percentiles (interquartile range, IQR), respectively. The whiskers extend to the 1.5 interquartile range. The red dots indicate the average concentrations for each system. ....                                    | 35 |
| <b>Figure 10.</b> Outdoor concentrations of GHG and NH <sub>3</sub> gases across different systems: conventional cages (CC), enriched colonies (EC), and cage-free system (CF). Each boxplot represents the distribution of concentrations for the gas, with the central line in the box indicating the median concentration. The lower and upper limits of the box represent the 25th and 75th percentiles (interquartile range, IQR), respectively. The whiskers extend to the 1.5 interquartile range. The red dots indicate the average concentrations for each system. ....                     | 36 |
| <b>Figure 11.</b> Greenhouse gases and NH <sub>3</sub> barn emissions across different systems: conventional cages (CC), enriched colonies (EC), and cage-free (CF). Each boxplot represents the distribution of concentrations for the gas, with the central line in the box indicating the median concentration. The lower and upper limits of the box represent the 25th and 75th percentiles (interquartile range, IQR), respectively. The whiskers extend to the 1.5 interquartile range, showing the range of the data. The red dots indicate the average concentrations for each system. .... | 37 |
| <b>Figure 12.</b> The correlation matrix for the interaction between GHG and NH <sub>3</sub> gases considers indoor and outdoor gas concentrations. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 38 |
| <b>Figure 13.</b> Relationships between ventilation rates and recorded emissions of CO <sub>2</sub> (A), CH <sub>4</sub> (B), N <sub>2</sub> O (C), and NH <sub>3</sub> (D) under cold (●) and warm (×) seasons. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 39 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 14.</b> Schematic view of the BABE laboratory (adapted from Fournel et al., 2011).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 50 |
| <b>Figure 15.</b> Evolution of rooms (blue), PCD (green), and outdoor (yellow) daily mean temperature (upper) and relative humidity (lower) with standard deviations (shadowed) during trial one (85-148 Julian days) and trial two (160-224 Julian days).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 54 |
| <b>Figure 16.</b> Ventilation rate determined by the orifice damper method with standard deviations from all rooms (shadowed) during trial one (85-148 Julian days) and trial two (160-224 Julian days)....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 55 |
| <b>Figure 17.</b> (A) Comparison between the orifice damper method and indirect methods (CO <sub>2</sub> balance on the left and heat balance on the right) for trial one (blue dots) and trial two (orange dots). (B) Residuals plots for indirect methods (CO <sub>2</sub> balance on the left and heat balance on the right) for trial one (blue dots) and trial two (orange dots).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 56 |
| <b>Figure 18.</b> Average VRs for the three methods: orifice damper (orange -), CO <sub>2</sub> balance (blue - -) and heat balance (green ...) as a function of Julian day (right) and time within a day (in hours; left). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 57 |
| <b>Figure 19.</b> Global sensitivity analysis results for the CO <sub>2</sub> balance method. Directional variogram displays sensitivity across the range of perturbation scales (fluctuations in data values as they move away from the reference point) (above) and the relative importance of the factors (independent variables) according to the three evaluation approaches (below). The ratio of factor sensitivity is the value of each metric divided by the summed values of that metric over all the factors. Abbr.: CO <sub>2</sub> inlet: CO <sub>2</sub> inlet concentrations, CO <sub>2</sub> exhaust: CO <sub>2</sub> exhaust concentrations, # hens: total number of hens, # eggs: total number of eggs per day. ....  | 58 |
| <b>Figure 20.</b> Global sensitivity analysis results for the heat balance method. Directional variogram that manifests sensitivity across the range of perturbation scales (fluctuations in data values as they move away from the reference point) (above) and the relative importance of the factors (independent variables) according to the three approaches (below). The ratio of factor sensitivity is the value of each metric divided by the summed values of that metric over all the factors. Abbr.: T ext: outdoor temperature, HR ext: outdoor relative humidity, T PCD: pre-conditioned duct temperature; HR PCD: pre-conditioned duct relative humidity; T in: indoor temperature, HR in: indoor relative humidity. .... | 59 |
| <b>Figure 21.</b> Schematic representation of the sequential adaptation and validation process. Abbreviations: AA: Animal activity, PRCO <sub>2</sub> : CO <sub>2</sub> production rate, RQ: respiratory quotient, CC: conventional cage, EC: enriched cage, CF: Cage-free. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 70 |
| <b>Figure 22.</b> Comparison between VR calculated by the direct method and a few adaptations of the CO <sub>2</sub> balance method: (A) CIGR equation by Julian day; (B) CIGR equation by time; (C) animal activity adaptation by Julian day; (D) animal activity adaptation by time; (E) respiration quotient adaptation by Julian day; (F) respiration quotient adaptation by time; (G) PRCO <sub>2</sub> calculation and correction adaptation by Julian day; (H) PRCO <sub>2</sub> calculation and correction adaptation by Julian day. Note: hour of day data covers the interval from 00:00 to 23:45.....                                                                                                                        | 79 |
| <b>Figure 23.</b> Calculated vs measured CO <sub>2</sub> metabolic rates.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 81 |
| <b>Figure 23.</b> (A) Comparison of VR by the direct method and the adapted CO <sub>2</sub> balance method considering the threshold of differences between exhaust and inlet CO <sub>2</sub> concentrations. (B)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |

|                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Differences between exhaust and inlet CO <sub>2</sub> concentrations (Delta CO <sub>2</sub> ) vs differences between VR by direct method and adapted CO <sub>2</sub> balance (Delta VR).....                          | 84 |
| <b>Figure 23.</b> Comparison of VR by direct method and adapted CO <sub>2</sub> balance for the enriched cage (EC) system, conventional cage (CC) system, and cage-free system (CF) under laboratory conditions. .... | 85 |
| <b>Figure 24.</b> Arbre de décision pour choisir la méthode à utiliser.....                                                                                                                                           | 92 |

# Liste des tableaux

|                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tableau 1.</b> Description des systèmes conventionnels et alternatifs de production en poules pondeuses (adapté de Fédération des producteurs d'œufs du Québec, 2012). .....                           | 6   |
| <b>Tableau 2.</b> Sources principales des émissions par les poules pondeuses et les limites d'exposition recommandées dans les élevages. ....                                                             | 11  |
| <b>Tableau 3.</b> Niveaux et facteurs d'émissions par système de logement pour les poules pondeuses..                                                                                                     | 13  |
| <b>Table 4.</b> Animal characteristics and environmental conditions of selected egg production systems: six (6) conventional cage (CC), 14 enriched colonies (ECs) and 10 cage-free (CF) systems.....     | 34  |
| <b>Table 5.</b> Emission rates of GHG and NH <sub>3</sub> gases from different types of manure management systems .....                                                                                   | 37  |
| <b>Table 6.</b> Correlation Spearman coefficient matrix for the cold season of the six variables with gas concentrations and emissions. ....                                                              | 38  |
| <b>Table 7.</b> Correlation Spearman coefficient matrix for the warm season of the six variables with gas concentrations and emissions. ....                                                              | 39  |
| <b>Table 8.</b> Ventilation rates for two trials using the CO <sub>2</sub> and heat balance methods.....                                                                                                  | 55  |
| <b>Table 9.</b> Hen performance and environmental parameters of sampled farms .....                                                                                                                       | 77  |
| <b>Table 10.</b> Comparison of VR by direct method and adapted CO <sub>2</sub> balance methods considering the threshold of differences between the exhaust and inlet CO <sub>2</sub> concentrations..... | 84  |
| <b>Table 11.</b> Comparison of VR by direct method and adapted CO <sub>2</sub> balance for the system.....                                                                                                | 85  |
| <b>Table 12.</b> Comparison of VR by direct method and adapted CO <sub>2</sub> balance for the validation with commercial housing systems.....                                                            | 86  |
| <b>Tableau 13.</b> Résumé des résultats de chaque méthode.....                                                                                                                                            | 92  |
| <b>Table 14.</b> Summary of hen housing conditions and manure management system .....                                                                                                                     | 110 |

# Liste des symboles

| Abréviation             | Unités                                                                                             | Définition en français                    | Définition en anglais           |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>AA</b>               |                                                                                                    | Activité des animaux                      | Animal activity                 |
| <b>CC</b>               |                                                                                                    | Cage conventionnelle                      | Conventional cage               |
| <b>CE / EC</b>          |                                                                                                    | Cage enrichie                             | Enriched cage                   |
| <b>CH<sub>4</sub></b>   | ppm <sub>v</sub> (concentrations)<br>m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> (émissions) | Méthane                                   | Methane                         |
| <b>CO<sub>2</sub></b>   | ppm <sub>v</sub> (concentrations)<br>m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> (émissions) | Dioxyde de carbone                        | Carbon dioxide                  |
| <b>E<sub>n</sub></b>    | J kg <sup>-1</sup> air sec                                                                         | Enthalpie                                 | Enthalpy                        |
| <b>GE</b>               | J hr <sup>-1</sup>                                                                                 | Pertes de chaleur à travers l'enveloppe   | Heat loss through the envelope  |
| <b>GHG</b>              |                                                                                                    | Gaz à effet de serre                      | Greenhouse gas                  |
| <b>H<sub>tot</sub></b>  | J hr <sup>-1</sup>                                                                                 | Taux de production de chaleur des animaux | Animal heat production rate     |
| <b>m</b>                | kg                                                                                                 | Masse de la poule                         | Hen mass                        |
| <b>MAE</b>              |                                                                                                    | Erreur absolue moyenne                    | Mean absolute error             |
| <b>MSE</b>              |                                                                                                    | Erreur quadratique moyenne                | Mean squared error              |
| <b>N<sub>2</sub>O</b>   | ppm <sub>v</sub> (concentrations)<br>m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> (émissions) | Oxyde d'ammoniac                          | Nitrous oxyde                   |
| <b>NH<sub>3</sub></b>   | ppm <sub>v</sub> (concentrations)<br>m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> (émissions) | Ammoniac                                  | Ammonia                         |
| <b>PCD</b>              |                                                                                                    | Conduit pré-conditionné                   | Pre-conditioned duct            |
| <b>PRCO<sub>2</sub></b> | mL CO <sub>2</sub> s <sup>-1</sup>                                                                 | Taux de production de CO <sub>2</sub>     | CO <sub>2</sub> production rate |

| <b>Abréviation</b>   | <b>Unités</b>                        | <b>Définition en français</b>                    | <b>Définition en anglais</b>            |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>R<sup>2</sup></b> |                                      | Coefficient de détermination                     | Coefficient of determination            |
| <b>RH</b>            | %                                    | Humidité relative                                | Relative humidity                       |
| <b>RMSE</b>          |                                      | Erreur quadratique moyenne                       | Root mean squared error                 |
| <b>RQ</b>            |                                      | Quotient respiratoire                            | Respiration quotient                    |
| <b>T</b>             | °C / K                               | Température                                      | Temperature                             |
| <b>TV / VR</b>       | m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup>      | Taux de ventilation                              | Ventilation rate                        |
| <b>THP</b>           | J hr <sup>-1</sup>                   | Production totale de chaleur                     | Total heat production                   |
| <b>V / CF</b>        |                                      | Volière                                          | Cage-free                               |
| <b>VARs</b>          |                                      | Analyse des variogrammes des surfaces de réponse | Variogram analysis of response surfaces |
| <b>Y</b>             | kg d <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> | Taux de production d'œufs                        | Egg production rate                     |
| <b>ρ</b>             | kg m <sup>-3</sup>                   | Masse volumique d'air dans le bâtiment           | Air mass volume in the building         |

*"De tous les travaux, aucun n'est plus noble,  
plus riche, plus doux, ni plus digne d'un  
homme libre que l'agriculture."*

*Cicéron*

# Remerciements

Je tiens à commencer en remerciant mon directeur, Sébastien Fournel, qui a été un soutien constant tout au long de ce processus, avec ses enseignements, sa patience et sa confiance en moi. Je tiens aussi à remercier Alexis pour son soutien et ses conseils lors de la rédaction de ma thèse. Merci à l'équipe de l'IRDA : à Stéphane, mon codirecteur, pour ses corrections et son soutien sur les aspects administratifs du projet ; à Dalila, pour ses enseignements, son écoute et son accompagnement tout au long de ce parcours; aux technicien.ne.s, tant au laboratoire que sur le terrain, pour leur aide précieuse. Je tiens également à remercier les jurés de mon examen doctoral, dont les commentaires m'ont permis de mieux encadrer et orienter mon projet de thèse. Merci aussi à l'équipe de l'INRS pour sa précieuse collaboration dans le cadre de cette étude. Un grand merci à toutes les personnes, du personnel de l'université et des différents instituts, qui ont contribué à rendre possible l'aboutissement de ce travail. Et surtout, merci à chacun des producteurs qui nous ont ouvert leurs portes et permis de réaliser ce projet.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement ma famille d'adoption au Québec, ma famille latine, ce groupe qui, comme moi, est arrivé avec un mélange de peurs et de « berraquera ». À mon groupe d'étude: Anita, Lau Peña et Jonay, parce que “les rires n'ont jamais manqué” lors de ces longues journées à la bibliothèque. À mon gang de “So What” : pour avoir créé un lien de soutien dans les moments les plus difficiles. Merci particulièrement à Felipe Mora et Lau Mila, d'avoir été là pour moi lors des journées où c'était plus difficile, et de m'avoir aidée à voir un peu plus clair dans tout ça.

Gracias a Nathis y Adri. No importa cuán caótica fuera la tormenta, siempre estuvieron ahí con risas, apoyo y cero juicios. Parafraseando al Capitán Lance Murdock: “Su amistad fue como un rayo de sol en mis días nublados”. Camilo, chinito, mil gracias por haber aceptado la difícil misión de acompañarme en la parte inicial de este proceso, y sin duda, la más difícil. Siempre agradeceré haberme cruzado con sumercé en la vida. Gracias a mi familia por sus oraciones, por sus mensajes diarios, por ayudarme a creer en mí, por recibirme cada año con los brazos abiertos y hacerme sentir que no pasó tanto tiempo desde la última vez. Marianita, gracias por esas llamadas sin sentido que alegran la vida. Makita, hermana mía, una vez más te digo: eres la más cierta en horas inciertas. Gracias a mis angelitos en el cielo, porque nunca me han abandonado y sé que me sonríen desde arriba.

Enfin, je tiens à réserver un moment pour me remercier moi-même, pour avoir cru en ma capacité, pour m'être permise d'apprendre, de commettre des erreurs, de grandir. Merci d'avoir résisté, d'avoir avancé, de ne pas avoir cessé de rêver. Fluctuat nec mergitur. Merci à Dieu et à la Vierge de m'avoir toujours montré le chemin.

## Avant-propos

Cette thèse est composée d'une introduction et mise en contexte, suivi de trois chapitres rédigés sous forme d'articles scientifiques, dont je suis la première auteure, et se termine avec la conclusion générale. Pour chaque article, j'ai établi les objectifs et les hypothèses de recherche, mis en place les méthodes prévues, compilé les bases de données requises, réalisé les analyses statistiques, créé les figures et supports visuels pour présenter les résultats et rédigé les manuscrits.

Pour l'article présenté au chapitre 1, les coauteurs sont Dr Araceli Dalila Larios-Martinez, Dr Alexis Ruiz-González, Dr Caroline Duchaine, Dr Martine Boulianne, Dr Stéphane Godbout et Dr Sébastien Fournel. Ils m'ont accompagné dans l'élaboration du plan expérimental, la collecte des échantillons, l'interprétation critique des résultats et la révision du manuscrit. Une partie de ce chapitre (sub-section 1.2) a été publiée dans le journal *Canadian Biosystems Engineering*, le 3 février 2025. Cet article a également été l'objet d'une communication portant le titre « *Greenhouse gas and ammonia emissions from egg production systems in southern Quebec* » lors du congrès annuel de la Société canadienne de génie agroalimentaire et de bioingénierie (SCGAB), tenu à Charlottetown (Île du Prince Édouard) du 25 au 27 juillet 2022.

Dans l'article qui compose le deuxième chapitre, les coauteurs sont Dr Araceli Dalila Larios-Martinez, Dr Alexis Ruiz-González, Dr Stéphane Godbout et Dr Sébastien Fournel. Ils ont contribué à l'analyse des résultats et à la révision du manuscrit. Ce chapitre a été publié dans le *Journal of ASABE*, le 10 mars 2025.

Pour l'article du chapitre 3, les coauteurs sont les mêmes que ceux mentionnés au chapitre 2. Ils ont pris part à l'analyse des résultats et à la révision du manuscrit. Ce chapitre a été accepté pour publication au *Journal of ASABE*, le 25 juillet 2025. La première partie de ce chapitre sur l'adaptation de la méthode du bilan de CO<sub>2</sub> a été présentée lors du congrès annuel de SCGAB, tenu à Lethbridge (Alberta), du 24 au 26 juillet 2023, sous le titre « *CO<sub>2</sub> balance method adaptation to evaluate the air change rate in a mechanically ventilated barn* ». La deuxième partie sur les validations expérimentale et commerciale a été sélectionnée pour sa divulgation lors du congrès annuel de l'*American Society of Agricultural and Biological*

*Engineers (ASABE), tenu à Anaheim (Californie) du 28 au 31 juillet 2024. La présentation était intitulée « Validation of a CO<sub>2</sub> balance model for determining ventilation rate in egg production ».*

En raison des exigences des comités éditoriaux des revues mentionnées et des corrections ou ajustements qui pourraient être demandés avant leur publication finale, il est possible que les articles des trois chapitres diffèrent légèrement de ceux présentés dans cette thèse. Fait à noter, la bibliographie insérée à la toute fin du document traite des références de la thèse en entier. Elle inclut, en plus des sources de l'introduction et de la discussion générale, celles des trois publications. Cela aura ainsi permis d'éviter tout dédoublement d'une section à l'autre.

# Introduction générale

## Contexte de la production ovocole québécoise

### Importance économique

Selon l'Organisation mondiale de l'agriculture des Nations Unies (FAO, 2023), le premier producteur mondial d'œufs est la Chine avec une production de 584 milliards d'œufs. Suivent dans l'ordre l'Indonésie, l'Inde, les États-Unis, le Brésil, le Mexique, la Russie, le Japon, le Pakistan et la Turquie avec des productions de 132, 119, 110, 59, 59, 46, 43, 23 et 20 milliards d'œufs. Au Canada, cette production a atteint, en 2021, 848 millions de douzaines d'œufs, équivalant à 10 milliards d'œufs (Statistique Canada, 2022). Le Québec est le deuxième plus grand producteur d'œufs au Canada (Gouvernement du Québec, 2020). Selon les données de la Fédération des producteurs d'œufs du Québec (2022), la province compte 199 producteurs (Figure 1), lesquels ont généré 1 857 990 780 œufs de consommation grâce à un troupeau d'environ 5 717 000 poules pondeuses. Cette province fournit ainsi près de 19 % de la production du pays. Par contre, l'industrie des œufs au Québec connaît une croissance continue, alors qu'elle compte 45,9 % plus d'oiseaux qu'en 2012. Les producteurs d'œufs de consommation au Québec se trouvent majoritairement dans sept régions (Figure 2), qui regroupent 79 % des exploitations. En 2023, la production d'œufs québécoise a engendré 313,5 M\$ en termes de recettes monétaires (Gouvernement du Québec, 2023a).

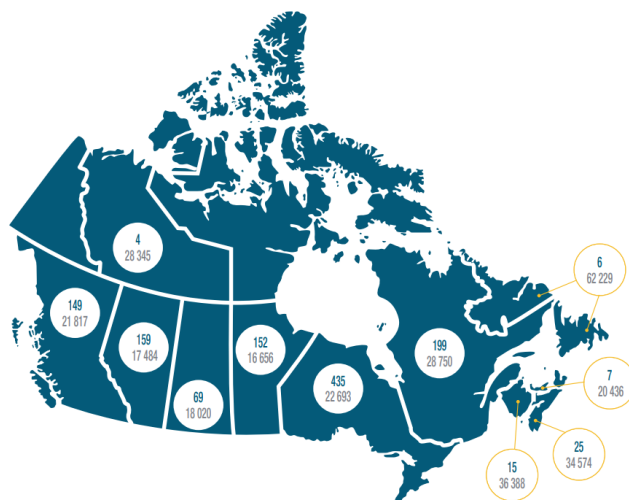


**Figure 1.** Nombre total de producteurs par province ou territoire (en bleu) et nombre moyen de quotas¹ par producteur (en gris) au Canada (tirée du Gouvernement du Québec, 2024).

<sup>1</sup> Un quota pour la production d'œufs au Québec représente le nombre maximal de douzaines d'œufs ou de poules pondeuses qu'un producteur est autorisé à produire et à commercialiser (Règlement sur les quotas des producteurs d'œufs de consommation du Québec, 2024). (Règlement Sur Les Quotas Des Producteurs d'œufs de Consommation Du Québec, 2024)

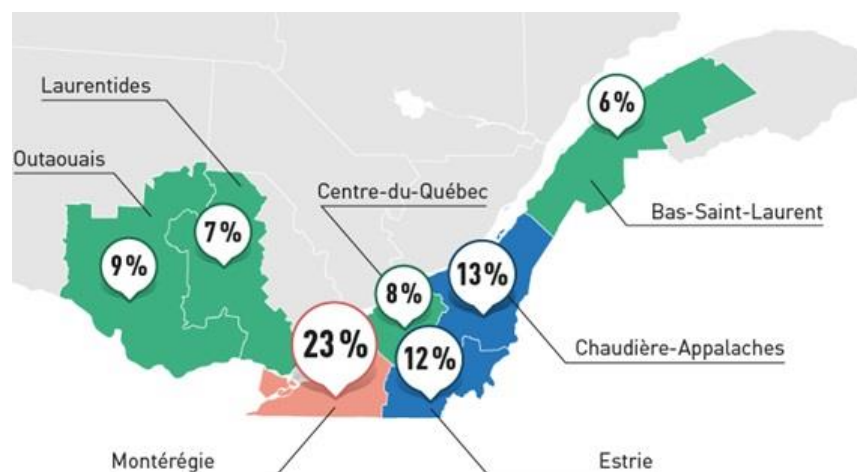


**Figure 2.** Répartition territoriale des producteurs d’œufs (tirée du Gouvernement du Québec, 2020).

### Gestion de la production d’œufs

La production d’œufs de consommation comprend trois étapes principales : l’élevage des poulettes, la période de ponte et la mise en marché des œufs. Les poulettes, futures pondeuses, sont élevées dès leur transfert du couvoir sur une période d’environ 19 semaines, durant laquelle les conditions de logement, de température (entre 33 et 36 °C au départ), de lumière et d’humidité (60 à 70 %) doivent être rigoureusement contrôlées pour assurer leur bon développement (David et al., 2012).

À l’âge de 16 à 19 semaines, les poulettes sont transférées dans des pondoires, où elles commencent à pondre pendant environ un an, avec un pic de ponte autour de 32 à 35 semaines. Les poules peuvent être logées en cages ou dans des systèmes sans cages. La température (21 à 24 °C), l’humidité (40 à 70 %) ainsi que la ventilation doivent être soigneusement régulées pour leur bien-être. Les taux de ventilation varient selon la race des poules et les concentrations de gaz comme l’ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) et le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) doivent être maintenues en dessous de certains seuils pour éviter les maladies respiratoires (Lohmann Breeders, 2016; Hy-Line, 2017).

### Ventilation des poulaillers

La ventilation des bâtiments d’élevage doit être soigneusement adaptée aux saisons afin de maintenir un environnement sain et confortable pour les pondeuses (Bustamante et al., 2013). Il est crucial que la ventilation assure une régulation efficace de la température ambiante, car les poules possèdent une plage de confort thermique spécifique selon leur stade de production (Bustamante et al., 2013; Park et al., 2018). Cette plage leur permet de diriger l’énergie principalement vers la production ou la reproduction (Ontario Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2010). Des variations

importantes de température, même mineures et rapides, peuvent créer des conditions de stress, exposant les animaux à divers problèmes de santé (Kim et al., 2021). Le système doit ainsi maintenir un équilibre thermique entre la chaleur produite par les animaux et les pertes, avec un chauffage d'appoint si nécessaire. Une bonne isolation et un pare-vapeur efficace sont également essentiels pour éviter la condensation et préserver l'efficacité thermique (Al-Homoud, 2005; Lopez Hurtado et al., 2016). Les systèmes de ventilation, qu'ils soient naturels ou mécaniques, doivent être en plus capables de distribuer l'air de manière uniforme dans toute la pièce, sans provoquer de courants d'air (Ontario Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2010).

En hiver, la ventilation vise à minimiser les pertes de chaleur, tout en renouvelant l'air pour contrôler l'humidité générée par la respiration des animaux et l'évaporation des litières souillées (Baêta & Souza, 2010). Si l'air expiré n'est pas évacué régulièrement, l'humidité s'accumule rapidement, rendant l'atmosphère de la pièce propice au développement de maladies (NFACC, 2017). De plus, l'air humide absorbe facilement les odeurs et augmente l'effet des basses températures, tout en accélérant la détérioration des bâtiments (Kubba, 2010). La ventilation hivernale joue aussi un rôle crucial dans l'élimination des gaz nocifs. L'accumulation de CO<sub>2</sub>, résultant de la respiration des animaux, peut réduire la quantité d'oxygène disponible. D'autres gaz, tels que le NH<sub>3</sub>, le méthane (CH<sub>4</sub>) et le sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S), produits par la décomposition du fumier, peuvent diminuer la productivité des animaux, endommager les structures et équipements et créer des conditions de travail difficiles pour les travailleurs (Chai et al., 2012; Ogink et al., 2013; Park et al., 2018).

En saison estivale, les exigences de ventilation changent. La ventilation doit combiner des aspects hygiéniques et thermiques, en fournissant de grandes quantités d'air frais pour réguler la température intérieure (Bustamante et al., 2013; Melikov, 2016; Tran et al., 2020). Cette combinaison permet d'évacuer l'air chaud et de renouveler l'air frais, améliorant ainsi le confort thermique et réduisant les risques liés à la chaleur excessive. En période de chaleur extrême, il est particulièrement important de garantir que la température intérieure n'augmente pas de plus de 2 °C par rapport à l'extérieur (Ontario Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2010). Cette exigence devient d'autant plus cruciale dans un contexte de réchauffement climatique, où la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur sont appelées à augmenter au cours des prochaines années (Cheng et al., 2022).

Les productions animales se font majoritairement aujourd'hui en bâtiments avec un contrôle automatique des conditions environnementales (Mikovits et al., 2019; Vitt et al., 2017) dans un souci d'améliorer notamment la gestion des lisiers, le bien-être animal et les performances (Brown-Brandl et al., 2014). Au Québec, la ventilation mécanique est la plus utilisée dans les bâtiments d'élevage, en raison des hivers rigoureux et de la nécessité de contrôler précisément les conditions

environnementales. La plupart des systèmes de ventilation pour le bétail utilisent des ventilateurs d'extraction pour évacuer l'air du bâtiment (Ontario Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2010), créant ainsi une pression intérieure légèrement inférieure à la pression atmosphérique extérieure, ce qui est appelé « pression négative » ou ventilation par évacuation. L'air frais entre par toutes les ouvertures pour compenser la différence de pression et remplacer le flux sortant. Un bon design de ventilation par pression négative assure que la pièce est relativement hermétique à l'air, permettant de localiser et de contrôler le flux d'air de remplacement pour obtenir un bon mélange de l'air et une ventilation complète sans court-circuit vers un point d'évacuation (Ontario Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2010). Comme l'air frais entrant est plus frais que la température souhaitée pendant la majorité de l'année, ces entrées d'air sont situées en haut du mur ou au plafond, avec l'air projeté horizontalement pour un temps maximum de mélange et de réchauffement avant d'atteindre les animaux. Pour maintenir une vitesse d'entrée élevée et constante, les entrées sont ajustées pour correspondre au volume d'air extrait par les ventilateurs d'extraction (Albright, 1990; Holden et al., 2020). La vitesse de l'air aux fentes d'entrée est directement liée à la chute de pression statique lorsque l'air s'accélère à travers la fente (Ontario Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2010).

## **Systèmes de logement**

Au Canada, divers systèmes de logement pour les poules pondeuses sont utilisés, chacun ayant ses propres avantages et inconvénients. Quel que soit le système adopté, le Conseil national pour les soins aux animaux d'élevage prévoit certaines réglementations à respecter pour le bien-être et la manipulation des poulettes et pondeuses (NFACC, 2017). Le bâtiment doit être conçu de manière à faciliter son nettoyage et à garantir la sécurité et la santé des volailles. Pour assurer le bien-être des poules, elles doivent toujours avoir un accès adéquat à de la nourriture et à de l'eau en quantité et qualité suffisantes. Chaque poule doit disposer d'au moins 7 cm d'espace à la mangeoire et un nombre suffisant d'abreuvoirs doit être disponible, selon le type utilisé. La superficie nécessaire pour héberger les pondeuses varie selon le système de logement, mais, de manière générale, les poules élevées sur un plancher entièrement couvert de litière nécessitent plus d'espace que celles sur un plancher latté.

L'élevage des poules pondeuses pour la production d'œufs de consommation se fait principalement selon trois systèmes de logement : les cages conventionnelles (CC), les systèmes aménagés (aussi appelés cages enrichies; CE) et les élevages en liberté de type volières (V) ou parquet (Figure 3). Ce dernier, qui correspond à un système en liberté sur un seul niveau, est peu utilisé au Québec, représentant seulement 7 % des types de logement (FPOQ, 2022). Le Tableau 1 résume les principales caractéristiques des systèmes de logement.



**Figure 3.** Systèmes d'élevage des poules pondeuses : cages conventionnelles (à gauche), cages enrichies (au centre) et volières (à droite).

#### *Cages conventionnelles*

Les CC utilisent des cloisons latérales solides ou en fil métallique, avec des barreaux horizontaux pour une répartition uniforme de l'alimentation sans que les poules aient à sortir la tête. La Fédération des producteurs d'œufs du Québec (FPOQ, 2012) détermine les caractéristiques suivantes pour ces systèmes : une densité pour le nid de 432 cm<sup>2</sup> (67 po<sup>2</sup>) pour les pondeuses blanches et de 484 cm<sup>2</sup> (75 po<sup>2</sup>) pour les pondeuses brunes. Ces systèmes disposent généralement de plus de trois niveaux. Les déjections sont transportées à l'aide de racleurs ou de courroies vers une fosse ou un lieu d'entreposage. La nourriture est placée dans une mangeoire extérieure et l'eau est fournie à volonté grâce à au moins deux abreuvoirs à tétines ou siphonides par logement, qui peuvent accueillir entre 2 et 9 poules. En 2022, 38 % des poules étaient logées dans ce type de système (FPOQ, 2022).

#### *Cages enrichies*

En CE, les matériaux sont similaires à ceux des CC, mais avec des aménagements supplémentaires comme des perchoirs et des nids, ainsi qu'une hauteur accrue. La litière peut être ajoutée dans des bacs ou sur des tapis. Chaque poule dispose d'au moins 750 cm<sup>2</sup> (116 po<sup>2</sup>), nid inclus. Ce type de système ne comporte généralement qu'une seule rangée de logements par niveau. Les déjections sont gérées de manière similaire aux CC. La nourriture est souvent placée à l'extérieur des logements et le nombre d'abreuvoirs varie selon la taille du groupe, qui peut varier de 15 à 60 poules (FPOQ, 2012). En 2022, 39 % des poules étaient logées dans ce type de système (FPOQ, 2022).

#### *Volières*

Les élevages en volières se caractérisent par deux planchers surélevés avec des nids intégrés au même étage. La surface pour le nid est de 930 cm<sup>2</sup> (144 po<sup>2</sup>) par poule pour les pondeuses blanches et de

1120 cm<sup>2</sup> (173 po<sup>2</sup>) pour les pondeuses brunes. Ce système comporte plusieurs niveaux de plateformes perforées, empêchant les déjections de tomber sur les poules en dessous. Les déjections sont transportées par des courroies sous chaque plancher surélevé. L'eau et la nourriture sont fournies sur les planchers par l'entremise d'abreuvoirs à tétines ou siphoniques, ainsi que par des chaînes ou bacs d'alimentation. En 2022, 16 % des poules étaient logées dans ce type de système (FPOQ, 2022).

**Tableau 1.** Description des systèmes conventionnels et alternatifs de production en poules pondeuses (adapté de (FPOQ, 2012))

| Description                 | Cages conventionnelles                                                                                                                                                                                                              | Cages enrichies                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Volières                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Surface pour nid            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 432 et 484 cm<sup>2</sup> pour les pondeuses blanches et brunes</li> </ul>                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Au moins 750 cm<sup>2</sup> par poule (comprend le nid)</li> </ul>                                                                                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 930 et 1120 cm<sup>2</sup> pour les pondeuses blanches et brunes</li> </ul>                                                                              |
| Niveaux                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plus de trois niveaux</li> </ul>                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plus de deux fois la profondeur d'un logement conventionnel.</li> </ul>                                                                                                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Systèmes à paliers multiples qui se composent du plancher au sol et d'un ou de plusieurs niveaux de plateformes perforées</li> </ul>                     |
| Récolte des déjections      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Racleurs ou courroies</li> <li>• Fosse ou est transporté jusqu'au lieu d'entreposage</li> </ul>                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Racleurs ou courroies</li> <li>• Fosse ou est transporté jusqu'au lieu d'entreposage</li> </ul>                                                                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Courroie transportant les déjections sous chaque plancher surélevé</li> </ul>                                                                            |
| Alimentation et abreuvement | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nourriture fournie à volonté dans une mangeoire se trouvant à l'extérieur du logement</li> <li>• Eau fournie par au moins deux abreuvoirs à tétines ou siphoniques par logement</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimentation fournie dans des mangeoires se trouvant à l'extérieur du logement, sinon, les portes du logement ne doivent pas être équipées de barreaux horizontaux</li> <li>• Nombre d'abreuvoirs dépend de la taille du logement et du groupe</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eau et nourriture fournies sur les planchers surélevés au moyen d'abreuvoirs à tétines ou siphoniques et de chaînes ou de bacs d'alimentation</li> </ul> |

| Description      | Cages conventionnelles                                                        | Cages enrichies                                                                                                                                                                                                  | Volières                                                     |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Taille du groupe | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 à 9 poules par logement</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 15 poules dans de petits logements aménagés</li> <li>• 15-30 poules dans de moyens logements aménagés</li> <li>• 60 poules dans de grands logements aménagés</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Variable</li> </ul> |

### *Transition vers des systèmes d'élevage alternatifs*

Ces dernières années, le système de CC a été rejeté parce qu'il ne répond pas aux critères de surface par poule nécessaires au bien-être des oiseaux. Ce système est remplacé par des CE ou des V. Au Québec, le système d'élevage conventionnel des poules pondeuses a été interdit à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2015 (Larivière, 2016). La conversion complète vers l'élevage en cages aménagées ou en volières se fera progressivement d'ici 2036 (CNSAE, 2017). En 2022, près de 55 % des systèmes de logement pour poules pondeuses au Québec avaient déjà été convertis en systèmes alternatifs (FPOQ, 2022).

Les systèmes aménagés, bien qu'offrant plus d'espace aux poules et des espaces dédiés (pandoirs, perchoirs, tapis de grattage, etc.) leur permettant d'exprimer des comportements naturels, demeurent un système avec claustration des animaux dans des cages. Les volières s'avèrent ainsi une approche plus respectueuse du bien-être animal (Mahmoudi, 2016). Dans ce type de système, les poules se trouvent dans un environnement plus conforme à ce qu'elles retrouveraient dans la nature, où elles ont la possibilité d'exprimer divers comportements propres à leur espèce. Ils peuvent voler, prendre des bains de poussière (Mollenhorst et al., 2005), pondre leurs œufs en étant isolées des congénères et disposer d'aires de repos et de perchage (Soin de ferme et alimentation, 2020). Leyendecker et al. (2005) mentionnent que cette évolution du comportement des animaux entraîne même une meilleure résistance osseuse. Cependant, les volières, en raison de l'espace supplémentaire qu'elles offrent, de l'exercice accru des poules, ainsi que de la consommation et de la défécation additionnelles, tendent à générer davantage d'émissions atmosphériques, posant ainsi des défis environnementaux. Le NH<sub>3</sub>, les gaz à effet de serre (GES) et les particules figurent parmi les polluants aériens préoccupants dans les poulaillers en raison de leur impact potentiel sur la santé des oiseaux (Zhao et al., 2015).

## Émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac

### Réactions chimiques des gaz dans l'environnement

Dans l'atmosphère terrestre, les principaux gaz à effet de serre (GES) sont la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), le  $\text{CO}_2$ , le  $\text{CH}_4$ , l'oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ) et les chlorofluorocarbures (CFC). Les CFC ont une origine exclusivement anthropique, alors que le  $\text{CO}_2$ , le  $\text{CH}_4$  et le  $\text{N}_2\text{O}$  ont une double origine, naturelle et anthropique. Les réactions chimiques provenant du carbone et de l'azote au contact d'autres agents atmosphériques, biologiques ou chimiques sont présentées ci-dessous.

#### *Transformation du carbone*

Le carbone (C) se trouve sous deux formes : le carbone organique ( $\text{C}_{\text{org}}$ ) et le carbone inorganique ( $\text{C}_{\text{inorg}}$ ). Le  $\text{C}_{\text{org}}$  est produit par des organismes vivants et est lié à d'autres carbones ou éléments tels que l'hydrogène (H), l'azote (N) ou le phosphore (P) dans des molécules organiques ou des hydrocarbures. Le  $\text{C}_{\text{inorg}}$  est associé aux composés qui ne sont pas et n'ont pas été vivants et qui ne contiennent pas de liaison C-C ou C-H, tels que le C du  $\text{CO}_2$  atmosphérique.

La matière organique est représentée par  $\text{CH}_2\text{O}$ , la forme la plus simple de d'hydrate de carbone. En fait, ce sont des molécules beaucoup plus grandes et plus complexes, dont la base est toujours les éléments C, H et oxygène (O), mais qui sont ajoutées à d'autres éléments en petites quantités comme le N, le P et/ou le soufre (S). Cette partie de la matière organique correspond à la productivité primaire, dont les producteurs primaires, captent l'énergie solaire et la transforment en énergie chimique qu'ils stockent dans leurs tissus (Bourque, 2010). Cette énergie est transmise aux consommateurs en ingérant les tissus des producteurs et en respirant. La respiration est l'inverse de la photosynthèse : à partir de l'oxygène libre ( $\text{O}_2$ ), elle convertit toute la matière organique en  $\text{CO}_2$ .

Grâce à l'action de micro-organismes se produit le processus de décomposition. Il existe deux groupes de micro-organismes : les aérobies, qui utilisent l' $\text{O}_2$  pour leur métabolisme et rejettent du  $\text{CO}_2$  lors de la décomposition, et les anaérobies, qui utilisent l'oxygène des molécules de la matière organique en carence d' $\text{O}_2$ . Dans les milieux anoxiques, les anaérobies décomposent la matière organique par le processus de la fermentation (Bourque, 2010). À partir de la fermentation du  $\text{CH}_2\text{O}$  se produit du  $\text{CO}_2$  et du  $\text{CH}_4$  (Figure 4).

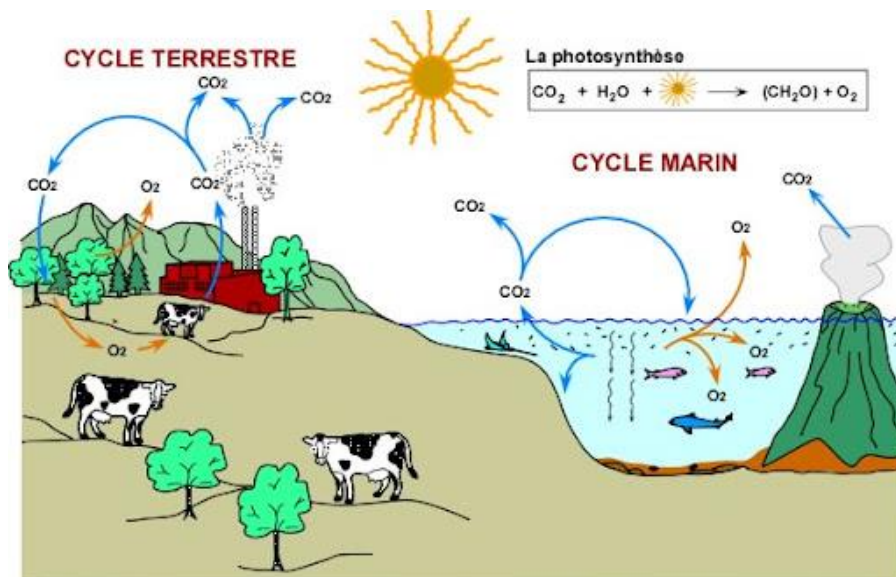


**Figure 4.** Le cycle de l'oxygène libre et le couplage  $\text{CO}_2$ - $\text{O}_2$  (tirée de Bourque, 2010).

### *Transformation de l'azote*

Autant la composition de l'atmosphère est influencée par la production de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{CH}_4$  issus des processus de respiration et de fermentation du cycle du carbone, autant elle est influencée par le cycle de l'azote. En effet, 78 % de l'atmosphère est constituée d'azote moléculaire ( $\text{N}_2$ ) (Bourque, 2010; Domínguez et al., 2007; Smil, 2011). Les trois processus les plus importants du cycle de l'azote comprennent la fixation, la nitrification et la dénitrification (Figure 5).

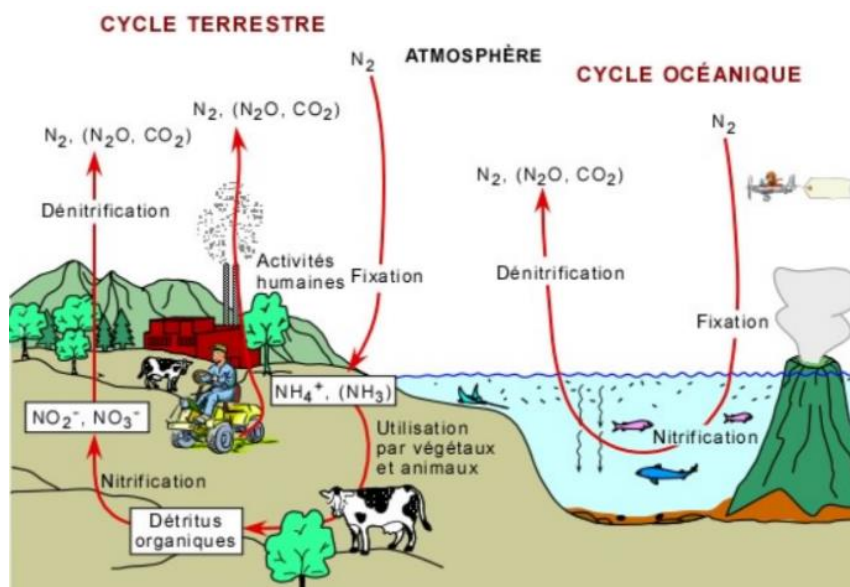


**Figure 5.** Le cycle de l'azote et les trois processus de base : la fixation de l'azote diatomique, la nitrification et la dénitrification (tirée de Bourque, 2010).

Le processus de fixation fait référence à la combinaison du N avec le H ou l'O, ce qui permet aux êtres vivants de venir utiliser le N dans leurs processus métaboliques. Les produits obtenus à partir de N<sub>2</sub> en contact avec la matière organique et l'eau sont des molécules d'ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) et de CO<sub>2</sub>. Dans des sols avec un pH plus élevé, le NH<sub>4</sub><sup>+</sup> se transforme en NH<sub>3</sub> gazeux (Bourque, 2010). La fixation de l'azote peut se produire de deux façons : de manière abiotique (sans l'intervention d'organismes vivants) ou par l'action de micro-organismes (fixation biologique du N). La fixation du N en général implique l'incorporation d'une quantité importante de N dans la biosphère (Smil, 2011).

La nitrification est l'oxydation biologique du NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) ou nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) par des micro-organismes aérobies utilisant l'O<sub>2</sub>. Ces organismes utilisent ce processus pour obtenir de l'énergie, de la même manière que les hétérotrophes obtiennent de l'énergie en oxydant les aliments organiques par la respiration cellulaire (Domínguez et al., 2007). Comme ils tirent leur carbone du CO<sub>2</sub> atmosphérique, ce sont des organismes autotrophes.

La dénitrification retourne le N à l'atmosphère sous sa forme moléculaire (N<sub>2</sub>). Lorsque la molécule de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> entre en contact avec la matière organique et le H, elle se transforme en N<sub>2</sub>, avec comme produit secondaire du CO<sub>2</sub> et de l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O).

### **Production de GES et de NH<sub>3</sub> en production d'œufs de consommation**

Les taux d'émission de gaz des poules pondeuses peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que le système de production (CC, CE ou V), le type d'alimentation, les techniques de gestion du fumier et les sources d'énergie utilisées pour le logement et le transport (Liu et al., 2020; Soto-Herranz et al., 2021; Swelum et al., 2021). Bien que l'empreinte écologique de la production d'œufs soit relativement faible comparée à celle d'autres productions animales (avec environ 2 à 3 kg d'équivalents dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>-eq) par kilogramme d'œufs, contre environ 6 kg pour le porc et jusqu'à 27 kg pour le bœuf) (de Vries & de Boer, 2010; Poore & Nemecek, 2018), ce secteur de l'élevage connaît une croissance rapide. Il est probable qu'il occupe une place essentielle dans les systèmes alimentaires futurs, tout en faisant face à une pression accrue pour diminuer constamment les émissions (Preisinger, 2018; Turner et al., 2022).

Selon Grassauer et al. (2023), au Canada, les émissions totales moyennes de GES par kg d'œufs produite sont de 2,34 kg CO<sub>2</sub>-eq. Toutefois, des études ont estimé que les émissions de GES d'un seul œuf, peuvent varier de 0,26 à 0,33 kg CO<sub>2</sub>-eq (Taylor et al., 2014). Les émissions en fonction du stade d'élevage se répartissent ainsi : 0,4 % proviennent des troupeaux reproducteurs, 0,2 % des couvoirs, 19,4 % de l'élevage des poulettes, et 80 % de la phase de ponte. En général, la majorité des émissions

de GES (75 %) est liée à la fabrication d'aliment en raison des changements d'affectation des sols et de l'utilisation des sols, tandis que 23 % proviennent de la gestion du fumier et, dans une moindre mesure, de la combustion de combustibles fossiles pour le chauffage de la ferme. Deux pourcents sont aussi liés aux intrants énergétiques en amont (Grassauer et al. 2023).

Les émissions de NH<sub>3</sub> au Canada ont considérablement augmenté en raison des activités agricoles, doublant depuis 1981, passant de 58 à 143 kt en 2016 (Gouvernement du Canada, 2021). Les émissions de NH<sub>3</sub> dans les poulaillers proviennent principalement de la dégradation de l'azote présent dans les fientes, mais peuvent aussi émaner des surfaces souillées (planchers, équipements) et, dans certains systèmes, de la litière. Les concentrations à l'intérieur des bâtiments sont largement influencées par divers facteurs, notamment les systèmes d'élevage (cages ou systèmes alternatifs), la capacité des poulaillers, la densité (nombre d'oiseaux par cage ou par unité de surface) et la composition des aliments, en particulier la teneur en protéines (Kilic & Yaslioglu, 2014).

Dans l'ensemble, les taux d'émission de gaz des poules pondeuses sont des préoccupations importantes pour l'environnement et des efforts sont déployés pour en réduire les niveaux. Le Tableau 2 présente une vue d'ensemble des principales sources de gaz dans les environnements avicoles, ainsi que les limites d'exposition moyenne et les seuils de danger immédiat pour chaque gaz. La première, la limite d'exposition moyenne (LEM), correspond à la concentration moyenne admissible sur une période de 8 heures de travail par jour, selon une semaine type de 40 heures, établie par le Gouvernement du Québec (2023b). Cette limite vise à protéger la santé des travailleurs à long terme. La seconde, le seuil de danger immédiat, fourni par l'*Occupational Safety and Health Administration* (2017), indique la concentration à partir de laquelle une exposition courte peut causer des effets graves immédiats sur la santé.

**Tableau 2.** Sources principales des émissions par les poules pondeuses et les limites d'exposition recommandées dans les élevages.

| Gaz              | Source principale chez la poule                  | Limite d'exposition moyenne<br>(ppm; Gouvernement du<br>Québec, 2023b) | Danger<br>immédiat<br>(ppm;<br>OSHA*, 2017) |
|------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| CO <sub>2</sub>  | Respiration des poules                           | 5000                                                                   | 40 000                                      |
| CH <sub>4</sub>  | Fumier stocké en conditions<br>anaérobies        | —                                                                      | 5000                                        |
| N <sub>2</sub> O | Processus de nitrification et<br>dénitrification | 50                                                                     | —                                           |
| NH <sub>3</sub>  | Fumier des poules                                | 25                                                                     | 300                                         |

\*[Occupational Safety and Health Administration](#) (OSHA)

## **Facteurs d'émission par système de logement**

Les systèmes de logement des poules pondeuses influencent les émissions de GES et de  $\text{NH}_3$ . Ces émissions dépendent des caractéristiques propres à chaque système, telles que la gestion du fumier, les conditions de stockage, la ventilation et les interactions entre les animaux et leur environnement. Le Tableau 3 résume les niveaux d'émission, les principales sources et facteurs influençant les émissions pour chaque système.

De manière générale, les émissions de  $\text{CO}_2$  sont relativement similaires entre les systèmes, bien qu'elles puissent légèrement augmenter dans les logements offrant plus d'espace, en raison d'une activité animale accrue Shepherd et al. (2015), Zhao et al., (2015). Les émissions de  $\text{CH}_4$  restent faibles mais sont influencées par la gestion du fumier et les conditions anaérobies (Fabbri et al. 2007; Fournel et al., 2012). Les niveaux de  $\text{N}_2\text{O}$  sont très faibles dans tous les systèmes, ce qui est cohérent avec d'autres études. En revanche, les émissions de  $\text{NH}_3$  varient davantage : elles tendent à être plus élevées dans les volières, où le fumier est réparti sur une plus grande surface et reste plus longtemps en contact avec les animaux, augmentant ainsi la volatilisation de l'ammoniac. Ces différences soulignent l'importance des pratiques de gestion du fumier et de la ventilation dans la réduction des émissions (Gonzalez-Mora et al., 2022; Zhao et al., 2014).

**Tableau 3.** Niveaux et facteurs d'émission par système de logement pour les poules pondeuses.

| Système                | Gaz              | Niveaux d'émission (g j <sup>-1</sup> poule <sup>-1</sup> ) | Principales sources                             | Facteurs influençant les émissions                                                                | Références                                                           |
|------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Cages conventionnelles | CO <sub>2</sub>  | 68,3 – 95,9                                                 | Respiration animale                             | Activité animale, métabolisme, température ambiante, ventilation                                  | Shepherd et al. (2015), Zhao et al., (2015)                          |
|                        | CH <sub>4</sub>  | 0,07 – 0,09                                                 | Fermentation anaérobie du fumier                | Gestion des déchets, conditions anaérobies, absence d'aération                                    | Fabbri et al. (2007)                                                 |
|                        | N <sub>2</sub> O | 0,0076 – 0,0278                                             | Nitrification et dénitrification dans le fumier | Composition du fumier, activité microbienne, conditions de stockage                               | Fabbri et al. (2007), Ngwabie et al. (2018)                          |
|                        | NH <sub>3</sub>  | 0,054 – 0,90                                                | Dégradation de l'urée dans le fumier            | Gestion et stockage du fumier, ventilation, pH du fumier                                          | Bist et al. (2023), Leinonen & Kyriazakis (2016), Rosa et al. (2019) |
| Cages enrichies        | CO <sub>2</sub>  | 74,4 – 95,9                                                 | Respiration animale                             | Activité animale, espace disponible, alimentation                                                 | Shepherd et al. (2015)                                               |
|                        | CH <sub>4</sub>  | 0,07 – 0,08                                                 | Fermentation anaérobie du fumier                | Gestion des déchets                                                                               | Fabbri et al. (2007), Fournel et al. (2012)                          |
|                        | N <sub>2</sub> O | 0,0068                                                      | Nitrification et dénitrification dans le fumier | Composition du fumier, conditions de stockage                                                     | Fabbri et al. (2007a), Ngwabie et al. (2018)                         |
|                        | NH <sub>3</sub>  | 0,054 – 0,16                                                | Dégradation de l'urée dans le fumier            | Gestion du fumier, séchage rapide                                                                 | Zhao et al. (2015)                                                   |
| Volières               | CO <sub>2</sub>  | 74,0 – 95,9                                                 | Respiration animale                             | Activité animale accrue                                                                           | Shepherd et al. (2015)                                               |
|                        | CH <sub>4</sub>  | 0,07 – 0,09                                                 | Fermentation anaérobie du fumier                | Conditions anaérobies similaires aux autres systèmes                                              | Fournel et al. (2012)                                                |
|                        | N <sub>2</sub> O | 0,0068                                                      | Nitrification et dénitrification dans le fumier | Composition et stockage du fumier                                                                 | Groot Koerkamp & Elzing (1996)                                       |
|                        | NH <sub>3</sub>  | 0,112 – 0,30                                                | Dégradation de l'urée dans le fumier            | Répartition du fumier sur une plus grande surface, contact prolongé entre le fumier et les poules | Gonzalez-Mora et al. (2022), Zhao et al. (2014)                      |

## Évaluation des émissions de gaz en élevage

L'évaluation précise des émissions gazeuses dans les systèmes de production animale est cruciale pour assurer la durabilité environnementale et une gestion efficace des installations. La manière dont ces gaz sont dispersés dans l'environnement dépend en grande partie du taux de ventilation, c'est-à-dire de la quantité d'air échangée entre l'intérieur des bâtiments (où sont logés les animaux) et l'extérieur. Une ventilation efficace permet de diluer et d'évacuer les gaz, tandis qu'une ventilation insuffisante peut entraîner une accumulation des polluants dans l'air ambiant. Pour calculer efficacement ces émissions, il est essentiel de mesurer à la fois les concentrations de gaz et le taux de ventilation dans le système. Ce débit est multiplié par les concentrations mesurées pour chaque gaz et sa densité :

$$E_{gaz} = Q * \Delta C_{gaz} * \rho_{gaz} \quad (1)$$

où  $E_{gaz}$  représente les émissions gazeuses ( $\text{mg h}^{-1}$ ),  $Q$  est le débit de ventilation de l'élevage ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ),  $\Delta C_{gaz}$  est la différence en concentration ( $\text{ppm}_v$ ) du gaz à la sortie et à l'entrée de la chambre et  $\rho_{gaz}$  est la masse de gaz par volume d'air ( $\text{kg m}^{-3}$ ), qui dépend des propriétés de l'air selon :

$$\rho_{gaz} = \frac{M_{gaz}}{M_{air}} * \rho_{air} \quad (2)$$

où  $M_{gaz}$  et  $M_{air}$  sont respectivement les masses molaires du gaz considéré ( $\text{CO}_2 = 44,0 \text{ g mol}^{-1}$ ;  $\text{CH}_4 = 16,0 \text{ g mol}^{-1}$ ;  $\text{N}_2\text{O} = 44,0 \text{ g mol}^{-1}$ ;  $\text{NH}_3 = 17,03 \text{ g mol}^{-1}$ ) et de l'air ( $28,97 \text{ g mol}^{-1}$ ) et  $\rho_{air}$  est la masse volumique de l'air ( $\text{kg}_{air} \text{m}^{-3}_{air}$ ), qui est fonction de la pression et de la température (ASAE, 2003). Ainsi, en introduisant l'équation 2 dans l'équation 1, cette dernière devient :

$$E_{gaz} = Q * \Delta C_{gaz} * \frac{M_{gaz}}{M_{air}} * \frac{P_{atm} - P_v}{287 * T} \quad (3)$$

où  $T$  est la température (K) et  $P_{atm}$  et  $P_v$  sont respectivement la pression atmosphérique au niveau de la mer et la pression de vapeur dans l'élevage (Pa).

Pour évaluer les émissions dans un élevage, il est indispensable de disposer d'équipements adaptés permettant de mesurer avec précision les différents paramètres environnementaux et les concentrations des gaz produits. La mesure précise de ces émissions repose sur l'utilisation de technologies qui permettent de capter à la fois les conditions environnementales, comme la vitesse du vent et le débit d'air, et les concentrations des gaz.

## Mesure des conditions environnementales

Les instruments les plus couramment utilisés pour la mesure de la température sont les thermocouples et les thermomètres à résistance (RTD). Les thermocouples sont des capteurs de température constitués de deux fils de métaux différents formant une jonction. Lorsque cette jonction est exposée à une variation de température, une différence de potentiel est générée, qui est convertie en lecture de température (Hu et al., 2006). Les RTD, quant à eux, utilisent la résistance électrique de certains matériaux, comme le platine, pour mesurer la température avec une grande précision (Green & Dyer, 2009; Winterbone, 1997).

L'humidité est souvent mesurée à l'aide d'hygromètres capacitifs ou résistifs. Les hygromètres capacitifs mesurent l'humidité relative en détectant les variations de capacité électrique d'un matériau hygroscopique exposé à l'air ambiant (Green & Dyer, 2009). Les hygromètres résistifs, en revanche, mesurent les changements de résistance électrique de matériaux sensibles à l'humidité (Makkonen & Laakso, 2005). Ces instruments permettent de suivre les fluctuations de l'humidité relative dans les environnements d'élevage, ce qui est essentiel pour contrôler les taux de ventilation et la qualité de l'air.

Pour connaître la vitesse d'air (et postérieurement le débit d'air dans la ferme), l'équipement plus utilisé est l'anémomètre. Il y en a deux types : à hélice et à fil chaud. Les anémomètres hélicoïdaux fonctionnent selon un principe mécanique simple. L'hélice, exposée au flux d'air, tourne à une vitesse proportionnelle à celle de l'air (Dines, 1892). La rotation de l'hélice est ensuite convertie en une lecture de vitesse de l'air. Ces anémomètres sont largement utilisés dans des environnements agricoles en raison de leur robustesse, de leur coût relativement bas et de leur facilité d'utilisation. Cependant, ils peuvent être sensibles aux turbulences dans les flux d'air, ce qui pourrait entraîner des mesures moins précises dans des environnements où le flux est irrégulier ou perturbé (e.g., à proximité des parois de bâtiments) (Hassouna et al., 2015). En plus, les anémomètres à hélice ne mesurent pas les faibles débits, car ils nécessitent une vitesse assez élevée pour faire tourner l'hélice. Les anémomètres à fil chaud reposent sur le principe de la convection thermique. Un fil fin, souvent en platine ou en tungstène, est chauffé à une température constante et exposé au flux d'air. Lorsque l'air circule autour du fil, il dissipe la chaleur et la quantité de chaleur dissipée est directement proportionnelle à la vitesse de l'air (Barratt et al., 2016). Les anémomètres à fil chaud offrent une précision élevée, particulièrement à basse vitesse, ce qui les rend idéaux pour des environnements où les courants d'air sont faibles ou variables (Nfaoui, 2012). Ils sont toutefois plus coûteux et délicats, et peuvent nécessiter un entretien régulier, car le fil peut être susceptible de se casser ou d'être

endommagé dans des environnements poussiéreux ou humides, comme ceux rencontrés dans les élevages.

Les hygro-thermo-anémomètres (Figure 6) sont des dispositifs polyvalents qui combinent la mesure de la température, de l'humidité et de la vitesse de l'air en un seul instrument. Ces appareils intègrent généralement un thermocouple ou un capteur RTD pour la température, un capteur capacitif pour l'humidité et un anémomètre (souvent hélicoïdal ou à fil chaud) pour mesurer la vitesse de l'air. L'avantage de ces instruments réside dans leur capacité à fournir les données de plusieurs paramètres avec un seul appareil, réduisant ainsi la complexité et les coûts d'équipement.



**Figure 6.** Hygro-thermo-anémomètres à fil chaud VT110 (à gauche) et hélicoïdal LV50 (à droite) de Kimo Instruments (Sauermann Group, Montpon-Ménestérol, France).

### Mesure des concentrations de gaz

Mesurer les émissions de gaz tels le  $\text{NH}_3$  et les GES qui proviennent de sources agricoles et d'élevage représente un défi particulier en raison de la grande variabilité temporelle et spatiale des émissions. De plus, la plupart des méthodologies disponibles pour la mesure des émissions de ces gaz dans ce secteur sont complexes et coûteuses (Hassouna et al., 2015; Larios et al., 2016). Pour mieux comprendre les émissions issues des systèmes d'élevage, différentes méthodes de mesure sont utilisées. Celles-ci incluent notamment le prélèvement en continu pour analyse en direct, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), les pièges acides pour l'ammoniac, ainsi que la chromatographie en phase gazeuse (GC). Chacune de ces méthodes repose sur des principes spécifiques et comporte des étapes techniques particulières, décrites ci-dessous.

#### *Prélèvement en continu pour analyse en direct*

Cette méthode nécessite que l'air échantillonné soit transporté, sans être affecté, du point d'échantillonnage aux analyseurs en utilisant le minimum d'équipement et en s'assurant que l'équipement est de qualité adéquate. En particulier, l'air échantillonné doit être maintenu au-dessus

du point de rosée pendant le transfert pour éviter la condensation et le piégeage de molécules d'intérêt dans l'eau. En outre, les particules susceptibles de fixer les espèces à mesurer et d'affecter les mesures doivent être éliminées de l'air à échantillonner à la source ou, si cela n'est pas possible, aussi près que possible de la source. Une attention particulière doit être apportée aux points de connexion entre les différentes parties de l'équipement pour éviter les fuites et une attention particulière doit être portée aux propriétés chimiques pour s'assurer qu'il n'y a pas de réaction avec ou d'adsorption des composés d'intérêt (Jahnke, 1993; Wight, 1994). Les principales limites de ce mode sont son coût et la mise en place ou le temps requis pour le déplacement du système d'échantillonnage en fonction de la longueur des circuits d'air (Hassouna et al., 2015).

#### *Spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)*

Le FTIR (Figure 7) est un équipement utilisé pour mesurer les concentrations de divers gaz dans des environnements tels que les bâtiments d'élevage. Le principe du FTIR repose sur l'absorption de lumière infrarouge par des molécules spécifiques de gaz, qui absorbent à des longueurs d'onde caractéristiques en fonction de leur structure chimique (Hase et al., 2015). Lorsqu'un échantillon de gaz est exposé à une source infrarouge, les différentes molécules présentes absorbent certaines fréquences de la lumière en fonction de leurs vibrations moléculaires et cette absorption est transformée en un spectre unique (Bacsik et al., 2004). Grâce à l'utilisation de la transformée de Fourier, il est possible de convertir le signal en un spectre complet qui permet d'identifier et de quantifier les différents gaz présents dans l'échantillon (Bacsik et al., 2005; Hase et al., 2015).



**Figure 7.** Analyseur de gaz à infrarouge à transformée de Fourier DX4040 (Gasmeter, Vantaa, Finlande).

L'une des grandes forces du FTIR est sa capacité à analyser simultanément plusieurs gaz, tels que les GES et le NH<sub>3</sub>, avec une grande précision et en temps réel (Bacsik et al., 2005). Cette technique est largement utilisée dans la surveillance environnementale, notamment dans les fermes d'élevage pour suivre les émissions de GES et les composés responsables de la qualité de l'air (Bacsik et al., 2004).

#### *Piégeage acide par barbotage*

Cette analyse en laboratoire de la concentration de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ou de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> dans la solution acide est utilisée pour calculer la concentration d'ammoniac (NH<sub>3</sub> ou N-NH<sub>3</sub>) dans l'air de l'émetteur, en tenant compte de la masse de la solution acide et du volume d'air qui a traversé le piège, comme indiqué par l'équation 4 (Ndegwa et al., 2009) :



La plupart des pièges à NH<sub>3</sub> utilisent soit de l'acide borique, de l'acide sulfurique ou un autre acide fort. L'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) est utilisé comme piège si la colorimétrie est utilisée comme méthode pour déterminer la quantité d'ammoniac (APHA, 1998). En général, les méthodes colorimétriques sont utilisées pour déterminer des concentrations de NH<sub>3</sub> plus faibles dans les solutions (jusqu'à 2 mg/L) que les méthodes de titrage, bien que les interférences puissent poser un problème dans certains cas en ce qui concerne les méthodes colorimétriques (Ndegwa et al., 2009).

#### *Chromatographie de gaz (GC)*

Le GC (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) utilise la chromatographie en phase gazeuse avec détecteurs sélectifs pour mesurer la concentration des gaz tels que les GES. Dans les méthodes chromatographiques, telles que la chromatographie en phase gazeuse ou liquide couplée à des détecteurs de spectrométrie de masse, l'objectif est d'identifier les composés et de comparer leurs concentrations dans et entre les échantillons (Johnsen et al., 2017). La chromatographie en phase gazeuse est utilisée pour détecter les composés gazeux ou les composés susceptibles de se vaporiser. Un chromatographe en phase gazeuse est chargé de séparer les composés de l'échantillon et de mesurer les concentrations de chacun de ces composés séparés. Un détecteur à ionisation de flamme (FID) est utilisé pour quantifier le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub> et un détecteur à capture d'électrons (ECD) est utilisé pour le N<sub>2</sub>O (Hassouna et al., 2015).



**Figure 8.** Chromatographe de gaz 690 (PerkinElmer, Woodbridge, ON, Canada).

Des recherches ont démontré l'utilisation de la chromatographie en phase gazeuse à échantillonnage continu pour déterminer le  $\text{NH}_3$  atmosphérique de 2 à 100 ppb et la détection possible du  $\text{NH}_3$  jusqu'à 0,02 ppb (Phillips et al., 2000; Yamamoto et al., 1994). Le seuil de détection du  $\text{N}_2\text{O}$  est généralement proche de 1 ppb (IAEA-International Atomic Energy Agency, 1992). La chromatographie en phase gazeuse avec FID est la technique la plus courante utilisée pour mesurer les concentrations de  $\text{CH}_4$  à un niveau de détection proche de 0,01 ppm<sub>v</sub> (Zhou et al., 2003; Zhu et al., 2014).

## **Mesure du taux de ventilation**

### *Méthodes directes*

#### **Fan Assessment Numeration System (FANS)**

Un exemple reconnu de dispositif complet pour la mesure du débit d'air dans les bâtiments d'élevage est le Fan Assessment Numeration System (FANS), développé par Gates et al. (2004). Ce système a été conçu pour évaluer sur le terrain les performances des ventilateurs mécaniques installés in situ, en conditions réelles d'exploitation. Il repose sur l'utilisation d'une rangée horizontale de cinq anémomètres à hélice montés sur un support mobile, qui effectue une traversée verticale automatisée du flux d'air à l'entrée du ventilateur. Cela permet de calculer le débit d'air à partir d'un profil de vitesse détaillé et d'une surface d'entrée bien définie. La méthode de FANS peut être utilisée avec des ventilateurs de grands diamètres (jusqu'à 137 cm) et permet une calibration spécifique à chaque ventilateur en tenant compte de ses caractéristiques propres, telles que la présence de volets, de grilles ou de cônes de sortie. Une fois calibré, il fournit des mesures précises en temps réel du débit d'air en fonction de la pression statique du bâtiment.

Cependant, malgré sa précision et sa robustesse, le système FANS présente certaines limitations (Gates et al., 2004). Son utilisation sur le terrain peut s'avérer contraignante en raison de sa taille, de

son poids et de la complexité logistique qu'il implique, notamment lorsqu'il s'agit de tester plusieurs ventilateurs dans un même bâtiment. De plus, l'installation du dispositif en amont du ventilateur peut entraîner une légère perte de charge, affectant temporairement le débit mesuré. Finalement, bien que la calibration améliore la fiabilité des mesures, elle exige du temps, de l'équipement spécialisé et du personnel expérimenté.

### Anémomètre

La méthode directe la plus utilisée pour déterminer le débit d'un ventilateur ( $q$ ;  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) est au moyen d'anémomètres à fil chaud ou hélicoïdaux, qui mesurent la vitesse du flux d'air ( $v$ ;  $\text{m h}^{-1}$ ), laquelle est multipliée par la section transversale du ventilateur ( $A$ ;  $\text{m}^2$ ) :

$$q = v * A * \frac{t_{marche}}{t_{total}} \quad (5)$$

où  $\frac{t_{marche}}{t_{total}}$  est le rapport entre le temps de fonctionnement du ventilateur et la durée de la période considérée. Le débit total de ventilation ( $VR$ ;  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) est ensuite calculé par la somme des débits de tous les ventilateurs mesurés :

$$VR = \sum_{f=1}^n q_n \quad (6)$$

Néanmoins, cette méthode présente des défis considérables (Ogink et al., 2013b) : étalonnage des anémomètres (Park et al., 2018; Z. Zhou et al., 2017a), taille de l'installation, distribution des ventilateurs et obstacles dans le bâtiment qui peuvent bloquer l'air et réduire sa vitesse (Calvet et al., 2013; R. et al. Burns, 2009) et temps et main-d'œuvre nécessaires à la collecte et à l'analyse des données rendant difficile la mesure en continu.

### Débitmètre à orifice déprimogène

La mesure de débit par pression différentielle est une méthode couramment utilisée pour déterminer le débit d'air dans un conduit. Cette méthode repose sur la relation entre la différence de pression créée par le passage du fluide à travers une restriction (comme une plaque à orifice, une venturi ou un tube de Pitot) et le débit du gaz (IMAN, 2021). Le principe repose sur l'accélération du fluide lorsqu'il passe à travers une restriction dans le conduit, ce qui entraîne une pression statique plus faible en aval qu'en amont. Cette différence de pression est proportionnelle au carré de la vitesse du fluide, ce qui permet de calculer le débit. Pour le calcul du taux de ventilation, l'équation suivante est utilisée (Fournel et al., 2011):

$$VR = k \sqrt{\Delta p} \quad (7)$$

où  $k$  est le coefficient de décharge de l'orifice et  $\Delta p$  est la différence de pression statique à travers l'orifice (kPa).

Cette méthode présente des avantages comme son excellente reproductivité et l'étendue des valeurs de pression et de température possible (seulement limitée par l'élément de mesure de  $\Delta p$ ). En revanche, elle peut présenter quelques inconvénients, tels que la perte de charge résiduelle pas toujours tolérable. Dans les fermes commerciales, ces inconvénients peuvent être amplifiés en raison de la taille des systèmes de ventilation et des besoins en entretien plus fréquents, ce qui peut entraîner des coûts opérationnels plus élevés et une gestion plus complexe (IMAN, 2021).

#### *Méthodes indirectes*

##### Bilan d'humidité

Le bilan d'humidité consiste à comparer l'entrée et la sortie de la vapeur d'eau pour évaluer le renouvellement de l'air (Samer et al., 2012). Le bilan d'humidité s'appuie sur les lois psychrométriques, qui décrivent la relation entre la température, l'humidité relative et la pression de vapeur dans l'air. L'humidité générée à l'intérieur du bâtiment provient principalement des animaux et dans une moindre mesure des effluents (Pedersen & Thomsen, 2000). Chaque animal produit une certaine quantité d'eau par la respiration et la transpiration, en fonction de son poids, de son activité et des conditions climatiques internes (Pederson et al., 2002). Il est possible d'utiliser des valeurs standard pour estimer la production d'eau des animaux.

Le bilan d'humidité est une technique peu coûteuse et simple qui permet d'estimer raisonnablement le flux d'air journalier ou demi-journalier. Néanmoins, cette méthode ne permet pas d'obtenir des mesures précises sur des échelles de temps courtes en raison de la forte variabilité des paramètres clés, tels que l'humidité et la température (Hassouna et al., 2015). Ces facteurs peuvent fluctuer rapidement sur de courtes périodes, ce qui conduit à des estimations moins précises de la ventilation.

##### Bilan de traçage à l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>)

Cette méthode repose sur l'émission d'une quantité connue d'un gaz traceur qui se diffuse de la même manière que les gaz cibles dans des bâtiments d'élevage entièrement ou partiellement fermés. Le SF<sub>6</sub> est souvent utilisé comme traceur, car il est facile à détecter, chimiquement très inerte, et il n'est pas produit dans le bâtiment (Hassouna et al., 2015). La mesure avec un gaz traceur est souvent considérée comme une méthode standard, bien établie pour quantifier les émissions des bâtiments pour le bétail (Phillips et al., 2001). Des systèmes intégrés permettent d'injecter le gaz traceur, de prélever des

échantillons d'air, de mesurer la concentration du gaz traceur et des gaz dont les émissions sont estimées et de calculer le flux d'air (Phillips et al., 2001).

Cependant, l'utilisation du SF<sub>6</sub> présente deux inconvénients majeurs. D'une part, c'est un GES avec un potentiel de réchauffement global environ 22 200 fois plus élevé que celui du CO<sub>2</sub> sur 100 ans (Houghton et al., 2001). D'autre part, sa densité élevée nécessite une distribution uniforme et une concentration approximativement égale à celle des gaz dont les émissions sont estimées.

## Bilan de CO<sub>2</sub>

L'approche du bilan de CO<sub>2</sub> suppose que la ventilation peut expliquer la relation entre la production de CO<sub>2</sub> (provenant principalement du métabolisme de l'animal et, le cas échéant, de la litière et du chauffage) et la différence de concentration en CO<sub>2</sub> entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment (Li, Xin, & Liang, 2004; Z. Liu et al., 2016; Rosa et al., 2019). En mesurant la concentration de CO<sub>2</sub> à l'intérieur et à l'extérieur et en connaissant le taux de production de CO<sub>2</sub> des animaux, il est possible de calculer le taux de ventilation nécessaire pour maintenir une concentration de CO<sub>2</sub> acceptable :

$$VR_{CO_2} = \frac{PRCO_2 \text{ AA}}{([CO_2]_i - [CO_2]_e)} * 3600 \quad (8)$$

où  $VR_{CO_2}$  est le taux de ventilation du local sur la base de la méthode d'équilibre du CO<sub>2</sub> (m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup>),  $PRCO_2$  est le taux de production de CO<sub>2</sub> des poules (mL s<sup>-1</sup>), AA est l'activité animale (adimensionnel),  $[CO_2]_e$  et  $[CO_2]_i$  sont respectivement les concentrations de CO<sub>2</sub> à l'extérieur et à l'intérieur (ppm<sub>v</sub>) et le nombre 3600 correspond au changement d'unité (3600 s h<sup>-1</sup>). Le  $PRCO_2$  peut être décrit par la relation entre la production totale de chaleur (THP) et le quotient respiratoire (RQ), qui correspond au volume de CO<sub>2</sub> libéré par rapport au volume d'oxygène utilisé au cours de l'activité respiratoire des poules (Brouwer, 1965) :

$$PRCO_2 = \frac{THP}{\frac{16,18}{RQ} + 5,02} + CO_{2manure} \quad (9)$$

Les constantes 16,18 et 5,02 utilisées dans l'équation représentent les équivalents énergétiques (en kJ) de 1 L d'O<sub>2</sub> consommé et de 1 L de CO<sub>2</sub> produit, respectivement. Ces valeurs sont basées sur les principes de la calorimétrie indirecte et permettent d'estimer le CO<sub>2</sub> respiratoire à partir de la production totale de chaleur (THP), ajusté par le QR (Brouwer, 1965). On peut estimer le CO<sub>2</sub> produit par l'effluent à 1% en hiver et à 5 % en été (Hayes et al., 2013; Rosa et al., 2019). Par conséquent, le métabolisme CO<sub>2</sub> pendant l'hiver a été estimé à 99 %, tandis qu'il a été fixé à 95 % du CO<sub>2</sub> total produit dans le poulailler pendant l'été. Le calcul du THP (W poule<sup>-1</sup>) a été effectué selon les

équations proposées par Pederson et al. (2002) pour les poules pondeuses logées dans des cages (équation 10a) et dans des volières (équation 10b) :

$$THP_{cages} = 6,28 m^{0,75} + 25Y \quad (10a)$$

$$THP_{volières} = 6,80 m^{0,75} + 25Y \quad (10b)$$

où  $m$  est la masse de la poule (kg),  $Y$  est la production d'œufs ( $\text{kg j}^{-1} \text{ poule}^{-1}$ ). Cette équation a été développée à une température de 20 °C et une correction de température est donc nécessaire (Pederson et al., 2002) :

$$THP_{corr} = 1000 + 20 * (20 - T) \quad (11)$$

où  $THP_{corr}$  est la production totale de chaleur corrigée en fonction de la température pour la volaille ( $\text{W hpu}^{-1}$ ) et  $T$  est la température (°C).

La méthode du bilan de  $\text{CO}_2$  est prometteuse grâce à sa capacité de mesure continue et non invasive (Li et al., et al., 2004; Liu et al., 2016; Rosa et al., 2019). Cependant, les taux spécifiques de production de  $\text{CO}_2$  des pondeuses et les conditions environnementales pouvant influencer ces mesures.

### Bilan thermique

Selon Hassouna et al., (2015), cette méthode repose sur le principe que la ventilation relie la production de chaleur à la différence de température. La chaleur totale générée par les animaux, issue de leur métabolisme, ainsi que celle provenant du chauffage du bâtiment, se divise en deux formes : la chaleur sensible, qui se traduit par une augmentation de la température et provient de la chaleur convective et radiative des animaux, de la litière et du chauffage, et la chaleur latente, transportée par la vapeur d'eau, qui se manifeste par une augmentation de l'humidité relative, la vapeur étant issue de la respiration des animaux et de l'évaporation de la litière. Le bilan thermique du bâtiment doit être calculé à partir de l'équation suivante :

$$VR_{HBM} = \frac{THP - GE}{\rho(Ea - Eb)} \quad (12)$$

où  $VR_{HBM}$  est le taux de ventilation de la chambre basé sur la méthode du bilan thermique ( $\text{m}^3 \text{ hr}^{-1}$ ),  $Ea$  et  $Eb$ , sont respectivement l'enthalpie de l'air intérieur et de l'air extérieur ( $\text{J kg}^{-1}$ ) (ASHRAE, 2017),  $GE$  est la perte de chaleur à travers l'enveloppe ( $\text{J h}^{-1}$ ) et  $\rho$  est la masse volumique de l'air dans le bâtiment ( $\text{kg m}^{-3}$ ). Cette dernière est estimée par l'équation suivante :

$$\rho = \frac{1}{287,06 * (T + 273,15)} \left( p - 230,617 * HR * \exp \left[ \frac{17,5043 * T}{241,2 + T} \right] \right) \quad (13)$$

où  $RH$  est l'humidité relative du bâtiment (%),  $T$  est la température interne (°C) et  $p$  est la pression interne (Pa).

La perte de chaleur (GE) est calculée en fonction des différences de température, de la surface concernée et de la résistance thermique effective, laquelle dépend de la résistance thermique de chaque matériau composant le mur. La résistance de chaque matériau peut être calculée selon la méthode des plans isothermes (en série-parallèle), telle que décrite dans le Code national du bâtiment du Canada et résumée par RNC (2016). Cette méthode permet de représenter la transmission de chaleur à travers des couches composites comportant des matériaux de conductivités différentes. Elle prend en compte la disposition des matériaux en série et en parallèle, offrant ainsi une estimation plus réaliste de la résistance thermique globale.

Cette approche comporte des suppositions et des limites. La précision de cette méthode diminue lorsque l'évaluation est effectuée sur de courtes périodes, car l'activité des animaux et la production de chaleur varient au cours de la journée (Pedersen et al., 1998). Néanmoins, cette méthode présente des avantages, elle peut fournir des estimations raisonnables du taux de ventilation lorsqu'elle est appliquée sur des périodes suffisamment longues (Pedersen et al., 1998).

## Analyse critique de la littérature

### Défis à surmonter

La ventilation dans les bâtiments d'élevage contribue au maintien de la santé, la productivité et le bien-être des animaux. Dans le cadre de la production d'œufs de consommation, le contrôle des émissions, et donc une bonne gestion de la ventilation, se traduisent par un taux de production plus élevé et un meilleur bien-être des poules. Le projet propose de relever plusieurs défis techniques et scientifiques liés à l'estimation précise des taux de ventilation dans les poulaillers :

1. Les émissions de GES et de  $NH_3$  entre les différents types de systèmes d'élevage de poules pondeuses sont variables. Chaque système présente des caractéristiques spécifiques qui influencent les émissions, comme le type de logement, la gestion du fumier, la densité de population et les conditions de ventilation. Cette variabilité complique l'évaluation comparative des performances environnementales, car il est difficile d'isoler l'effet d'un seul facteur. Les différences observées entre systèmes peuvent résulter de multiples interactions entre les pratiques de gestion, l'architecture des bâtiments et le comportement animal, rendant les

comparaisons moins directes ou généralisables. Par exemple, les systèmes sans cage, tout en offrant une plus grande liberté de mouvement aux animaux, ont tendance à générer des niveaux d'émissions plus élevés en raison de la plus grande surface occupée par les poules et des interactions plus complexes avec l'environnement.

2. Les limites des méthodes directes de mesure des taux de ventilation doivent être connues et surmontées. Ces méthodes peuvent être sujettes à des erreurs de mesure dues à plusieurs facteurs. Par exemple, la taille importante des installations complique le positionnement optimal des capteurs et rend difficile la couverture complète des flux d'air. La distribution non uniforme des ventilateurs, avec des zones de sur- ou sous-ventilation, peut créer des gradients de concentration mal captés par les instruments. Enfin, les conditions climatiques variables (température extérieure, vent, humidité) influencent le fonctionnement des systèmes de ventilation (naturels ou mécaniques) et peuvent introduire des fluctuations dans les débits mesurés. La précision des mesures peut ainsi être altérée par ces variations environnementales et par les caractéristiques spécifiques des systèmes de logement. Par ailleurs, les méthodes directes sont également chronophages, coûteuses et difficiles à implanter dans des fermes commerciales. Ces limitations expliquent le faible nombre d'études complètes portant sur la quantification des émissions en conditions réelles. Par conséquent, développer une méthode indirecte suffisamment précise ouvre la porte à la mesure des facteurs d'émission à grande échelle et à une meilleure précision sous différentes conditions environnementales et de logement.
3. Les méthodes indirectes, comme les bilans de CO<sub>2</sub> et thermique, sont prometteuses pour estimer les taux de ventilation, mais elles présentent des défis importants. Leur précision peut être affectée par des facteurs tels que la variabilité des conditions climatiques, les caractéristiques des bâtiments d'élevage et l'activité des poules, qui fluctue tout au long de la journée. En revanche, d'autres approches indirectes (telles que celles basées sur la mesure de concentrations d'autres gaz traceurs) n'ont pas été considérées en raison de leur complexité de mise en œuvre dans des conditions commerciales.
4. Les méthodes indirectes de mesure du taux de ventilation n'ont pas fait l'objet d'études approfondies dans les systèmes de logement alternatifs (CE et V). Ces méthodes ont été peu explorées dans des fermes commerciales aux conditions climatiques spécifiques du Québec, où les variations saisonnières et les conditions hivernales peuvent influencer les résultats.

### **Limites et opportunités des méthodes directes et indirectes**

Il est crucial de mesurer avec précision le débit de ventilation dans les installations ovocoles, car une erreur à ce niveau peut entraîner une estimation inexacte des émissions. Une bonne mesure du débit

permet aussi d'assurer des conditions optimales pour les animaux et une gestion efficace des émissions. Cependant, cette tâche peut être exigeante en raison des limitations inhérentes aux méthodes disponibles. Les méthodes directes comme l'utilisation d'anémomètres pour mesurer la vitesse de l'air à l'entrée et à la sortie du bâtiment, qui donnent une mesure précise du taux de ventilation, sont fréquemment utilisées. Cependant, la mise en œuvre est souvent compliquée et coûteuse puisqu'il faut utiliser des équipements spécialisés ainsi que des procédures d'étalonnage strictes, un obstacle majeur dans les situations où il y a peu de ressources (Ogink et al., 2013a; Park et al., 2018; Z. Zhou et al., 2017b). En outre, la taille des élevages, la position des ventilateurs et les obstacles à la circulation de l'air peuvent altérer les indications fiables (Calvet et al., 2013; Gates et al., 2009).

D'autre part, les méthodes indirectes, telles que les bilans de CO<sub>2</sub> et de chaleur, sont basées sur des modèles théoriques qui estiment le taux de ventilation à partir de paramètres et d'équations environnementales spécifiques. Les méthodes indirectes n'intègrent pas systématiquement les variations dues aux conditions saisonnières et aux différences entre les systèmes de production. De plus, la précision peut être réduite sur de courtes périodes en raison des variations de l'activité animale au cours de la journée, ce qui complique la comparaison des résultats entre différents logements (Blanes & Pedersen, 2005; Samer et al., 2011; Hassouna et al., 2015).

Les erreurs de mesure des taux de ventilation peuvent conduire à des réglages inappropriés, ce qui rend difficile le maintien de conditions optimales et le respect des réglementations en matière de ventilation et d'émissions (Calvet et al., 2013; Ogink et al., 2013a). Dans ces circonstances, il est important de développer et de valider de nouvelles méthodes de mesure plus précises et plus abordables. Par conséquent, de nouvelles méthodes peuvent être nécessaires pour déterminer le volume total d'air vicié rejeté par unité de temps dans un bâtiment à l'aide de mesures ponctuels et continues de paramètres clés.

Dans le but d'évaluer le taux de ventilation dans les poulaillers, plusieurs études ont été menées par des chercheurs utilisant des méthodes directes et indirectes (Li et al., 2005; Pedersen et al., 1998; Rosa et al., 2019). Par exemple, ces auteurs indiquent que le bilan de CO<sub>2</sub> peut mesurer directement la ventilation avec une forte corrélation. Cependant, malgré les informations précieuses fournies par ces recherches, il n'y a toujours pas de consensus sur la meilleure approche d'évaluation du taux de ventilation pour les méthodes indirectes et la littérature ne fournit pas d'indications claires sur les améliorations possibles en matière de collecte de données ou d'équations pour améliorer les performances de l'évaluation des débits de ventilation dans différents contextes.

## **Retombées potentielles sur la détermination et la gestion des émissions et le bien-être animal**

L'adaptation et la validation d'un modèle d'estimation des taux de ventilation dans l'élevage des poules pondeuses est important pour la détermination et gestion des émissions et le bien-être des animaux. Une évaluation précise des taux de ventilation permettrait de développer des stratégies de mitigation des émissions plus ciblées et plus efficaces. Les méthodes indirectes, en particulier, sont avantageuses, car elles permettent de prélever des échantillons plus rapidement et plus facilement, tout en offrant une précision acceptable. En identifiant les variations d'émissions entre les systèmes d'élevage et en ajustant les pratiques de ventilation en conséquence, il serait possible de mettre en œuvre des mesures spécifiques pour réduire les émissions de GES et de NH<sub>3</sub>, contribuant ainsi à une gestion plus durable des installations ovocoles. Une ventilation adéquate permet de maintenir des conditions optimales de température et d'humidité, réduisant ainsi le stress thermique et les problèmes de santé associés à une mauvaise qualité de l'air. Les poules pondeuses bénéficieraient d'un environnement plus sain et plus confortable, ce qui pourrait améliorer leur bien-être et leur productivité. En parallèle, l'amélioration de la gestion des émissions et l'optimisation de la ventilation peuvent également réduire les coûts d'exploitation. En minimisant les pertes dues à une ventilation inadéquate et en améliorant l'efficacité énergétique des systèmes de ventilation, les producteurs pourraient économiser de l'argent tout en améliorant le bien-être des animaux.

## **Objectifs et hypothèses de recherche**

L'objectif principal de cette thèse est de valider une méthode indirecte de mesure du taux de ventilation afin de mieux définir les facteurs d'émissions en production ovocole pour différents systèmes d'élevage (cages conventionnelles, cages enrichies et volières).

Cet objectif sera abordé dans le cadre de trois sous-objectifs :

- **Comparer les émissions produites par les systèmes conventionnels et alternatifs en systèmes de production d'œufs de consommation.** Cette comparaison permettra de mettre en lumière les variations environnementales associées à différents types de systèmes d'élevage dans le cadre de la production au Québec (Sous-Chapitre 1.2) et souligner l'importance d'avoir une méthode de mesure du taux de changement plus précise ;
- **Évaluer la performance de deux méthodes de mesure indirectes par rapport à la méthode directe pour la détermination du taux de ventilation.** Cette évaluation vise à déterminer dans quelle mesure ces méthodes indirectes peuvent fournir des estimations

précises du taux de ventilation malgré les variations de conception et d'environnement des poulaillers, ainsi qu'à identifier les variables ayant la plus grande influence sur les calculs du taux de ventilation (Chapitre 2) ;

- **Adapter et valider un modèle pour l'estimation du taux de ventilation dans le contexte de la production d'œufs de consommation.** Ce modèle abordera la description des ajustements nécessaires pour le modèle en fonction des caractéristiques uniques de chaque type de logement, ainsi que trois validations aux niveaux expérimental et commercial dans les trois systèmes de logement (Chapitre 3).

Pour cela, quatre hypothèses sont retenues :

1. Les émissions de gaz différeront entre les systèmes de production d'œufs alternatifs et conventionnels, indiquant des variations environnementales ;
2. Les modèles indirects estimeront le taux de ventilation malgré les différences de conception et d'environnement dans les poulaillers ;
3. En ajustant le modèle en fonction des écarts observés, les prédictions concorderont mieux avec les taux mesurés de ventilation ; et
4. Le modèle adapté sera efficace dans divers types d'installations d'élevage d'œufs, démontrant sa polyvalence.

# **Chapitre 1. Données et analyse des émissions dans la production d'œufs : comparaison des systèmes et rôle du débit de ventilation**

## **1.1. Présentation des données et contexte de la recherche**

Dans l'industrie de la production animale, les nouveaux paradigmes intègrent de plus en plus des considérations contemporaines de bien-être animal. Dans le secteur des poules pondeuses, cette transition se traduit par un passage des CC vers des systèmes alternatifs tels que les CE et les volières. Bien que ces systèmes améliorent le bien-être des animaux en augmentant l'espace disponible et la liberté de mouvement, ils entraînent également une augmentation significative des émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac. L'évaluation de ces émissions repose sur la mesure précise du débit de ventilation et sur la différence de concentration de gaz entre l'air entrant et l'air extrait du bâtiment. La complexité de cette mesure, particulièrement lors de transitions vers des systèmes plus ouverts et enrichis, rend nécessaire le développement et la validation de méthodes adaptées pour estimer le débit de ventilation avec fiabilité.

Dans ce contexte, des travaux expérimentaux réalisés dans les chambres du laboratoire BABE (CRSAD, Deschambault, QC) ont permis de tester des approches méthodologiques pour estimer les émissions et le débit de ventilation. Fournel et al. (2012) ont étudié les cages conventionnelles, Gonzalez-Mora et al. (2021) un système sans cage et Philippe et al. (2020) ont comparé les trois systèmes dans des conditions expérimentales identiques. Ces projets ont fourni des références méthodologiques et des premières indications sur les différences potentielles entre systèmes, mais il restait essentiel de vérifier ces tendances dans des conditions de production commerciale, où la variabilité est beaucoup plus importante.

L'étude présentée en section 1.2 répond à ce besoin en comparant les émissions de GES et de  $\text{NH}_3$  entre trois systèmes de logement de poules pondeuses dans des fermes commerciales du Québec. Cette approche permet d'identifier les écarts réels entre les systèmes.

## **1.2. Évaluation des émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac : Comparaison de trois systèmes de production d'œufs au Québec, Canada**

Emerging livestock production paradigms are increasingly integrating animal welfare considerations. For instance, novel housing systems prioritize freedom of movement, a paramount aspect of living conditions as perceived by the public (Schuppli et al., 2014). Recognizing the importance of animal welfare in production systems, factors such as the provision of resting places and opportunities for exercise and thus physical health and behavior becomes paramount (Campbell et al., 2019; Ciarelli et al., 2023). Although the laboratory projects described in Section 1.1 provide a solid foundation for understanding and modeling emissions, it is equally important to consider the commercial context of poultry production in Quebec. Conditions on commercial farms differ substantially from experimental chambers in terms of animal density, manure management, ventilation, and feeding, all of which can influence levels of greenhouse gas (GHG) and ammonia (NH<sub>3</sub>) emissions. Therefore, to complement the laboratory findings and place the results in a more representative scenario, this thesis also analyzes data obtained from commercial farms, allowing for an assessment of the environmental impact of CC, EC, and CF systems under real production conditions.

Recently, the Canadian egg production system has faced criticism due to its failure to provide adequate surface area in conventional, cramped wire cages (CC; 432-484 cm<sup>2</sup>/hen), a crucial factor for hen welfare (Lay et al., 2011; Fulton, 2019; Schuck-Paim et al., 2021). Consequently, the CC system for rearing laying hens was prohibited on January 1, 2015 (Larivière, 2016), with a complete transition to alternative systems slated for completion by 2036 (CNSAE, 2017). Since then, there has been a gradual shift towards enriched cages (ECs) and cage-free (CF) environments, which adhere to contemporary standards for animal well-being. The EC system provides hens with more space (750 cm<sup>2</sup>/hen) and environmental stimulation (perches, scratching area, dust bath, and dedicated laying zone). In the CF systems, the minimum area is 930 cm<sup>2</sup>/hen, which allows hens to find themselves in an environment where they can express various natural behaviors, such as flying and dustbathing (Leyendecker et al., 2005; Mollenhorst et al., 2005; FPOQ, 2012).

The move towards more compassionate practices in the industry reveals a significant increase in surface area per bird and exercise, which, on the other end, induces greater feed consumption and manure excretion (Shields & Greger, 2013). In fact, EC and CF housing systems are often associated with notable increases in emissions of greenhouse gases (GHGs) and ammonia (NH<sub>3</sub>) (Shepherd et al, 2015; Bist et al., 2023). Assessing the environmental impact of this shift in production systems is

crucial, particularly given Canada's overarching environmental issues. Nationally, the poultry sector contributes 37%, 5 %, and 57% of total carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>), and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions from agriculture, respectively (Camirand & Gingras, 2011). Meanwhile, NH<sub>3</sub> emissions from poultry systems account for 6.2% of total livestock emissions (Carew, 2010).

Inside the livestock buildings, the majority of CO<sub>2</sub> production stems from animal respiration (Pedersen et al., 2008). While laying hens produce negligible CH<sub>4</sub> emissions through enteric fermentation, the anerobic conditions in stored manure lead to CH<sub>4</sub> emissions (Fabbri et al., 2007a). Nitrous oxide is generated during nitrification and denitrification processes under low oxygen conditions (Fabbri et al., 2007a; Ngwabie et al., 2018). Emissions of NH<sub>3</sub> in laying hen houses primarily originate from manure, with concentrations within buildings largely influenced by various factors, including husbandry systems (such as cages, alternative systems), housing capacity, density (number of birds per cages or unit floor area), and feed composition such as protein content (Kilic & Yaslioglu, 2014).

Measuring emissions from various egg production systems becomes crucial for promoting sustainability and responsibility, balancing animal welfare, environmental stewardship, and human health concerns. Several studies have explored the complexities of GHG and NH<sub>3</sub> emissions within diverse egg production systems. Shepherd et al. (2015) observed air emissions from three commercial egg production systems at the housing level. The study showed that NH<sub>3</sub> emissions from EC systems (2.25 mg hen<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>) were significantly lower than those from CC (3.42 mg hen<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>) and CF (4.67 mg hen<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>) systems. Liu et al. (2020) monitored the emission rates from three laying hen houses: CC, aviary, which is similar to CF system, and natural mating colony cage, which is like the EC system. They reported higher NH<sub>3</sub> emissions in the natural mating (27.16 mg hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>) system than in conventional (3.43 mg hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>) or aviary (3.23 mg hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>) systems. The results reported by Zhao et al. (2015) for CC, EC, and CF, the results are consistent with those in this project. They highlighted NH<sub>3</sub> concentrations in the CF system significantly higher than those in the CC or EC system and occasionally exceeding 25 ppm<sub>v</sub> under ambient temperatures greater than 7.2 °C. By comprehensively understanding emissions in different housing systems, mitigation strategies and policies can be developed to minimize environmental impact and promote sustainable practices.

The emission of GHGs and NH<sub>3</sub> poses significant health risks to laying hens and farm workers. Elevated levels of CO<sub>2</sub> (above 5000 ppm<sub>v</sub>) can induce respiratory distress for both hens and workers (Webster & Fletcher, 2001; Mohammed et al., 2021). Emissions of CH<sub>4</sub>, while less directly harmful, contribute to poor air quality and may exacerbate respiratory issues over time (Mohammed et al., 2021). Nitrous oxide induces heat stress and physiological changes in birds (Mohammad Al-Kerwi

et al., 2022). Emissions of  $\text{NH}_3$  severely threaten both hens and workers, causing respiratory irritation (Kilic & Yaslioglu, 2014; Zhao et al., 2015; Bist et al., 2023). Prolonged exposure to these gases can result in adverse effects on workers' respiratory health (Viegas et al., 2013). In the end, ensuing production losses and compromised egg quality (Mohammad Al-Kerwi et al., 2022) due to inadequate indoor environmental conditions lead to overall economic losses for the industry.

The present study aimed to evaluate GHG and  $\text{NH}_3$  emissions originating from CC systems and two alternative egg production systems (EC and CF) and to identify the sources of emission variations across the systems (e.g., the manure management system) within the framework of Canada's egg production systems under commercial conditions.

### **1.2.1. Experimental setup and design**

Thirty (30) commercial farms equipped with mechanical ventilation systems located in Southern Québec (Eastern Canada) were selected for this study. The selection criteria included the farms' production system (one of the three systems), geographical location (Southern Québec), and the producers' willingness to participate. The laying hens in the chosen barns were, on average,  $57 \pm 8$  weeks old, reared in one of the three production systems: CCs (6 barns), ECs (14 barns), and CF systems (10 barns). The farms presented different manure management systems. Twenty-one (21) had manure belt drying systems, which used conveyor belts to remove the manure from the barn. Four (4) farms utilized manure conveyor and scraper systems, where the manure is conveyed away from livestock housing areas using conveyor belts or chains equipped with scrapers. These scrapers remove the manure from the floor and transport it to a storage facility. Two (2) farms allowed manure to dry naturally on bedded floors. The remaining three (3) farms collected and stored manure in underground pits or tanks.

### **1.2.2. Data collection**

This study was conducted over the years 2020 to 2022 and involved a single visit to each farm (Annexe 1). During these visits, measurements were taken twice daily: once in the morning (between 9:00 and 11:00) and once in the afternoon (between 13:00 and 15:00). The duration of each measurement session varied based on the number of operating fans. Data collected included gas concentrations, air velocity, temperature, and humidity at multiple points. For consistency and reliability, measurements were taken at the ventilation fans, the center of the facility, the air intake, and outside the barn. The data from the morning and afternoon sessions were averaged for statistical analysis.

Concentrations of GHGs and  $\text{NH}_3$  were determined using an infrared gas analyzer (FTIR model DX4040, spectrometer resolution  $8\text{ cm}^{-1}$ , range in  $\text{ppm}_v$ :  $\text{CO}_2 = 0\text{-}2000$ ,  $\text{CH}_4 = 0\text{-}100$ ,  $\text{N}_2\text{O} = 0\text{-}200$ ,  $\text{NH}_3 = 0\text{-}100$ , Gasmeter, Vantaa, Finland). The infrared gas analyzer was calibrated before analysis with nitrogen gas at a flow level of  $2\text{ L min}^{-1}$  for 4 min (3 min for calibration and 1 min for measurement validation). Airspeed, humidity, and temperature were measured using a telescopic multifunction thermo-hygrometer-anemometer (VT210 + SFC300 probe, air velocity accuracy  $\pm 3\%$  of reading  $\pm 0.1\text{ m/s}$ , temperature accuracy 3% of reading  $\pm 0.25^\circ\text{C}$ , KIMO, Chevry-Cossigny, France).

It is important to note that using an average value of multipoint measurements of gas concentration and emission may not fully represent each system's conditions throughout the year. However, this method offers valuable insights into emissions and serves as a helpful indicator of gas concentrations at a specific moment and location within egg production systems.

### **1.2.3. Ventilation rate and gas emissions**

The airspeed from each fan was meticulously measured across the fan area for one minute, and the values were then averaged. Using the known cross-sectional area of the fan, the airflow rate from each fan was calculated using Equation (3). The emissions for all gases measured were calculated using Equation (6).

### **1.2.4. Statistical analyses**

Statistical analyses were performed using Python libraries (Pedregosa et al., 2011), that is the package *models.stats.multitest.multiple* tests. Similar studies have used these tests to provide rigorous and objective analyses of differences in gas emissions in housing systems and environmental parameters (Li et al., 2012; Zhao et al., 2014). To compare the gas emissions in housing systems and environmental parameters, a series of t-tests were conducted, with the significance level adjusted using the Bonferroni correction to account for multiple comparisons. This approach compares means between groups, reducing the risk of Type I errors. Significance was declared at  $p < 0.05$ , and trends were declared at  $p < 0.10$  for the main effects.

Two correlations were performed. First, a Spearman correlation was performed between outdoor and indoor gas concentrations to determine whether there was any interference between internal and external concentrations. Correlation coefficients were strong (1 or -1), moderate (coefficients close to 0.5 or -0.5), or weak (coefficients close to 0). Then, a correlation analysis was performed to determine the association between six variables (number of hens, outdoor and indoor humidity

relative, outdoor and indoor temperature, and VR) and gas concentrations and emissions. This last correlation analysis was initially conducted using all available data; however, no significant correlations were found. Therefore, separate correlation analyses were performed for the cold season, which included data from 25 farms, and the warm season, which included data from 5 farms. For the purposes of this study, the cold season was defined as the period from October to April, and the warm season as May to September, based on typical temperature variations in Southern Québec. Due to the unequal distribution of farms between both seasons, subsequent analyses considered all results to ensure equitable representation across the dataset.

### 1.2.5. Environmental conditions

Table 4a and 4b present the results of the environmental conditions measured in the selected egg production systems. Indoor temperatures were within the range established by the National Farm Animal Care Council (NFACC, 2016) for laying hens older than six weeks, i.e., between 10°C and 28°C. Concurrently, indoor relative humidity levels were within the optimal threshold of 55% to 65%.

**Table 4a.** Animal characteristics and environmental conditions of selected egg production systems in cold season: six (6) conventional cages (CC), 10 enriched cages (EC) and 8 cage-free (CF) systems.

| Parameter                     | CC<br>(n=6) |       |       | EC<br>(n=10) |       |       | CF<br>(n=8) |       |       |
|-------------------------------|-------------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
|                               | Min         | Mean  | Max   | Min          | Mean  | Max   | Min         | Mean  | Max   |
| Outdoor temperature (°C)      | -14.80      | -5.62 | 7.70  | -12.00       | -3.29 | 4.47  | -6.24       | -0.57 | 5.80  |
| Indoor temperature (°C)       | 17.14       | 20.97 | 23.09 | 20.09        | 22.45 | 25.85 | 18.54       | 21.76 | 24.21 |
| Indoor relative humidity (%)  | 0.49        | 0.56  | 0.62  | 0.42         | 0.57  | 0.66  | 0.52        | 0.60  | 0.71  |
| Outdoor relative humidity (%) | 0.32        | 0.48  | 0.58  | 0.37         | 0.53  | 0.72  | 0.34        | 0.50  | 0.74  |
| Age of hens (weeks)           | 46.00       | 58.83 | 68.00 | 45.00        | 55.00 | 65.00 | 43.00       | 56.13 | 69.00 |
| Hen population                | 16510       | 27597 | 44028 | 9000         | 26320 | 92000 | 12935       | 19908 | 33417 |

### 1.2.6. Indoor and outdoor concentrations

No significant statistical differences in GHG mean concentrations ( $p > 0.05$ ) were observed between housing systems. The CO<sub>2</sub> levels were  $3166 \pm 721$  ppm<sub>v</sub> for the CC system,  $2361 \pm 1217$  ppm<sub>v</sub> for the EC system, and  $2488 \pm 1114$  ppm<sub>v</sub> for the CF system. The CH<sub>4</sub> concentrations were  $4.70 \pm 0.91$  ppm<sub>v</sub> for the CC system,  $3.84 \pm 1.51$  ppm<sub>v</sub> for the EC system, and  $4.43 \pm 1.30$  ppm<sub>v</sub> for the CF system. The N<sub>2</sub>O levels were  $0.25 \pm 0.06$  ppm<sub>v</sub> for the CC system,  $0.20 \pm 0.03$  ppm<sub>v</sub> for the EC system, and  $0.21 \pm 0.03$  ppm<sub>v</sub> for the CF system. No significant differences ( $p > 0.05$ ) were observed between the housing systems for NH<sub>3</sub> mean concentration (Figure 9). However, values were numerically higher

for the CF system ( $15.1 \pm 17.0$  ppm<sub>v</sub>) compared to the CC ( $6.66 \pm 2.32$  ppm<sub>v</sub>) and EC ( $5.36 \pm 5.01$  ppm<sub>v</sub>) systems.

**Table 5b.** Animal characteristics and environmental conditions of selected egg production systems in warm season: 4 enriched cages (ECs) and 2 cage-free (CF) systems.

| Parameter                     | EC<br>(n=4) |       |       | CF<br>(n=2) |       |       |
|-------------------------------|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
|                               | Min         | Mean  | Max   | Min         | Mean  | Max   |
| Outdoor temperature (°C)      | 25.60       | 27.64 | 30.01 | 25.00       | 26.00 | 27.00 |
| Indoor temperature (°C)       | 23.46       | 25.92 | 26.90 | 25.46       | 25.66 | 25.85 |
| Indoor relative humidity (%)  | 0.51        | 0.56  | 0.63  | 0.59        | 0.63  | 0.66  |
| Outdoor relative humidity (%) | 0.38        | 0.50  | 0.56  | 0.49        | 0.51  | 0.53  |
| Age of hens (weeks)           | 37.00       | 58.25 | 73.00 | 45.00       | 50.00 | 55.00 |
| Hen population                | 9221        | 18959 | 33600 | 15000       | 15500 | 16000 |

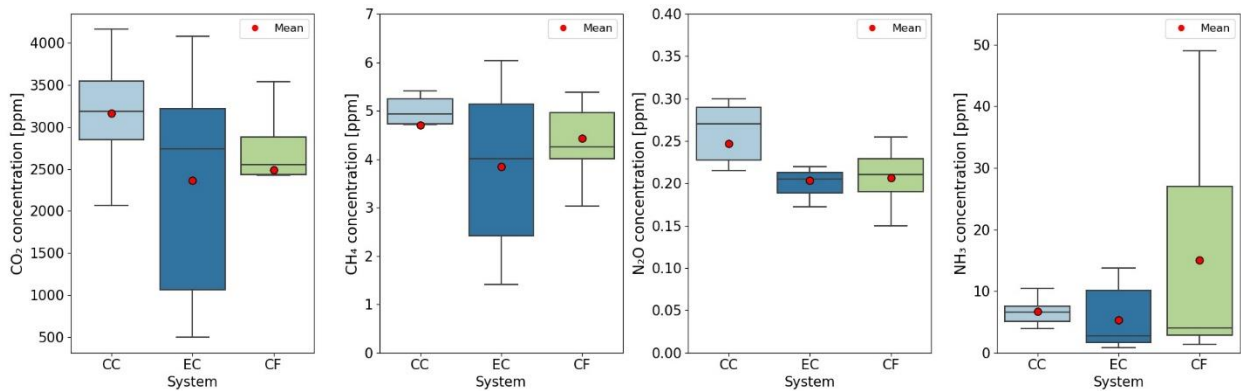


**Figure 9.** Indoor concentrations of GHG and NH<sub>3</sub> across different systems: conventional cages (CC), enriched colonies (EC), and cage-free (CF). Each boxplot represents the distribution of concentrations for the gas, with the central line in the box indicating the median concentration. The lower and upper limits of the box represent the 25th and 75th percentiles (interquartile range, IQR), respectively. The whiskers extend to the 1.5 interquartile range. The red dots indicate the average concentrations for each system.

The results of the variance analysis revealed no significant differences among housing systems for outdoor mean concentrations of CO<sub>2</sub> ( $p = 0.30$ ), CH<sub>4</sub> ( $p = 0.14$ ), N<sub>2</sub>O ( $p = 0.17$ ), and NH<sub>3</sub> ( $p = 0.30$ ) (Figure 10 and Figure 9). For the three systems, the outdoor average CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentrations were for CC ( $484 \pm 128$  ppm<sub>v</sub> and  $1.90 \pm 0.32$  ppm<sub>v</sub>), EC ( $429 \pm 39.4$  ppm<sub>v</sub> and  $2.01 \pm 0.40$  ppm<sub>v</sub>), and CF ( $467 \pm 81.9$  ppm<sub>v</sub> and  $2.24 \pm 0.31$  ppm<sub>v</sub>). For N<sub>2</sub>O, the CC system had the highest average concentration ( $0.28 \pm 0.05$  ppm<sub>v</sub>), followed by the EC ( $0.23 \pm 0.03$  ppm<sub>v</sub>) and CF ( $0.21 \pm 0.05$  ppm<sub>v</sub>)

systems. For  $\text{NH}_3$ , the CC system had the highest average concentration ( $1.54 \pm 2.40 \text{ ppm}_v$ ), followed by the CF ( $1.02 \pm 0.90 \text{ ppm}_v$ ) and EC ( $0.65 \pm 0.30 \text{ ppm}_v$ ) systems.

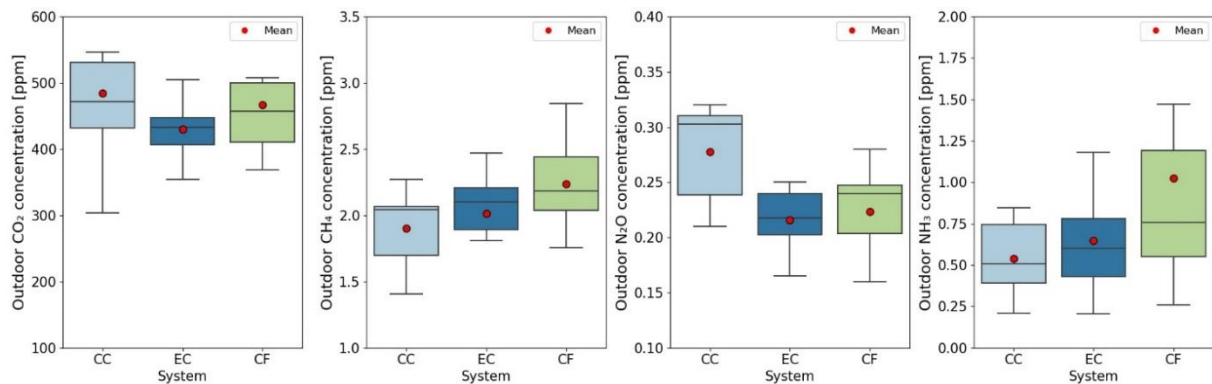


**Figure 10.** Outdoor concentrations of GHG and  $\text{NH}_3$  gases across different systems: conventional cages (CC), enriched colonies (EC), and cage-free system (CF). Each boxplot represents the distribution of concentrations for the gas, with the central line in the box indicating the median concentration. The lower and upper limits of the box represent the 25th and 75th percentiles (interquartile range, IQR), respectively. The whiskers extend to the 1.5 interquartile range. The red dots indicate the average concentrations for each system.

### 1.2.7. Greenhouse gas and ammonia emissions

The statistical analysis revealed no significant differences ( $p > 0.05$ ) in  $\text{CO}_2$  mean emissions among the three systems (Figure 11). However, the CF system exhibited the highest average ( $3207 \pm 2423 \text{ mg hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ), followed by CC ( $2835 \pm 877 \text{ mg hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) and EC ( $2597 \pm 949 \text{ mg hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) systems. Similarly, no significant differences ( $p > 0.05$ ) were observed in  $\text{CH}_4$  mean emissions among the CC, EC, and CF systems, indicating uniformity in methane production (Figure 11). The EC system had the lowest average  $\text{CH}_4$  emissions ( $0.93 \pm 0.51 \text{ mg hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ), while CC ( $1.07 \pm 0.40 \text{ mg hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) and CF ( $1.27 \pm 1.11 \text{ mg hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) showed higher values. The statistical analysis revealed no significant differences ( $p > 0.05$ ) in  $\text{N}_2\text{O}$  mean emissions among the CC ( $0.04 \pm 0.05 \text{ mg hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ), EC ( $0.05 \pm 0.05 \text{ mg hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ), and CF ( $0.05 \pm 0.07 \text{ mg hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) systems (Figure 11).

Regarding  $\text{NH}_3$  emissions, there is a significant difference ( $p = 0.04$ ) among the mean emissions of the CC and EC systems when compared to the CF system (Figure 11). The CF system showed considerably more emissions on average ( $11.2 \pm 15.9 \text{ mg hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) than the CC ( $1.98 \pm 1.00 \text{ mg hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) and EC ( $2.46 \pm 2.00 \text{ mg hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) systems.

### 1.2.8. Emissions by type of manure management

Table 6 presents the emissions of GHGs and  $\text{NH}_3$  from the four types of manure management systems.

The manure conveyor and scraper system emitted higher CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and NH<sub>3</sub> than alternatives like the manure belt drying system and pit storage. However, N<sub>2</sub>O emissions are relatively consistent across all systems, with slightly lower emissions observed in the manure belt drying and conveyor systems.

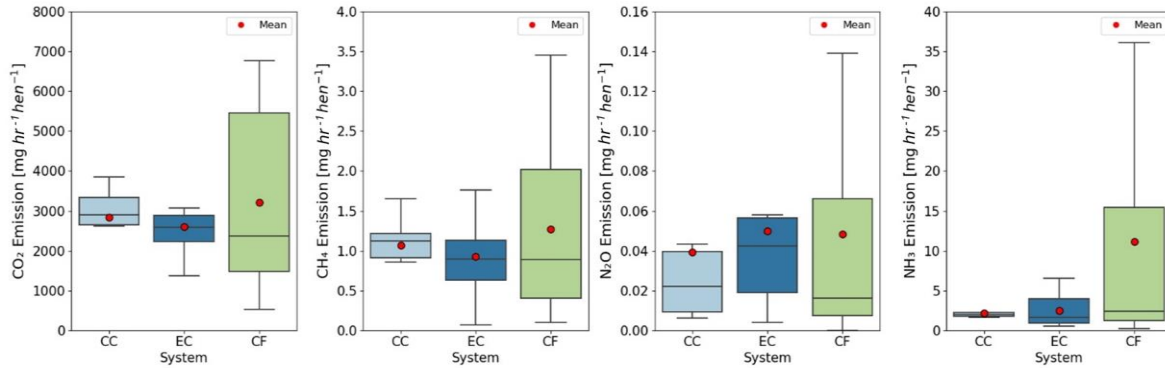


**Figure 11.** Greenhouse gases and NH<sub>3</sub> barn emissions across different systems: conventional cages (CC), enriched colonies (EC), and cage-free (CF). Each boxplot represents the distribution of concentrations for the gas, with the central line in the box indicating the median concentration. The lower and upper limits of the box represent the 25th and 75th percentiles (interquartile range, IQR), respectively. The whiskers extend to the 1.5 interquartile range, showing the range of the data. The red dots indicate the average concentrations for each system.

**Table 6.** Emission rates of GHGs and NH<sub>3</sub> from different types of manure management systems

| Type of manure management          | n  | CO <sub>2</sub><br>mg hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> | CH <sub>4</sub><br>mg hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> | N <sub>2</sub> O<br>mg hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> | NH <sub>3</sub><br>mg hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> |
|------------------------------------|----|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Manure belt drying system          | 21 | 2562                                                     | 0.97                                                     | 0.04                                                      | 2.32                                                     |
| Manure conveyor and scraper system | 4  | 5545                                                     | 2.29                                                     | 0.05                                                      | 24.7                                                     |
| Manure drying on bedded floors     | 2  | 971                                                      | 0.22                                                     | 0.10                                                      | 1.46                                                     |
| Pit storage                        | 3  | 2498                                                     | 0.68                                                     | 0.06                                                      | 2.46                                                     |

### 1.2.9. Correlation Analysis

#### *Indoor and outdoor gas concentration*

Figure 12 presents the results of the Spearman correlation analysis between indoor and outdoor GHG and NH<sub>3</sub> concentrations. The results reveal significant correlations between CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentrations inside the housing systems ( $r = 0.83$ ,  $P < 0.05$ ), as well as between indoor and outdoor N<sub>2</sub>O concentrations ( $r = 0.84$ ,  $P < 0.05$ ). Other correlations are weak ( $r < 0.65$ ).

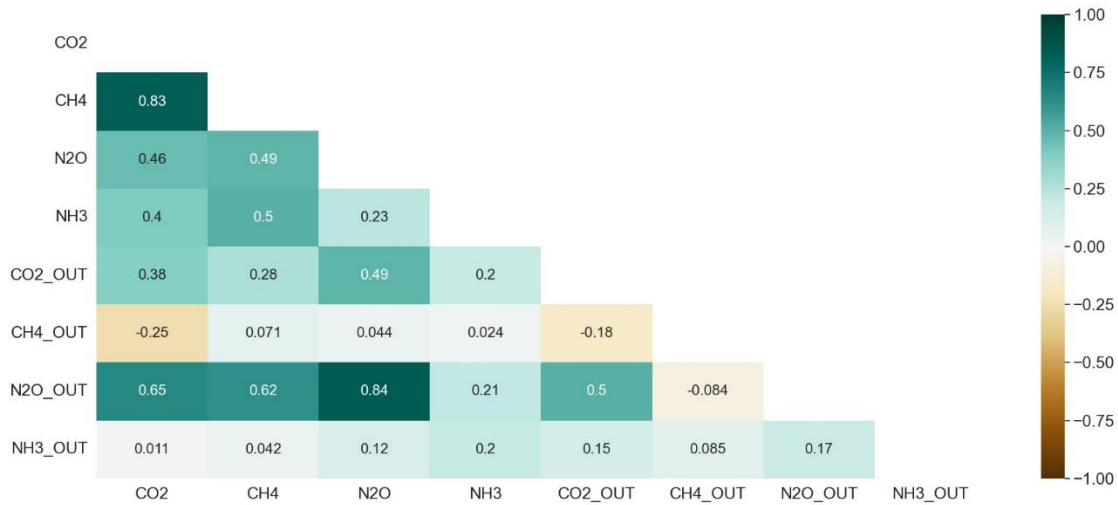


**Figure 12.** The correlation matrix for the interaction between GHG and NH<sub>3</sub> gases considers indoor and outdoor gas concentrations.

#### *Concentrations, Emissions, and Key Variables*

Table 7 and

Table 8 present the correlation coefficient matrices generated using the Spearman method for the cold and warm seasons, respectively. They illustrate the relationships between the six environmental variables (number of hens, outdoor and indoor temperature, relative humidity, and ventilation rate), gas concentrations, and emissions ( $p < 0.05$ ). Additionally, the correlations between ventilation rates and emissions are illustrated in Figure 13, as the former are important for calculating emissions. In the cold season, positive and moderate to strong correlations were observed between all four gas emissions (Spearman's  $r$  from 0.51 to 0.82). In the warm season, positive correlations between CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O emissions persisted ( $r$  from 0.54 to 0.83), but the correlation with NH<sub>3</sub> was weaker ( $r = 0.49$ ).

**Table 7.** Correlation Spearman coefficient matrix for the cold season of the six variables with gas concentrations and emissions.

| Variables                 | Concentrations  |                 |                  |                 | Emissions       |                 |                  |                 |
|---------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
|                           | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O | NH <sub>3</sub> | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O | NH <sub>3</sub> |
| Number of hens            | 0.21            | 0.37            | 0.21             | 0.17            | 0.17            | 0.26            | 0.05             | 0.27            |
| Outdoor temperature       | -0.64           | 0.04            | -0.57            | -0.46           | 0.01            | -0.15           | -0.13            | 0.16            |
| Indoor temperature        | 0.05            | -0.02           | -0.05            | -0.07           | -0.14           | -0.17           | -0.46            | -0.15           |
| Indoor relative humidity  | 0.30            | 0.52            | 0.47             | 0.26            | 0.32            | 0.48            | -0.33            | 0.40            |
| Outdoor relative humidity | -0.55           | -0.02           | -0.38            | -0.34           | -0.20           | -0.11           | -0.11            | 0.03            |
| Ventilation rate          | -0.27           | 0.11            | -0.01            | -0.30           | 0.82            | 0.71            | 0.51             | 0.51            |

**Table 8.** Correlation Spearman coefficient matrix for the warm season of the six variables with gas concentrations and emissions.

| Variables                 | Concentrations  |                 |                  |                 | Emissions       |                 |                  |                 |
|---------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
|                           | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O | NH <sub>3</sub> | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O | NH <sub>3</sub> |
| Number of hens            | 0.09            | 0.03            | 0.43             | 0.20            | -0.54           | 0.26            | -0.37            | -0.26           |
| Outdoor temperature       | -0.83           | 0.09            | 0.03             | 0.37            | 0.26            | 0.54            | 0.26             | 0.49            |
| Indoor temperature        | -0.09           | -0.49           | -0.77            | -0.09           | 0.77            | 0.54            | 0.37             | -0.09           |
| Indoor relative humidity  | -0.43           | 0.14            | 0.09             | -0.89           | 0.20            | -0.09           | 0.54             | 0.09            |
| Outdoor relative humidity | -0.37           | -0.37           | -0.77            | -0.09           | 0.94            | 0.43            | 0.54             | 0.20            |
| Ventilation rate          | -0.83           | -0.03           | -0.54            | -0.26           | 0.83            | 0.54            | 0.83             | 0.49            |

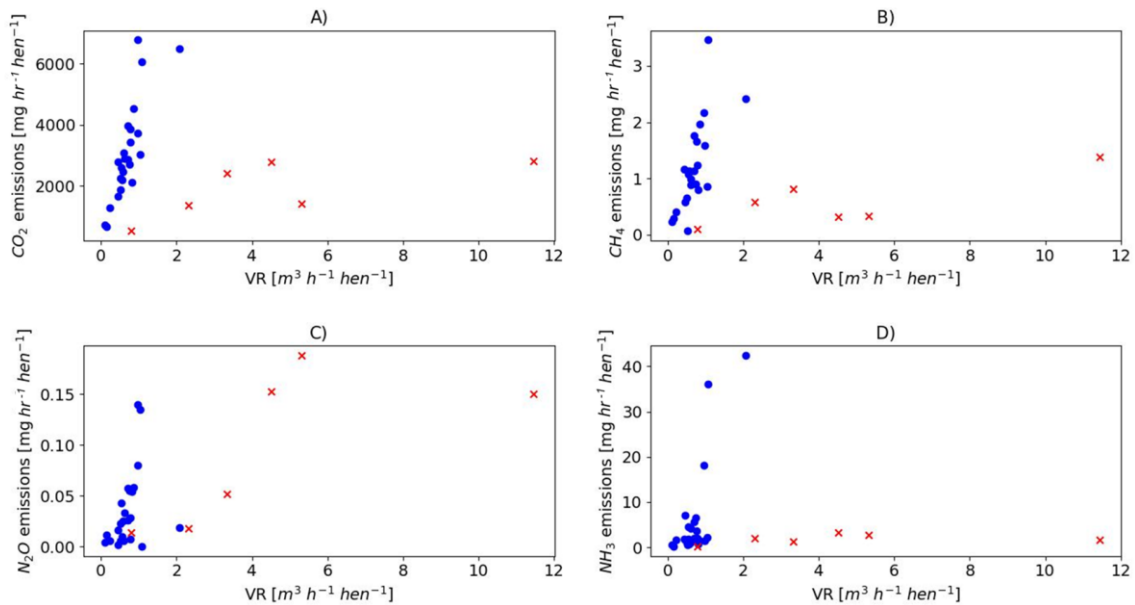


**Figure 13.** Relationships between ventilation rates and recorded emissions of CO<sub>2</sub> (A), CH<sub>4</sub> (B), N<sub>2</sub>O (C), and NH<sub>3</sub> (D) under cold (●) and warm (×) seasons.

### 1.2.10. Emissions variability analysis

This study delved into the emissions associated with various egg production systems across a representative sample of 30 farms in Québec, Canada. The hypothesis was that there would be substantial variations in emissions among these systems, reflecting potential differences in their environmental impact due to the differences in the space and layout of each housing system.

### *Greenhouse gases*

Although there is no significant difference, the cage-free systems (from 6 farms) had the highest CO<sub>2</sub> emissions. This could be attributable to the lower stocking densities, which increased bird activities such as flying, running, and dust bathing (Mollenhorst et al., 2005). Animal activity levels influence metabolic rates, with a higher metabolic rate resulting in increased CO<sub>2</sub> due to respiration (Pedersen et al., 2008). Additionally, CO<sub>2</sub> could also originate from the decomposition of manure in the litter on the floor of the CF systems (Ning et al., 2008; Hayes et al., 2013). There is notable variation in CO<sub>2</sub> emissions across the different systems. The barns with the conveyor and scraper system exhibit the highest CO<sub>2</sub> emissions, followed by the manure belt drying system. Conversely, manure drying on bedded floors had considerably lower CO<sub>2</sub> emissions, suggesting lower energy activity than the other systems. When manure is left to rest in bedding (as in CF systems), especially in a warm and moist environment conducive to microbial activity, decomposition occurs rapidly (Groot et al., 1996). As microorganisms decompose the organic matter, they consume oxygen and produce CO<sub>2</sub> as part of their respiratory process. The results presented here are comparable with CO<sub>2</sub> emissions reported in the existing literature (Shepherd et al., 2015). This latter study indicated that CO<sub>2</sub> emissions for CC were 2846 mg hen<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup> but lower than EC (3100 mg hen<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>) and CF (3083 mg hen<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>). In addition, a negative correlation was observed between ambient temperature and CO<sub>2</sub> concentration. This could be attributed to higher ventilation rates at the farms on warm days, as CO<sub>2</sub> concentration decreases with increased outdoor temperature. This is in line with the findings of (Paura et al., 2022a), who also found a negative non-linear correlation between CO<sub>2</sub> concentration and outdoor temperature in assessing CO<sub>2</sub> levels in a commercial laying hen farm. The ventilation rate exhibits a positive correlation with CO<sub>2</sub> emissions in both seasons, indicating that higher rates effectively remove indoor air pollutants. Adequate ventilation removes gases emitted by hens and their manure from the indoor environment (Snell et al., 2003; Liu et al., 2016; Park et al., 2018). Nevertheless, relative humidity positively correlated with CO<sub>2</sub> emissions during the warm season. This may be because relative humidity affects the air's capacity to retain certain gases, including CO<sub>2</sub> (Kim et al., 2020). Conversely, lower outside temperatures during the cold season inhibit microbial activity, reducing the impact of relative humidity on CO<sub>2</sub> emissions (Groot et al., 1996).

Laying hens produce negligible CH<sub>4</sub> emissions via enteric fermentation. Thus, CH<sub>4</sub> emissions in egg production systems primarily result from anaerobic microbial decomposition of organic matter in stored manure. Therefore, CH<sub>4</sub> emissions occur due to the absence of oxygen in stored manure. In this study, the housing systems did not have a substantial impact on CH<sub>4</sub>, as no statistically significant differences were observed. The CC system exhibited higher CH<sub>4</sub> concentrations, but the CF system

showed the highest emissions because of the ventilation rate (VR). The high correlation between VR and CH<sub>4</sub> emissions could corroborate this. On the other hand, the higher emission rate in the CF system may be due to the space configuration, since this system allows hens to roam freely within the building (Mollenhorst et al., 2005). The increased floor space and litter availability in CF systems may lead to more dispersed manure deposition and increased animal activity (including scratching and foraging behavior), which can result in greater aeration of the litter. This enhanced oxygen exposure may reduce the extent of anaerobic conditions in the manure, thereby limiting CH<sub>4</sub> emissions, which are primarily generated under anaerobic circumstances (Fournel et al., 2012; Nannoni et al., 2022). However, Shepherd et al. (2015) reported higher CH<sub>4</sub> emissions across all three systems, ranging from 2.92 to 3.33 mg hen<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>. One potential contributing factor to this difference could be the variation in average temperature between the two studies. In our study, the average temperature was lower ( ) than that reported by Shepherd et al. (2015). Lower temperatures can inhibit microbial metabolism and reduce the rate of organic matter decomposition, potentially leading to lower CH<sub>4</sub> production (Cheng et al., 2022). This is supported by the positive correlation found between temperature and CH<sub>4</sub> emissions during the warm season.

No statistically significant differences were noticed for indoor or outdoor N<sub>2</sub>O concentrations and emissions. Most of the literature found that the levels of N<sub>2</sub>O were lower than the detection levels (Fabbri et al., 2007; Shepherd et al., 2015; Naylor et al., 2016). However, correlations with other variables were identified. A negative correlation was found between indoor temperature and concentration, while a negative correlation was observed between VR and emissions. For instance, as Fournel et al. (2012) mentioned, higher temperatures can accelerate the decomposition rate of organic compounds while reducing the stability of nitrogenous substrates. This could lead to a decrease in N<sub>2</sub>O production, as these processes may limit the availability of precursors of N<sub>2</sub>O generation. Additionally, dietary factors, such as protein intake, can influence the production of N<sub>2</sub>O in indoor environments. Diets rich in protein can contribute to increased nitrogenous substrates (Kim, 2015), potentially leading to higher N<sub>2</sub>O emissions. Furthermore, for both seasons, the VR demonstrates a positive correlation with N<sub>2</sub>O emissions, suggesting that increased rates efficiently flush indoor air pollutants. Sufficient ventilation flushes out gases emitted by poultry and their waste from the indoor atmosphere (Snell et al., 2003; Liu et al., 2016; Park et al., 2018).

### *Ammonia*

The CF housing system exhibited the highest NH<sub>3</sub> concentration, with overall twice as much as the CC and EC concentrations (15.1 ppm<sub>v</sub> vs 6.66 ppm<sub>v</sub> and 5.36 ppm<sub>v</sub>, respectively). Three farms exhibited NH<sub>3</sub> concentrations exceeding the permitted health levels of 25 ppm<sub>v</sub> (Gouvernement du

Québec, 2023b). The VR in the CF rooms was  $1.31 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$ , higher than the  $0.64 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$  observed in the CC system (measured only during the cold season), but lower than the  $1.98 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$  in the EC system. Notably, the average VR for the CF system was 66.3% lower than that of the EC system. This lower ventilation rate likely contributed to the higher  $\text{NH}_3$  concentrations observed in the CF system. In larger buildings, such as those found on the three farms with  $\text{NH}_3$  concentrations exceeding 25 ppm, lower VRs may prevent contaminants from flowing and accumulating, particularly when the airflow cannot adequately dilute and expel them. However, these lower rates are likely due to temperature-controlled ventilation systems, which reduce airflow to conserve heat in low-density environments. While effective for maintaining temperature, these systems may unintentionally exacerbate air quality issues by limiting the removal of contaminants such as  $\text{NH}_3$ . High concentrations of ammonia are counterproductive to hens and humans. They can harm sensitive tissues, such as hens' eyes (Miles et al., 2006), irritate the respiratory tract of the birds (Liu et al., 2020) and humans (Soltanzadeh et al., 2023), and lead to decreased growth rates and reduced egg production (Li et al., 2020).

Similarly,  $\text{NH}_3$  emissions were statistically higher in the CF system than in the CC and EC systems. Ammonia production in bedding primarily stems from protein deamination, which results from microbial decomposition of nitrogenous compounds found in feces and urine (Mohiuddin & Khattar, 2024). Specifically, bacteria decompose urea and other nitrogen-containing compounds in excreta, releasing  $\text{NH}_3$  (Romillac, 2019). This process is closely linked to the protein intake of the birds, as higher protein diets result in increased nitrogen excretion and subsequent  $\text{NH}_3$  production in the bedding material (Mohiuddin & Khattar, 2024). Therefore, the significant difference in  $\text{NH}_3$  emissions among the systems can be attributed to several factors. The increased space and floor litter of the CF system may promote higher microbial activity and  $\text{NH}_3$  production. More litter provides a larger substrate for microbial decomposition, leading to elevated  $\text{NH}_3$  emissions (Swelum et al., 2021b). The carbon provided by litter can stimulate microbial growth and lead to greater nitrogen assimilation into microbial biomass (i.e., microbial protein), potentially reducing the fraction of nitrogen that volatilizes as ammonia (Mote & Griffis, 1980). Likewise, in the CF system, where hens have more freedom of movement and access to litter, moisture levels may be higher (due to stocking density, season, humidity, ventilation, kind and management of drinkers, and consistency and amount of fecal material), creating favorable conditions for microbial activity and  $\text{NH}_3$  production (Fabbri et al., 2007; Ni et al., 2017; Shepherd et al., 2015).

Ammonia emissions exhibit considerable variation among manure management systems. The barns with the manure drying on bedded floors exhibit the highest  $\text{NH}_3$  emissions, likely due to increased

exposure of manure to the atmosphere during drying processes. Differences in manure management practices between the systems can affect the moisture content of the litter and removal frequency. The accumulation of manure in confined spaces, coupled with the constant movement of hens, accelerates the decomposition process, releasing more  $\text{NH}_3$  into the air (Fournel et al., 2012). In addition, farms employing conveyORIZED manure drying systems experience a broad range of relative humidity levels, potentially impacting  $\text{NH}_3$  concentrations, as fluctuations in relative humidity can significantly affect the rate of  $\text{NH}_3$  release from the manure (Huijsmans et al., 2001). Shepherd et al. (2015) found similar results. They reported higher  $\text{NH}_3$  emission rates in the CF system compared to CC and EC systems. However, it is noteworthy that the magnitude of CF emissions in their study was lower ( $4.7 \text{ mg hen}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ ) than observed in our study. Differences in environmental conditions, particularly temperature, humidity, VR, and geographical location, could significantly contribute to the observed variations in  $\text{NH}_3$  emission magnitudes between the studies.

### **1.3. Importance de la mesure du débit de ventilation**

Dans les systèmes de logement alternatifs, les poules disposent de surfaces plus importantes, ce qui favorise une plus grande liberté de mouvement. Comme observé dans notre étude sur des fermes commerciales (section 1.2), les émissions étaient plus élevées dans les systèmes en volière que dans les autres systèmes. Ce résultat est cohérent avec Godbout et al. (2017), qui ont montré qu'une activité animale accrue peut augmenter les émissions, à la fois par un métabolisme plus intense et par un encrassement plus important des surfaces.

L'analyse des émissions dans les fermes commerciales a également révélé que les relations entre les conditions environnementales, les concentrations de gaz et les émissions sont fortement influencées par la ventilation. Tant en saison froide qu'en saison chaude, des corrélations positives ont été observées entre les émissions de  $\text{CO}_2$ , de  $\text{CH}_4$  et de  $\text{N}_2\text{O}$ , tandis que l'association avec  $\text{NH}_3$  était plus faible, en particulier durant la saison chaude. Ces résultats indiquent que les émissions ne se produisent pas de manière isolée, mais sont interconnectées par des facteurs environnementaux communs.

Une relation positive a été trouvée entre le débit de ventilation et les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$ , suggérant qu'un flux d'air plus important facilite l'évacuation des gaz de l'environnement du bâtiment. Cela correspond aux observations d'études antérieures montrant qu'une ventilation suffisante est essentielle pour éliminer les polluants émis par les volailles et le lisier (Snell et al., 2003 ; Liu et al., 2016 ; Park et al., 2018). Parallèlement, les variations de température intérieure étaient corrélées négativement avec les concentrations, illustrant les interactions complexes entre les conditions de

logement, les processus microbiens et la dynamique des gaz. Des facteurs nutritionnels, comme les régimes riches en protéines, peuvent également intensifier les émissions gazeuses en augmentant la disponibilité des substrats azotés (Kim, 2015).

Les émissions dépendent principalement de deux paramètres : la concentration en gaz et le TV. De petites erreurs dans l'estimation du flux d'air peuvent entraîner d'importantes erreurs dans le calcul des émissions. L'incertitude sur le TV peut atteindre  $\pm 5$  à 15 % dans les systèmes à ventilation mécanique (Calvet et al., 2013). En comparaison, l'incertitude sur la concentration en gaz, lorsque des capteurs bien calibrés sont utilisés, est généralement inférieure à 5 % (Calvet et al., 2013).

Cela souligne l'importance centrale de mesurer ou d'estimer le VR avec précision. Alors que les concentrations en gaz peuvent être suivies avec une précision relativement élevée, la ventilation constitue la principale source d'incertitude dans le calcul des émissions. Sans informations fiables sur le VR, les facteurs d'émission peuvent être mal interprétés, compromettant potentiellement à la fois les résultats de recherche et le développement de stratégies de réduction. Ainsi, toute démarche visant à mieux comprendre les émissions de GES et de  $\text{NH}_3$  dans les systèmes de logement des poules pondeuses doit placer la ventilation au cœur du cadre méthodologique.

## **Chapitre 2. Assessing ventilation rate using indirect measurement methods in experimental bench-scale houses for laying hens**

### **Évaluation du taux de ventilation à l'aide de méthodes de mesure indirectes dans des bâtiments expérimentaux pour poules pondeuses**

#### **2.1. Résumé**

Le taux de ventilation (TV) est un paramètre clé pour l'estimation des émissions, mais la mesure directe est exigeante en ressources matérielles et humaines. La présente étude évalue la précision des méthodes indirectes, en particulier les bilans de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de chaleur, pour estimer le TV dans des bâtiments de poules pondeuses. Les données issues d'expériences réalisées avec 720 poules pondeuses sur une période de huit (8) semaines ont été analysées pour évaluer les variations du TV. Les résultats ont montré que les changements saisonniers (température et humidité relative) influencent le TV. Les modèles basés sur les bilans de  $\text{CO}_2$  et de chaleur permettent d'estimer le TV, mais ils ont montré une faible corrélation avec les mesures directes. Le modèle de bilan de  $\text{CO}_2$  a présenté un  $R^2$  de 0,28, tandis que le bilan thermique a donné un  $R^2$  de 0,07, avec des valeurs de RMSE de  $1,46 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ poule}^{-1}$  et  $1,01 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ poule}^{-1}$  respectivement. Les moyennes horaires et journalières ont amélioré les performances des méthodes indirectes. Pour les données regroupées par heure, le  $R^2$  pour le bilan thermique est passé à 0,46, accompagné d'une diminution des valeurs de RMSE (de  $1,01 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ poule}^{-1}$  à  $0,14 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ poule}^{-1}$ ). Les données regroupées par jour ont amélioré les corrélations, avec un  $R^2$  de 0,85 pour le bilan de  $\text{CO}_2$  et 0,55 pour le bilan thermique. Simultanément, les valeurs de RMSE ont fortement diminué ( $0,22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ poule}^{-1}$  pour le bilan de  $\text{CO}_2$  et  $0,36 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ poule}^{-1}$  pour le bilan thermique). Une analyse de régression multiple a montré que la méthode du bilan de  $\text{CO}_2$  pourrait expliquer environ 82 % de la variabilité du VR, tandis que la méthode du bilan thermique n'expliquait que 13 %. Cette étude soutient le modèle de bilan de  $\text{CO}_2$  pour des estimations précises du TV dans les installations de poules pondeuses. Améliorer la précision de l'estimation du TV reste une priorité. Cette étude contribue à une meilleure compréhension des défis et des opportunités dans l'évaluation du TV.

**Mots-clés :** Production d'œufs, débit d'air, bilan de  $\text{CO}_2$ , bilan thermique, ventilation mécanique

## 2.2. Abstract

The ventilation rate (VR) is a key parameter for estimating emissions, but direct measurement is resource intensive. The present study evaluates the accuracy of indirect methods, specifically the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and heat balances, in estimating the VR of laying hen houses. Data from experiments with 720 laying hens over 8 weeks were analyzed to assess VR variations. The results showed that seasonal changes (temperature and relative humidity) affect VR. Models based on CO<sub>2</sub> and heat balances could estimate VR. However, they showed weak correlations with direct measurements. The CO<sub>2</sub> balance method showed an R<sup>2</sup> of 0.28, while the heat balance method gave an R<sup>2</sup> of 0.07, with RMSE values of 1.46 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup> and 1.01 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>, respectively. Hourly and daily averages improved the performance of indirect methods. In hourly grouped data, the R<sup>2</sup> for heat balance increased to 0.46, accompanied by decreased RMSE values (from 1.01 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup> to 0.14 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>). The daily grouped data improved correlation coefficients, with R<sup>2</sup> values of 0.85 for the CO<sub>2</sub> balance and 0.55 for the heat balance, respectively. At the same time, RMSE values dropped significantly (0.22 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup> for the CO<sub>2</sub> balance and 0.36 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup> for the heat balance). Multiple regression analysis revealed that the CO<sub>2</sub> balance method accounted for approximately 82% of VR variability, whereas the heat balance method explained only 13%. This study supports the CO<sub>2</sub> balance model for precise VR estimations in laying hen facilities. Improving the accuracy of VR estimation remains a priority. This study contributes to a better understanding of challenges and opportunities in assessing VR.

**Keywords:** Egg production, airflow rate, CO<sub>2</sub> balance, heat balance, mechanical ventilation.

## 2.3. Introduction

Egg production is a fundamental part of the agricultural industry in the province of Québec, Canada. After Ontario, Québec is Canada's second-largest egg producer, supplying over 20% of the country's production (Government du Québec, 2020). Egg consumption by 2050 (FAO, 2022) is expected to increase further, as it is estimated that the global population will reach 9.7 billion by 2050 (FAO, 2022), which will likely drive demand for food (Alexandratos & Bruinsma, 2012). In addition, eggs are one of the most accessible sources of animal protein, offering a relatively affordable option for consumers compared to beef, seafood, and pork (Statistics Canada, 2022). However, this demand will also be associated with an increase in the number of birds per housing area on the farms. This could generate a significant environmental challenge (Ranganathan et al., 2018), as gaseous emissions, particularly ammonia (NH<sub>3</sub>) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) (Ranganathan et al., 2018), can have a significant impact on air quality, reducing animal welfare and working conditions in housing systems

(Ni et al., 2017). Moreover, climate change conditions could produce heat stress episodes (Bist et al., 2023; David et al., 2015; Kang et al., 2016), which have put the ventilation systems of laying hen facilities into the spotlight. An adequate ventilation rate (VR) is crucial for the welfare and productivity of laying hens, playing a critical role in regulating and managing gaseous emissions (Rosa et al., 2019).

Assessing emissions involves calculating the VR and measuring the difference in gas concentrations between the building's air exhaust and inlet. Therefore, the accuracy in measuring VR is crucial for maintaining effective gas concentration monitoring (Chai et al., 2012b; Rosa et al., 2019), quantifying the level of gas release and estimating its impact on emissions. This knowledge can enable producers and regulators to improve environmental quality by developing strategies for mitigating gaseous emissions, propelling the industry towards sustainable practices (Calvet et al., 2013; R. Gates et al., 2009).

Ventilation rate can be determined by direct and indirect methods (Liu et al., 2016; Wang et al., 2016; Barreto-Mendes et al., 2014; Xin et al., 2009). The direct method is one of the most common methods for determining VR. This approach uses equipment, such as anemometers, to measure the barn's air inlet and outlet speed. Then, VR is calculated by multiplying the airspeed by the cross-sectional area of the fans. This method provides accurate data. Nevertheless, it presents considerable challenges (Ogink et al., 2013b): calibration of anemometers (Park et al., 2018; Z. Zhou et al., 2017a), facility size, fan distribution, and obstacles across the building that can block the air flow and reduce its speed (Calvet et al., 2013; R. Gates et al., 2009) resources, such as time-consuming and labor-intensive data collection and analysis, make it challenging to measure continuously. The estimation of VR by indirect methods based on balance equations is meant to overcome these challenges by calculating the VRs using specific parameters whose measurements are less complicated and time-consuming than direct measurements.

Some indirect approaches have been widely studied, including tracer gas (Kiwan et al., 2013), moisture balance (Blanes & Pedersen, 2005), CO<sub>2</sub> balance (Rosa et al., 2019) and heat balance (Samer et al., 2011). The VR is determined using a tracer gas (sulfur hexafluoride; SF<sub>6</sub>) in partially enclosed livestock spaces. It is a standard method for measuring emissions from livestock buildings (Phillips et al., 2001). However, the use of SF<sub>6</sub> as a tracer must be done cautiously due to the need for careful distribution to maintain uniform concentration comparable to the estimated gases, given its high density (Hassouna et al., 2015). Moisture balance represents a low-cost and straightforward alternative approach that provides a reasonable estimate of daily or half-day airflow. Nonetheless, this method does not give precise values over short time scales due to the high variability of key

parameters, such as humidity and temperature (Hassouna et al., 2015). These factors can fluctuate rapidly within short time intervals, leading to less accurate estimations of ventilation.

The CO<sub>2</sub> and heat balance approaches offer complementary methods to estimate VR. For example, the CO<sub>2</sub> balance approach assumes that ventilation can explain the relationship between CO<sub>2</sub> production (primarily from the animal's metabolism and, if applicable, from bedding and heating) and the CO<sub>2</sub> gradient between the air inside and outside of the building (Li, Xin, & Liang, 2004; Z. Liu et al., 2016; Rosa et al., 2019). By measuring the indoor and outdoor CO<sub>2</sub> concentrations and knowing the CO<sub>2</sub> production rate of animals, it is possible to calculate the VR required to maintain an acceptable CO<sub>2</sub> concentration. The heat balance approach explains the relationship between heat production (provided by the metabolism of livestock) and temperature gradient or enthalpy (Hassouna et al., 2015). However, each approach has its assumptions and limitations. Additionally, the accuracy of both methods decreases when the assessment is performed over short time intervals, as both animal activity and CO<sub>2</sub> production fluctuate throughout the day. Nevertheless, these methods have advantages, such as being simple to achieve and low cost, and both can be implemented for assessing VR under various setting conditions.

Numerous research studies have explored the assessment of VR in laying hen facilities, employing both direct and indirect methods. Notably, Pedersen et al. (1998), Li et al. (2004), Rosa et al. (2019) demonstrated a positive correlation for VR calculation between the direct and CO<sub>2</sub> balance methods. However, correlation analyses between CO<sub>2</sub> balance and direct methods have not consistently provided accurate VR estimations in egg production facilities. Liu et al. (2016) reported a weak correlation between exhaust and inlet CO<sub>2</sub> concentrations. Meanwhile, the heat balance method, widely used under various farm settings, has shown discrepancies in VR estimations for egg production facilities, as highlighted by studies such as those conducted by Pedersen et al. (1998) and Blanes & Pedersen (2005), indicating the need for corrections in precise calculations. It is important to highlight that the accuracy of indirect methods may depend on the integration time (Chielo et al., 2016). Short integration times might lead to high variability and less accurate estimates due to transient fluctuations in environmental conditions. Conversely, longer integration times can smooth out these fluctuations, providing a more stable and accurate representation of VR. Despite valuable insights from these studies, a consensus on the best approach is currently lacking, and the literature does not offer clear indications of the potential improvements to data collection or equations for assessing VR in diverse settings.

In this context, the present study had three primary objectives: (i) to test the accuracy of indirect methods involving CO<sub>2</sub> and heat balances for evaluating VR in a laying hen bench-scale experimental

setup, (ii) to evaluate how data aggregation can improve the accuracy of VR assessments, and (iii) to identify the variables with the most significant influence on VR calculations.

## **2.4. Materials and methods**

### **2.4.1. Experimental rooms and animal housing**

The data for this study came from the experiments performed by Fournel et al. (2012) at the BABE (*Bilan agroenvironnemental des bâtiments d'élevage*) experimental building of IRDA (*Institut de recherche et de développement en agroenvironnement*) located at the CRSAD (*Centre de recherche en sciences animales de Deschambault*, Quebec, Canada). The building is equipped with twelve individual and identical experimental rooms (1.2 m wide  $\times$  2.4 m long  $\times$  2.4 m high). Each room was airtight, with no air exchange between rooms, but equipped with ventilation, electric heating, and lighting instrumentation. The walls were lined with painted plywood covered with polyethylene on the lower half to protect against slurry. The floor was made of commercial-grade concrete slats. Each room had a manure management system: deep liquid manure pit ( $n = 4$ ), manure belt ( $n = 4$ ), and forced air drying ( $n = 4$ ). For this study, data from all twelve rooms were used.

Two trials with three-hundred sixty (360) white Laying hens of the Lohmann LSL-Lite breed per trials were performed. Hens were reared in conventional cages (485.5-mm wide  $\times$  507-mm deep  $\times$  540-mm high; Farmer Automatic, 2010) stacked in two columns, each having three cages. Each cage included five hens (492 cm<sup>2</sup> hen<sup>-1</sup>). The study was conducted in two consecutive eight-week trials: the first trial was performed from March to May 2010, and the second trial from June to August 2010, specifically during the egg-laying period between 19 and 27 weeks of age. These eight weeks have the highest gas emission rates based on previous research findings by Fournel et al. (2011). A two-week adaptation period was provided at the start of each experimental trial to ensure acclimatization and adaptation of the hens to their new environment.

During the experiments, the birds were fed daily with 100 g bird<sup>-1</sup> of commercial feed for laying hens (35.4 g kg<sup>-1</sup> total nitrogen, 904 g kg<sup>-1</sup> dry matter content, 22% proteins, 6.55% fat, 4.88% acid detergent fiber; 2005-000, Aliments Breton, St-Bernard-de-Beauce, QC, Canada). Fresh water was provided *ad libitum* by a solenoid valve connected to a data logger to ensure automatic control of the water supply. The lighting period was 13 h d<sup>-1</sup>, 13.5 h d<sup>-1</sup>, and 14 h d<sup>-1</sup> for weeks 1-2, 3-4, and 4-8, respectively, in both trials. The luminous intensity within the experimental rooms was maintained at 40 lux to standardize lighting conditions (Light Meter, Lux/FC, 840020C, Sper Scientific Ltd.). A more detailed description of the experimental setup is available in Fournel et al. (2012).

## 2.4.2. Environmental and CO<sub>2</sub> concentrations data collection

### *Ventilation, temperature and relative humidity*

Each room was equipped with a 0.3-m diameter variable-speed exhaust fan (Model VEN812448, Ziehl Fan Série Z, Les Industries et Équipements Laliberté Ltée, Québec, Canada). An electronic controller (model RM-2V2S r-matic, Les Industries et Équipements Laliberté Ltée, Québec, Canada) maintained the desired temperature and minimum airflow conditions. The fans operated continuously to ensure consistent ventilation. The refreshing air for each room was taken from a shared intake system that draws air from a centrally pre-conditioned duct (PCD). The PCD aims at: (i) eliminating the impact of outside air conditions, thus reducing the seasonal effect on the tests, and (ii) ensuring similar conditions at the entrance of the 12 rooms (before the secondary heating element). An air conditioning unit was placed at the entrance of the central duct (Figure 14), activated during hot seasons to cool the inlet air. Similarly, a main heating system was located within the same central duct. In addition, each room was equipped with a secondary heating unit integrated into the ventilation duct to enable precise temperature control for each room (given commercial practices, the room temperature was set at 22.5°C). The temperature and relative humidity of each room were recorded at 15-minute intervals by a probe (model CS500, accuracy  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  at  $20^\circ\text{C}$ ; 15 seconds of delayed response and  $\pm 3\%$  RH, Campbell Scientific Canada, Corp., Edmonton, AB, Canada).

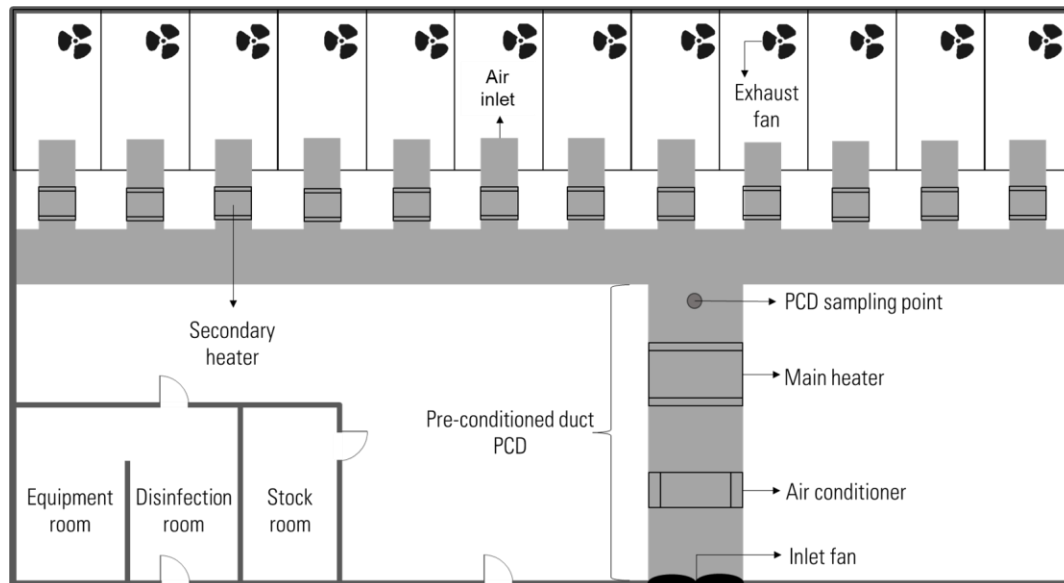


**Figure 14.** Schematic view of the BABE laboratory (adapted from Fournel et al., 2011).

### *CO<sub>2</sub> concentrations*

The air samples from each room were pumped to a mobile laboratory via Teflon tubing. In this mobile laboratory, CO<sub>2</sub> was analyzed by gas chromatography (GC; model 3600, accuracy  $\pm 30$  ppm, Varian, Walnut Creek, CA, USA) with an electron capture detector. Samples from the experimental rooms were drawn through the GC injection loop at 15-min intervals, one room at a time. For each room, it took 3 hours. Gas concentrations were continuously collected throughout the experiment and synchronized with the ventilation flow rate. For equipment calibration, the standard CO<sub>2</sub> gas series was analyzed every three days for one hour. Dust filters were placed at the Teflon™ collection tube entrances to prevent contamination and to protect gas analyzer equipment.

### **2.4.3. Assessment methods**

#### *Orifice damper*

For this study, the orifice damper method was used as the standard reference to compare the accuracy of the CO<sub>2</sub> and heat balance methods. Ventilation rates (VR) were assessed utilizing a 204-mm iris orifice damper (Model 200, with an accuracy of  $\pm 5\%$ , Continental Fan Manufacturing Inc., Buffalo, NY, USA) installed inside the exhaust duct of each room. Pressure differentials were recorded every 15 min, the average of all 10-second measurements. The VR was calculated using the Eq. 7.

#### *Indirect methods*

The VR for the CO<sub>2</sub> method and the heat balance methods were estimated following Equations (8) and (12). The heat loss (GE) was estimated by:

$$GE = \sum_i \frac{1}{R_{eff}} \cdot A(T_{in} - T_{out}) \quad (14)$$

where  $R_{eff}$  ( $m^2 \cdot K/W$ ) is the total effective thermal resistance of each room's component  $i$  (ceiling, wall, and floor),  $T_{in} - T_{out}$  (K) is the temperature difference between the interior and the exterior, and  $A$  ( $m^2$ ) is the surface area occupied by the assembly component. The  $R_{eff}$  was calculated from the Isothermal Planes (Series-Parallel) method as described in the National Building Code of Canada and summarized by RNC (2016). The insulation values used were  $RSI_{roof}$ :  $5.3 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ ,  $RSI_{Fiberglass}$ :  $3.5 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ ,  $RSI_{concrete}$ :  $1.2 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ ,  $RSI_{plywood}$ :  $0.22 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ . These values are consistent with those reported by ANSI and ASABE (2017).

### **2.4.4. Model evaluation and error determination**

Two standard metrics were identified to assess the performance of the two balance methods: Root Mean Squared Error (RMSE) and R-squared ( $R^2$ ) score. The RMSE quantifies the average magnitude

of errors between predicted and actual values, measuring the variability in the model's predictions. The  $R^2$  expresses the percentage of variance in the dependent variable explained by the independent variable. Moore D. S. et al. (2013) proposed that an  $R^2$  value less than 0.3 suggests none or a low effect, 0.3 to 0.5 implies a weak or low effect, 0.5 to 0.7 indicates a moderate effect, and values over 0.7 suggest a strong effect size. These metrics were calculated using Python modules (Pedregosa et al., 2011): *mean\_squared\_error* and *r2\_score* functions from the library Scikit-Learn. These metrics are widely used for these purposes (Kadiyala & Kumar, 2017; Srisa-An, 2021; Lin et al., 2023). Moreover, multiple regressions were conducted to understand how the independent variables used in each model affected the VR.

The determination of the VR propagation of uncertainties by the orifice damper method, the CO<sub>2</sub> balance method, and the heat balance method is given by Equation 15 (ASHRAE, 2005):

$$\frac{\partial VR}{VR} = \sqrt{\left(\frac{\partial VR}{\partial v_1} \varepsilon_1\right)^2 + \left(\frac{\partial VR}{\partial v_2} \varepsilon_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial VR}{\partial v_n} \varepsilon_n\right)^2} \quad (15)$$

where  $v_n$  are the independent variables and  $\varepsilon_n$  are the uncertainties associated with each one.

The mean absolute error (MAE) and mean relative error (MRE) were computed to determine the accuracy in absolute and relative terms of the indirect models. The bias was also assessed to determine whether the methods systematically overestimated or underestimated the VR measurements compared to the orifice damper method.

#### 2.4.5. Sensitivity analysis

The Variogram Analysis of Response Surfaces (VARS; Razavi et al., 2019) toolbox was used to analyze the global sensitivity of both methods. The VARS approach is inspired by variogram analysis techniques, considering the response surface of a model as a spatially distributed dependent variable. Its distinctive feature is that it recognizes a continuous spatial covariance structure in the model response. VARS was used to generate sensitivity indices for the different global analysis methods, enabling comparisons between the methods of Morris (1991), Sobol(1993), and VARS (Razavi & Gupta, 2016).

Two metrics were used. First, a directional variogram plot was created to represent the variability rate (i.e., sensitivity) across various scales in the factor space. As the perturbation scale increases, more distant pairs of points are considered, providing information on how the data variability changes at different spatial distances. Second, the relative importance of the factors plot was used to display the importance or influence of different factors (independent variables) within a model. These metrics

were used to understand which factors significantly impacted the outcome or response variable.

The factors (independent variables) evaluated in the CO<sub>2</sub> balance method were inlet and outlet CO<sub>2</sub> concentrations, hen weight, daily egg production rate, internal temperature, and time of day. The factors evaluated in the heat balance method included outdoor, indoor, and PCD temperatures, relative humidity, hen weight, and daily egg production rate.

## **2.5. Results**

### **2.5.1. Laying hens**

For both trials, hen weight varied from  $1.4 \pm 0.02$  to  $1.6 \pm 0.03$  kg, and egg production ranged from 42.0 to 52.4 g d<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>. There was no difference in water and feed intake between the two trials. Feed consumption was 97.5 and 96.8 g d<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup> for both experiments, while water intake remained at 0.2 L d<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup> for the entire experimental period. The fresh manure production was lower during the first trial (61.9 g d<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>) than during the second experimental part (69.6 g d<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>).

### **2.5.2. Environmental parameters**

The average outdoor temperature in the first trial (12.4°C) was noticeably lower, relative to the second trial (22.3°C) due to the seasonal transition (from March to May for trial one and June to August for trial two). The average room temperature remained relatively constant (22.2°C), indicating the proper functioning of the environmental control equipment. The change in seasonal temperatures only resulted in a slight difference in indoor temperature between trial one at 22.1°C and trial two at 22.4°C. For both experiments, the external relative humidity was similar (58.5% and 57.6%, respectively). Similarly, in the PCD, the average temperatures were 13.6°C and 18.8°C, respectively, and the relative humidities were 55.6% and 62.9%. Figure 15 indicates the temperature and relative humidity variations in both trials.

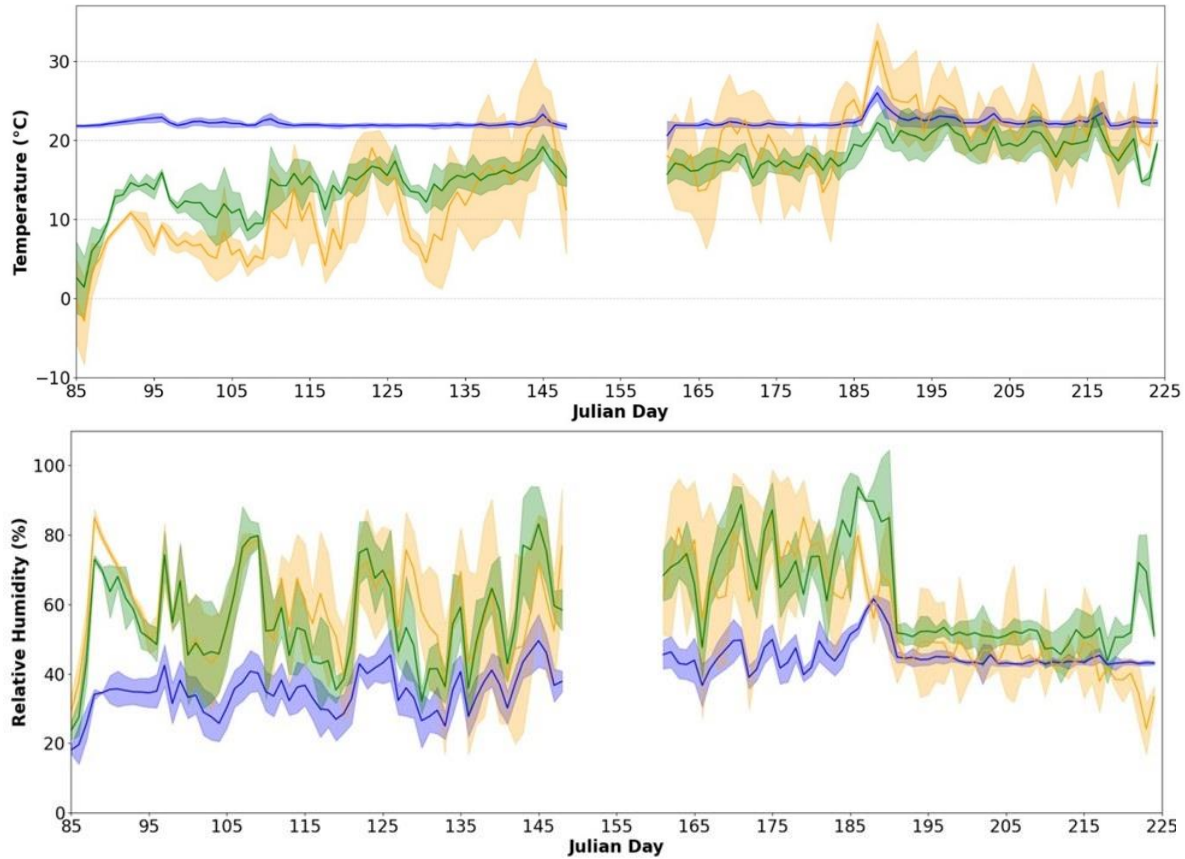


**Figure 15.** Evolution of rooms (blue), PCD (green), and outdoor (yellow) daily mean temperature (upper) and relative humidity (lower) with standard deviations (shadowed) during trial one (85-148 Julian days) and trial two (160-224 Julian days).

### 2.5.3. CO<sub>2</sub> concentrations

For both trials, the CO<sub>2</sub> inlet concentrations ( $598.5 \pm 43.5$  ppm<sub>v</sub> and  $599.8 \pm 79.9$  ppm<sub>v</sub>) were similar ( $p > 0.05$ ). The CO<sub>2</sub> exhaust concentrations were notably higher in the first experiment ( $1118.5 \pm 151.2$  ppm;  $p < 0.001$ ) than in the second experiment ( $1044.2 \pm 137.1$  ppm<sub>v</sub>;  $p < 0.001$ ). The difference between exhaust and inlet CO<sub>2</sub> concentrations was higher than 200 ppm.

### 2.5.4. Ventilation rate

#### *Orifice damper method*

As expected, the seasonal shift impacted the average VR during trial two ( $4.1 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) than in trial one ( $3.5 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ). In the first experiment, the ventilation flow rate ranged from 1.1 to 7.1

$\text{m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ , while it varied from 2.0 to 7.8  $\text{m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$  during the second experiment (Figure 16). Standard deviations of VR values were slightly higher in the second trial (0.88  $\text{m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) than in the first trial (0.82  $\text{m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ). This was related to the temperature variation between day and night during trial two. The propagation of uncertainties  $\frac{\partial VR}{VR}$  for the orifice damper method was 0.5%.

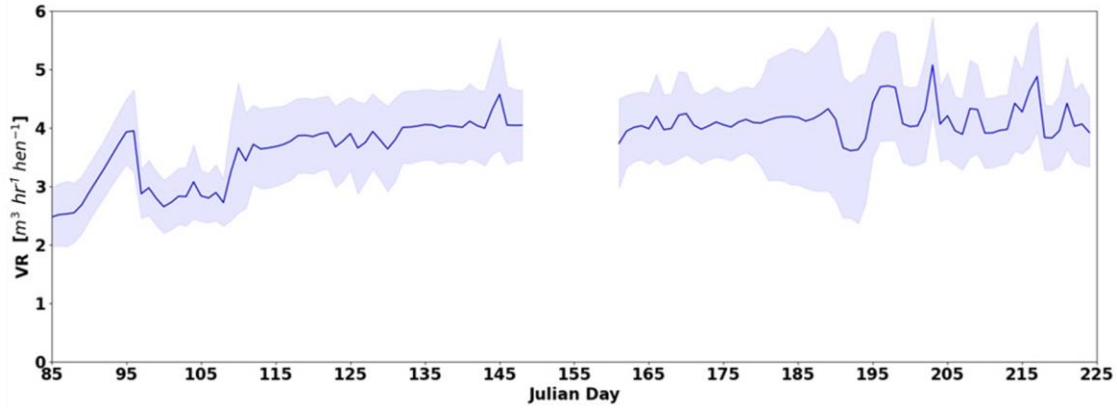


**Figure 16.** Ventilation rate determined by the orifice damper method with standard deviations from all rooms (shadowed) during trial one (85-148 Julian days) and trial two (160-224 Julian days).

#### *Indirect methods*

When compared to the second trial, the first trial displayed a slightly lower mean VRs using both  $\text{CO}_2$  (3.4 vs 4.1  $\text{m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) and heat (3.5 vs 3.8  $\text{m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) balance methods (Table 9). These values were comparable to those calculated by the orifice damper method.

**Table 9.** Ventilation rates for two trials using the  $\text{CO}_2$  and heat balance methods compared with direct method

| Trial | Method                | Mean<br>( $\text{m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) | Min<br>( $\text{m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) | Max<br>( $\text{m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) |
|-------|-----------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1     | Direct                | $3.5 \pm 0.8$                                             | 1.1                                                      | 7.1                                                      |
|       | $\text{CO}_2$ balance | $3.4 \pm 1.0$                                             | 1.1                                                      | 7.7                                                      |
|       | Heat balance          | $3.5 \pm 1.1$                                             | 0.1                                                      | 8.3                                                      |
| 2     | Direct                | $4.1 \pm 0.9$                                             | 2.0                                                      | 7.8                                                      |
|       | $\text{CO}_2$ balance | $4.1 \pm 1.1$                                             | 2.1                                                      | 8.6                                                      |
|       | Heat balance          | $3.8 \pm 1.0$                                             | 0.0                                                      | 9.2                                                      |

Compared to the orifice damper method, correlation analysis showed a weak correlation for the  $\text{CO}_2$  and heat balances ( $R^2 = 0.28$  and  $0.07$ , respectively), with an RMSE equal to 1.46  $\text{m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$  and 1.01  $\text{m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ , respectively (Figure 17a). The residual plots indicate that the data do not exhibit a specific error pattern. In other words, there is no consistent trend of over- or under-estimation across the evaluated methods (Figure 17b). The residuals are randomly distributed around zero, suggesting

that the indirect methods perform relatively evenly compared to the orifice damper method. The propagation of uncertainties  $\frac{\partial VR}{VR}$  for the CO<sub>2</sub> and heat balance methods were 3.1% and 12.3%, respectively. The MAE for the CO<sub>2</sub> balance method was 1.31 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>, and the MRE was 34.02%. For the heat balance method, the MAE was 0.87 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>, and the MRE was 22.57%. The CO<sub>2</sub> balance model tends to systematically underestimate the measured VRs by an average of 0.59 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>. In comparison, the heat balance model tends to systematically underestimate them by an average of 0.17 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>.

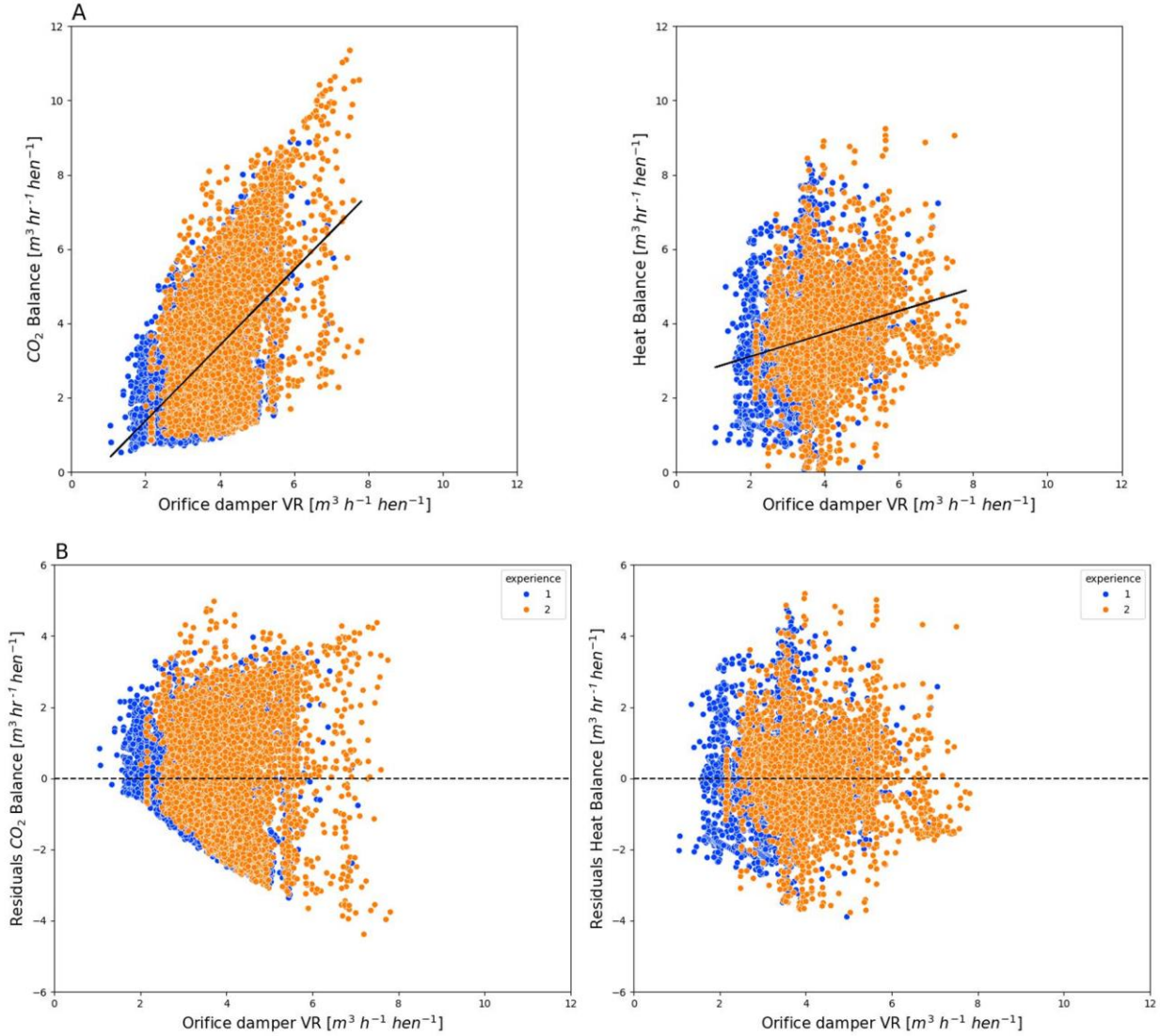


**Figure 17.** (A) Comparison between the orifice damper method and indirect methods (CO<sub>2</sub> balance on the left and heat balance on the right) for trial one (blue dots) and trial two (orange dots). (B) Residuals plots for indirect methods (CO<sub>2</sub> balance on the left and heat balance on the right) for trial one (blue dots) and trial two (orange dots).

Data were grouped on hourly and daily bases. For the hourly grouped data, the CO<sub>2</sub> balance R<sup>2</sup> remained at 0.28, but for the heat balance R<sup>2</sup> increased to 0.46. However, the RMSE decreased for both indirect methods (0.17 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup> and 0.14 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>, respectively; Figure 18). The MAE and the MRE also decreased for the CO<sub>2</sub> balance (MAE = 0.52 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>, and MRE = 13.64%) and heat balance (MAE = 0.18 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>, and MRE = 4.75%). For the daily grouped data, the R<sup>2</sup> values substantially increased for both methods (0.85 and 0.55, respectively), showing a strong correlation with the orifice damper method (Figure 18). Furthermore, the RMSE dropped, that is for the ungrouped data, to 0.22 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup> for the CO<sub>2</sub> balance and 0.36 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup> for the heat balance, significantly enhancing prediction accuracy when considering daily averages. For the ungrouped data, the MAE and the MRE also decreased for the CO<sub>2</sub> balance (MAE = 0.53 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>, and MRE = 13.75%) and the heat balance (MAE = 0.34 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>, and MRE = 8.87%). While for hourly and daily grouped data, the bias remained similar for both methods (-0.52 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup> for the CO<sub>2</sub> balance and -0.17 for the heat balance).

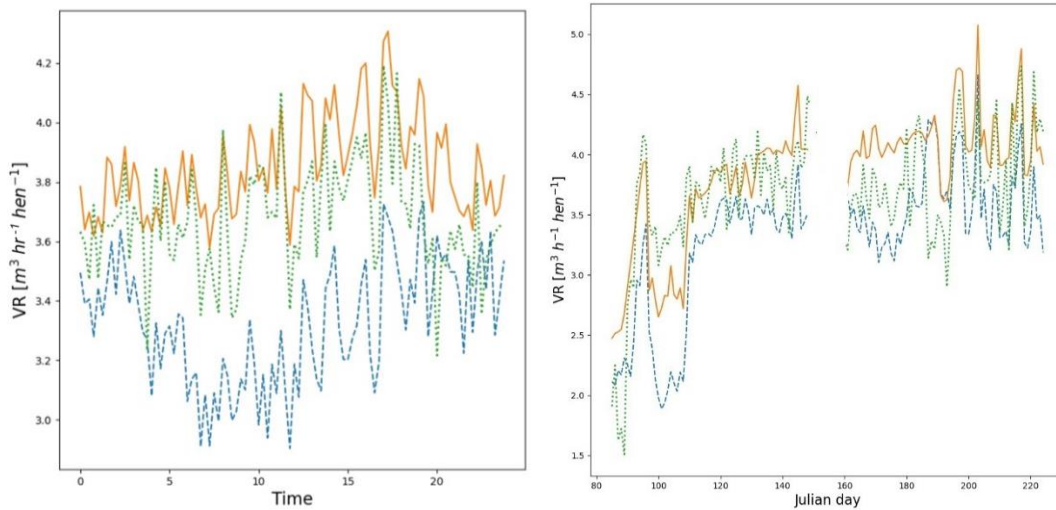


**Figure 18.** Average VRs for the three methods: orifice damper (orange -), CO<sub>2</sub> balance (blue - -) and heat balance (green ...) as a function of Julian day (right) and time within a day (in hours; left).

According to the multiple regression analysis, the independent variables integrated into the model can account for approximately 82% of the variability of the VR for the CO<sub>2</sub> balance method. In contrast, the heat balance method demonstrates a more constrained ability to elucidate the fluctuations in VR, with an R<sup>2</sup> of 0.13. This lower R<sup>2</sup> value implies that only 13% of the variance of the VRs can be explained by the variables included in the heat balance model.

### 2.5.5. Sensitivity analysis

Figure 19 shows the results of the global sensitivity analysis for the CO<sub>2</sub> balance method. The directional variogram indicated that the exhaust and inlet CO<sub>2</sub> concentrations were the most sensitive variables. According to the three evaluation methods, the inlet concentrations was the most influential one.

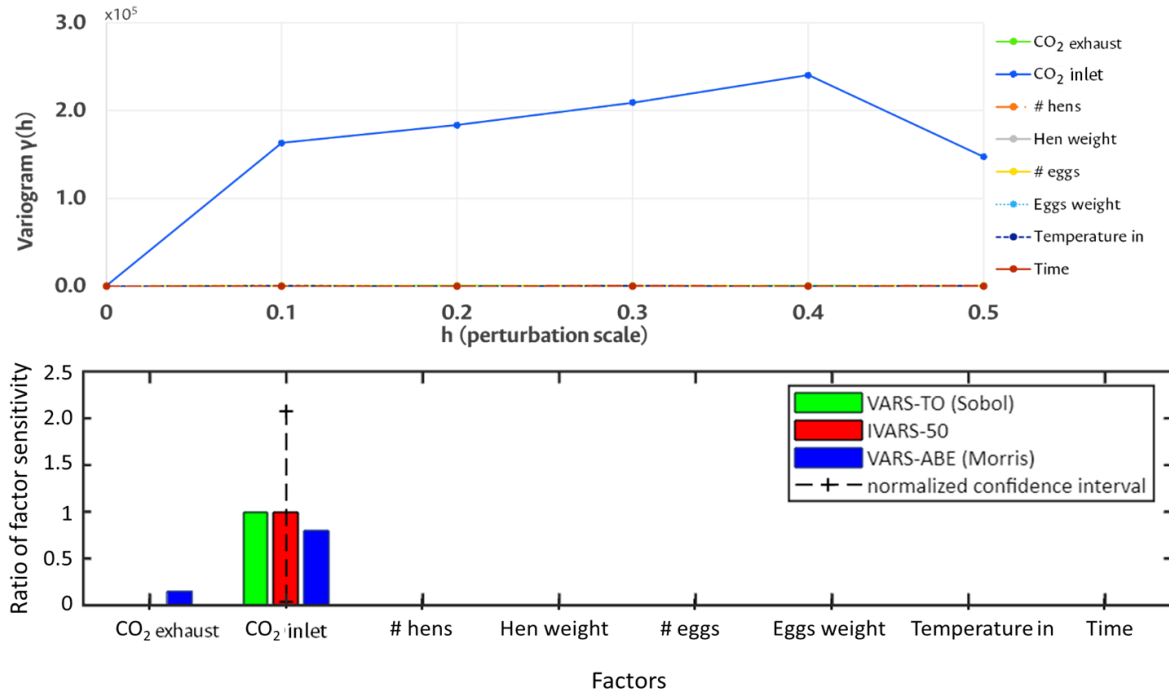


**Figure 19.** Global sensitivity analysis results for the CO<sub>2</sub> balance method. Directional variogram displays sensitivity across the range of perturbation scales (fluctuations in data values as they move away from the reference point) (above) and the relative importance of the factors (independent variables) according to the three evaluation approaches (below). The ratio of factor sensitivity is the value of each metric divided by the summed values of that metric over all the factors. Abbr.: CO<sub>2</sub> inlet: CO<sub>2</sub> inlet concentrations, CO<sub>2</sub> exhaust: CO<sub>2</sub> exhaust concentrations, # hens: total number of hens, # eggs: total number of eggs per day.

Figure 20 shows global sensitivity analysis results for the heat balance method. The directional variogram showed that for the heat model, the variable with the most significant sensitivity as the range of perturbation increases was the PCD temperature. According to the three evaluation methods, this variable has the most relative importance.

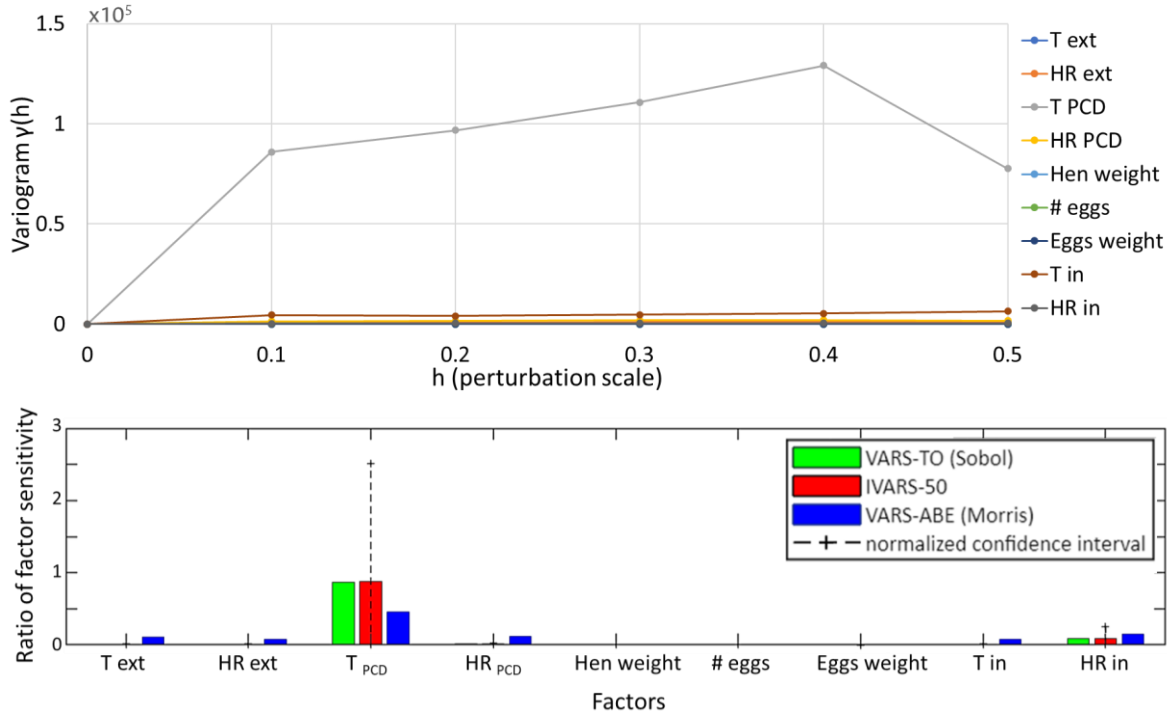


**Figure 20.** Global sensitivity analysis results for the heat balance method. Directional variogram that manifests sensitivity across the range of perturbation scales (fluctuations in data values as they move away from the reference point) (above) and the relative importance of the factors (independent variables) according to the three approaches (below). The ratio of factor sensitivity is the value of each metric divided by the summed values of that metric over all the factors. Abbr.: T ext: outdoor temperature, HR ext: outdoor relative humidity, T PCD: pre-conditioned duct temperature; HR PCD: pre-conditioned duct relative humidity; T in: indoor temperature, HR in: indoor relative humidity.

## 2.6. Discussion

The present study employs a bench-scale approach, where data were collected during two trials for VR determination. The results of the orifice damper method and indirect methods revealed that the VRs varied between the two experimental trials, reflecting the impact of seasonal changes. During the second trial, the hens required more ventilation due to the warmer weather. Accordingly, the VR values align with the recommended flow rates in Québec, which are  $0.2 \text{ L s}^{-1} \text{ hen}^{-1}$  ( $0.7 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) in winter and  $3.3 \text{ L s}^{-1} \text{ hen}^{-1}$  ( $11.9 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) in summer (Fournel et al., 2012).

The VR values recorded in this experiment exhibited similarities with those reported in studies involving laying hens. For instance, Lin et al., (2018) reported a daily VR ranging from  $1.9$  to  $8.7 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$  on a commercial hen farm. Similarly, Chai et al. (2012) reported VR values ranging from  $0.6$  to  $5.0 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$  for commercial laying hen houses. These findings across studies emphasize the consistency in the impact of temperature on VR in laying hen facilities. It is evident that variations

in temperature, especially between the seasons, influence the VR requirements of laying hens (Chielo et al., 2016).

### **2.6.1. Estimated ventilation rate by indirect methods**

The correlation between the CO<sub>2</sub> balance method and the orifice damper method was not very good on a short-time basis. Several studies have assessed VRs for laying hens using the CO<sub>2</sub> balance method (Li, Xin, & Liang, 2004; Z. Liu et al., 2016; Pedersen et al., 1998; Rosa et al., 2019). Liu et al. (2016) found a VR prediction with an R<sup>2</sup> of 0.13 in laying hens when the differences between exhaust and inlet CO<sub>2</sub> concentrations were higher than 200 ppm. These same authors also found a high variability of VRs due to the respiratory quotient (RQ), which, according to Van Ouwerkerk & Pedersen (1994), may be due to metabolic rate and feed intake. Our research found a similar variability in indoor and outdoor CO<sub>2</sub> concentrations, which aligns with the findings by Liu et al. (2016).

Like in our study, other researchers have noted improved performance of the CO<sub>2</sub> balance method when daily data averaging is employed. Pedersen et al. (1998) assessed VRs in laying hen buildings. The CO<sub>2</sub> balance method gave good results on a 24-hour basis, with an R<sup>2</sup> equal to 0.90, which is the same as the other methods for assessing heat and moisture balances. Li et al. (2004) compared VRs obtained by direct measurement and CO<sub>2</sub> balance in a commercial laying hen house. The comparisons were made at semi-hourly, hourly, bi-hourly, and daily average time intervals. These averages presented good correlations (R<sup>2</sup> of 0.90, 0.92, 0.93, and 0.96). Rosa et al. (2019) evaluated the accuracy of the CO<sub>2</sub> balance indirect method to assess VR in a mechanically ventilated laying hen facility by integrating CO<sub>2</sub> concentration data at two-hour intervals. The indirect method was compared with the direct hot wire anemometer (HWA) and fan rotational speed [laser tachometers (LT)] methods. They observed an association between the HWA with an  $r = 0.86$  and the LT with an  $r = 0.85$ . According to the studies mentioned above, it has been consistently observed that utilizing time interval integration has a positive impact on reducing noise and variability in the data. Our results also support these findings.

Studies involving other livestock buildings have also evidenced the good performance of the CO<sub>2</sub> balance when grouping by specific intervals. Blanes & Pedersen (2005) measured VRs in a pig house for 41 days and compared them to estimates calculated by CO<sub>2</sub> balance method on diurnal and hourly bases. A good correlation between measured and calculated VR was obtained on a 24-hour basis (R<sup>2</sup> = 0.97) and on an hourly basis (R<sup>2</sup> = 0.92). The latter study indicates that the correlation between measured and estimated hourly VR can be improved by considering the diurnal variation in CO<sub>2</sub>

production. This shows that daily variations in animal activity (heat, humidity, and metabolic CO<sub>2</sub> production) influence the accuracy of VR prediction using the CO<sub>2</sub> method. Therefore, further research is necessary to determine these parameters accurately.

The heat balance method has been found to provide inaccurate VR estimations in egg production facilities. This is due to inaccuracies in calculating various factors such as heat transfer coefficient, temperature differences, and diurnal variations in total heat produced by animals in response to changes in ambient conditions. Although few studies have reported the use of this method for VR determination, it has been applied in laying hen facilities (Pedersen et al., 1998), pig houses (Blanes & Pedersen, 2005), and dairy barns (Samer et al., 2011). Pedersen et al. (1998) evaluated the calculation of VRs over 24 hours through the heat method compared to two other indirect methods (CO<sub>2</sub> and moisture balance). For periods under 24 hr, diurnal changes in animal heat production required correction for precise calculation of VRs. Blanes & Pedersen (2005) compared VRs measured in a pig house with the heat balance method applied on diurnal and hourly bases. The study demonstrates a strong correlation between the measured and calculated daily and hourly VRs ( $R^2 = 0.92$  and  $0.83$ , respectively). As seen in both studies, there was a good correlation when averaging the data, which can be corroborated with our studies. However, our correlation for this method is lower than in these studies, potentially influenced by various factors. First, the configuration of the laboratory room, including factors such as the PCD, could introduce facility-specific variability in heat transfer dynamics, affecting the accuracy of the method. The PCD's positioning and material influence conduction losses, while internal components generate additional heat. External ambient conditions can also influence heat loss. Sudden temperature changes or extreme weather conditions can lead to disturbances in the thermal dynamics of PCD. Additionally, discrepancies in measurement methods for parameters like heat transfer coefficients, temperature differences, and the total heat produced by animals may contribute to inaccurate predictions.

Data aggregation significantly enhances VR assessment reliability using the CO<sub>2</sub> and heat balance methods. Nevertheless, according to the findings, the CO<sub>2</sub> balance model could be a promising approach for precise VR estimations in laying hen facilities. The performance of this method, mainly when data are aggregated daily, is supported by correlations observed in various studies across different livestock buildings (Xin et al., 2009; Estelles et al., 2011; Edouard et al., 2016; Liu et al., 2016). Aggregation allows to summarize this detailed data without losing the ability to analyze daily trends and fluctuations. Also, data aggregation offers a way to manage and analyze large datasets effectively while preserving the necessary resolution to understand daily fluctuations. However, it is important to recognize the limitations of daily data aggregation. Averaging the data smooths out

short-term fluctuations in VR, potentially masking significant dynamic changes. Additionally, this method reduces sensitivity to transient events, such as sudden changes in temperature or humidity, which may lead to an oversimplification of the complex interactions between environmental factors and VRs. In contrast, the heat balance method has shown limitations in accurately estimating VRs due to the inherent processes, such as environmental conditions (Hassouna et al., 2015) and heat production (Chepete et al., 2004; Hayes et al., 2013). These insights emphasize the need for method-specific considerations and highlight the significance of refining VR estimation techniques for optimal laying hen welfare and environmental impact assessments.

Although both balance methods have challenges, such as inaccuracies in calculating the VR on a short-term basis, grouping data daily improves calculations. Implementing these indirect methods offers a practical innovation, reducing the resource-intensive demands of direct measurement methods and providing a more feasible approach for continuous VR monitoring in poultry facilities. Additionally, this method can enhance real-time air quality monitoring, early detection of ventilation failures, and integration with farm management software for improved environmental control and animal welfare decision-making.

### **2.6.2. Multiple regression and sensitivity analysis**

The CO<sub>2</sub> balance method has good explanatory capacity due to the significant contribution of independent variables such as inlet/exhaust CO<sub>2</sub> concentrations, hen weight, daily production rate, internal temperature, and time of day to the overall understanding of VR dynamics. This aligns with the variables that Xin et al. (2009) and Samer et al. (2011) claimed to affect the CO<sub>2</sub> balance method to assess VR. The sensitivity analysis highlighted the inlet CO<sub>2</sub> concentration as the most sensitive variable in the VR calculation. Pedersen et al. (1998) conducted a sensitivity analysis of pig houses during winter and summer. They discovered that an increase of 50 ppm<sub>v</sub> in external CO<sub>2</sub> concentration can lead to uncertainty in VR during both seasons.

In contrast, the heat balance method demonstrates a limited capacity to elucidate VR variations, as indicated by the lower R<sup>2</sup> value. This suggests that the heat balance model may not fully capture the VR dynamics, leaving room for factors that could influence the fitting of the model, such as unaccounted H<sub>2</sub>O from manure, sampling point locations, and limitations in models, particularly those incapable of accommodating diurnal variations (Wang et al., 2016). For this approach, the sensitivity analysis identifies the PCD temperature as the most sensitive variable as the range of perturbation increases. While the objectives of the PCD system aim to stabilize and standardize the testing environment, the model's sensitivity to variations in PCD temperature underscores the critical

role that temperature control plays in achieving those objectives. Sudden changes in outside temperature can cause a delayed response in the air temperature of the PCD. This is due to the thermal inertia of the system, which can take time to stabilize after significant changes in external conditions. Additionally, it could lead to differences in the temperature of air supplied to each room, potentially introducing variability in the testing conditions and compromising the comparability of results across the rooms. However, commercial farms generally do not have a PCD for inlet air. In Québec and Ontario, Canada, mechanically ventilated laying hen houses generally have controlled air intake systems strategically placed to allow fresh air to enter and distribute it evenly (Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2010).

To improve the model's accuracy, it could be necessary to consider animal metabolism dynamics such as animal activity, CO<sub>2</sub> production, and respiratory quotient. Exploring adjustments or corrections to behavioral variables can further refine predictions. Likewise, it is essential to examine various variables that align with the practicalities of commercial farming. Models must evolve to capture diurnal variations in animal behavior and environmental conditions. Adapting models to encompass animal behavior and practical variables and implementing robust validation processes could enhance the accuracy of VR models in commercial laying hen facilities.

## **2.7. Conclusions**

This study has assessed the accuracy of indirect techniques, precisely the CO<sub>2</sub> and heat balance methods, compared to the orifice damper method of estimating VR under experimental bench-scale conditions for laying hens. The temporal resolution of data plays a crucial role in their performance. The CO<sub>2</sub> balance model effectively demonstrates its ability to explain VR dynamics, while the heat balance model exhibits certain constraints. The sensitivity analysis highlights the significance of inlet CO<sub>2</sub> concentration and PCD temperature, underscoring the need for nuanced and adaptable VR estimation approaches.

The results showed that among the evaluated methods (CO<sub>2</sub> and heat balance), the CO<sub>2</sub> balance method demonstrated higher accuracy. Although both methods rely on assumptions, the CO<sub>2</sub> balance method provided a better fit for estimating VR, particularly when daily data aggregation was applied, significantly enhancing its accuracy compared to the heat balance method. Additionally, the CO<sub>2</sub> balance method requires fewer input variables, thereby reducing the potential for errors. Furthermore, the research highlights that sensitivity analysis emphasizes the significance of specific variables in influencing the model and could offer insights for potential adaptations or corrections. Further

research is essential to evaluate how the animal's daytime behavior impacts its metabolism and, subsequently, the production of heat and CO<sub>2</sub>.

Future studies and practical applications should focus on enhancing data collection methods for comprehensive VR analysis and implementing adaptable systems to address seasonal variations, ensuring year-round welfare for laying hens.

## **Chapitre 3. Adaptation and validation of the CO<sub>2</sub> balance method for estimating the ventilation rate in laying hen facilities**

### **Adaptation et validation de la méthode du bilan CO<sub>2</sub> pour l'estimation du taux de ventilation dans les installations de poules pondeuses**

#### **3.1 Résumé**

Les préoccupations croissantes du public pour le bien-être animal et l'émission des gaz à effet de serre (GES) des sites de production mettent de la pression sur le secteur avicole au Canada. Un facteur clé pour estimer avec précision les émissions de GES est une meilleure connaissance du taux de ventilation (VR). Cette étude vise à adapter et valider la méthode du bilan de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) pour l'estimation du VR dans les logements de poules pondeuses. Elle a été basée sur la méthode du bilan de CO<sub>2</sub> de la Commission internationale de génie rural, qui considère des variables telles que le taux de production de CO<sub>2</sub> des poules (PRCO<sub>2</sub>), l'activité animale (AA) et le quotient respiratoire des poules pondeuses (RQ). Les données servant à l'élaboration du modèle ont été collectées lors d'une expérimentation en laboratoire impliquant des poules pondeuses dans des cages conventionnelles. Le modèle a ensuite été validé tant à l'échelle laboratoire qu'en conditions commerciales avec des poules pondeuses logées dans trois systèmes différents : cages conventionnelles (CC), cages enrichies (CE) et volières (V). La validation en laboratoire a été réalisée à l'aide de données d'une étude conduite sous des conditions similaires à la précédente. La validation commerciale a été effectuée en utilisant des données collectées auprès de 30 fermes du sud du Québec, Canada. Les adaptations testées et retenues incluaient la fixation de l'AA à 1, du RQ à 0,90 pendant la journée et à 0,85 durant la nuit et d'une correction du PRCO<sub>2</sub> à 18 % pendant la journée et à 8 % durant la nuit. Le modèle ajusté a montré un R<sup>2</sup> de 0,63 pour la prédiction du VR lorsque la différence entre le CO<sub>2</sub> expiré et le CO<sub>2</sub> entrant était inférieure à 150 ppm. En contexte expérimental, tous les systèmes de logement évalués ont montré un R<sup>2</sup> supérieur à 0,63 et une RMSE moyenne de 0,35 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> poule<sup>-1</sup>. Au niveau commercial, les systèmes de logement ont présenté un R<sup>2</sup> moyen prédit de 0,71 et une RMSE de 1,68 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> poule<sup>-1</sup>. La méthode du bilan de CO<sub>2</sub> ajustée a présenté de fortes valeurs prédictives dans les expériences en laboratoire et commerciales.

**Mots-clés :** Émissions de GES, poules pondeuses, qualité de l'air, débit d'air, activité animale.

### 3.2. Abstract

Growing public concern about animal welfare and greenhouse gas emissions is putting pressure on the poultry sector in Canada. A key factor for estimating the emission of GHG could be improving the estimation of the actual ventilation rate (VR). The objective of this study was to adapt and validate the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) balance method for estimating the VR in laying hen housing systems. The adaptation was based on the CO<sub>2</sub> balance method from the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering, which considers variables such as the CO<sub>2</sub> production rate of hens (PRCO<sub>2</sub>), animal activity (AA), and the respiratory quotient of laying hens (RQ). Data for model development were collected from an experiment involving laying hens in conventional cages under laboratory conditions. The model was then validated under both laboratory and commercial conditions with laying hens housed in three different systems: conventional cages (CC), enriched cages (EC), and cage-free (CF) systems. The laboratory validation was performed using data from a study conducted under similar conditions to that mentioned above. The commercial validation was performed using data collected from 30 layer farms in Southern Quebec, Canada. The tested and retained adaptations included setting AA to 1, RQ to 0.90 during the day and 0.85 at night, and correcting the PRCO<sub>2</sub> to 18% during the day and 8% at night. The adjusted model demonstrated an R<sup>2</sup> of 0.63 for VR when the difference between outlet and inlet CO<sub>2</sub> concentrations was less than 150 ppm<sub>v</sub>. However, accuracy decreased beyond 200 ppm<sub>v</sub> due to missing data. At the experimental level, all housing systems showed an R<sup>2</sup> greater than 0.63 and an average RMSE of 0.35 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>. At the commercial level, housing systems exhibited an average predicted R<sup>2</sup> of 0.71 and an RMSE of 1.68 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup>. The adapted CO<sub>2</sub> balance method presented strong predictive capacity across laboratory and commercial settings.

**Keywords:** GHG emissions, laying hens, air quality, airflow, animal activity.

### 3.3. Introduction

Effective ventilation in poultry buildings is essential for optimizing animal health, enhancing productivity, and ensuring overall welfare. Proper airflow management helps regulate temperature, humidity, and air quality, which are critical factors in preventing respiratory diseases, reducing stress, and promoting efficient growth and reproduction (Wasti et al., 2020; Al-Abdullatif & Azzam, 2023; Apalowo et al., 2024). Next-generation livestock production systems are integrating new regulations that focus on animal welfare considerations, allowing for greater freedom of movement, which the public views as one of the most critical aspects of farm animal living conditions (Schuppli et al., 2014). However, transitioning to these systems has led to a significant increase in environmental

impact, notably raising ammonia ( $\text{NH}_3$ ) and greenhouse gas (GHG) emissions (Shepherd et al., 2015; Bist et al., 2023). From this perspective, accurately calculating gas emissions becomes crucial for developing effective reduction strategies that can be implemented in commercial livestock buildings.

The calculation of emissions is the product of concentration levels and ventilation rates (VR), thus accurate VR measurements are deemed essential for reliable emissions estimates. However, variability in VR is a primary source of uncertainty, as precise measurements require high temporal resolution, overall accuracy, and precision (Ogink et al., 2013a). Factors such as temperature variations, humidity, and the physical layout of the housing system affect airflow patterns, complicating the precise measurement and control of VR. Several approaches are currently used for estimating VR, including direct measurements and tracer gas techniques or heat and carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) balance methods.

Direct measurement is one of the most common strategies for determining VR. It involves equipment that measures the airspeed directly at the inlet and outlet. The VR is then determined by multiplying the airspeed by the cross-sectional area of the fans. However, this method has limitations, such as measurement errors, issues related to the placement and location of the measuring devices, equipment calibration (Zhou et al., 2017a; Park et al., 2018), facility size, and fan distribution (Gates et al., 2009; Calvet et al., 2013). Robust data collection and analysis are essential, given the fluctuating external temperatures and dynamic ventilation requirements throughout the day (Park et al., 2018; Z. Zhou et al., 2017a). Unfortunately, results from available VR calculation methods are challenging to implement when comparing various production systems with specific characteristics (Calvet et al., 2013; Burns et al., 2009). The tracer gas technique, often using sulphur hexafluoride ( $\text{SF}_6$ ), is commonly applied in livestock buildings to determine VR. It involves introducing a gas into the environment and measuring its concentration to estimate airflow (Phillips et al., 2001). However, the technique requires careful distribution of  $\text{SF}_6$  to maintain uniform concentration, as its high density can lead to uneven mixing, which may affect accuracy (Hassouna et al., 2015). The heat balance method relates heat production from animal metabolism to temperature gradients inside the building to estimate VR (Hassouna et al., 2015). While this method is valid, its accuracy decreases over short periods, as animal activity and metabolic heat production can fluctuate throughout the day, leading to potential errors in VR estimation (Carranza-Díaz et al., 2025). The  $\text{CO}_2$  balance method has shown promises due to its continuous and non-invasive measurement technique. This approach suggests that ventilation can elucidate the relationship between  $\text{CO}_2$  production (mainly from animal metabolism and, if applicable, from bedding and heating) and the  $\text{CO}_2$  gradient between indoor and outdoor environments (Li et al., et al., 2004; Liu et al., 2016; Rosa et al., 2019b). By monitoring both indoor

and outdoor CO<sub>2</sub> concentrations and understanding the CO<sub>2</sub> production rates of animals, it becomes feasible to calculate the VR required to maintain an acceptable CO<sub>2</sub> concentration.

Despite its potential, the CO<sub>2</sub> balance method has not been thoroughly validated or adapted for laying hen housing systems. Hens' CO<sub>2</sub> production rates and environmental influences need careful consideration. Numerous research projects (e.g., Carranza-Díaz et al., 2025) have explored the assessment of VRs in laying hen facilities, employing the CO<sub>2</sub> balance method. Pedersen et al. (1998), Li et al. (2005), and Rosa et al. (2019) demonstrated a positive correlation between the direct and CO<sub>2</sub> balance methods for VR calculation. However, correlation analyses between CO<sub>2</sub> balance and direct methods have not always been convincing in egg production facilities leading to poor estimates of VRs. Liu et al. (2016) indicated that the reliability of the CO<sub>2</sub> balance method depends on the precision of the animal metabolic rate and the presence of additional CO<sub>2</sub> sources not related to animal respiration (e.g., manure degradation, human activity, combustion devices), which may introduce uncertainty in the estimation of VR. These factors need additional research, improvement, and confirmation. The CO<sub>2</sub> method has advantages, including simplicity and low cost, but it also has some limitations and inconsistencies. For example, while it has been proven reliable for short-term spot evaluations lasting a few hours (Pedersen et al., 1998; Rosa et al., 2019; Carranza-Díaz et al., 2025), its application in real-time monitoring remains challenging due to fluctuations in animal activity and CO<sub>2</sub> production throughout the day. This highlights the need for additional research to enhance continuous assessment tools for improved monitoring of emissions and environmental control of livestock buildings.

The objectives of this study were to: (i) adapt a model based on the CO<sub>2</sub> balance from the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR) method (Pedersen et al., 2002) for VR estimation in laying hen housing systems; (ii) validate the model under laboratory conditions; and (iii) validate the model in three different commercial housing systems. The findings of this study could lead to more accurate VR estimations, enabling more precise emissions assessments with minimal resources, ultimately supporting better environmental control in poultry houses and promoting the welfare and productivity of laying hens.

### **3.4. Materials and Methods**

#### **3.4.1. CO<sub>2</sub> balance method adaptations**

The CIGR equation for CO<sub>2</sub> balance (Pederson et al., 2002) calculates ventilation rate (VR) by relating the CO<sub>2</sub> produced within livestock building to the concentration difference between indoor and outdoor environments. For livestock buildings where CO<sub>2</sub> originates primarily from animals, this

method provides the following equation to estimate VR on a 24-hour basis per heat production unit (hpu; 1 hpu = 1000 W of total heat at 20°C):

$$VR_{CO_2} = \frac{0.185}{([CO_2]_e - [CO_2]_i) \times 10^{-6}} \quad (16)$$

where  $VR_{CO_2}$  is the ventilation rate per hpu ( $m^3 \text{ hr}^{-1}$ ), 0.185 ( $m^3 \text{ hr}^{-1}$ ) is the  $CO_2$  production per hpu, and  $[CO_2]_e$  and  $[CO_2]_i$  are the exhaust and inlet  $CO_2$  concentrations (ppm), respectively.

Equation 16 was adapted to improve the accuracy of ventilation rate (VR) estimation in laying hen production. The adaptation process was conducted sequentially: (1) the effect of animal activity (AA) was evaluated; (2) if the inclusion of AA improved accuracy, the modification was retained, otherwise, the original equation was preserved; (3) the hen  $CO_2$  production rate ( $PR_{CO_2}$ ) was assessed and adjusted accordingly; (4) the respiratory quotient (RQ), which influences  $PR_{CO_2}$ , was analyzed and integrated. Figure 21 shows the scheme as followed:

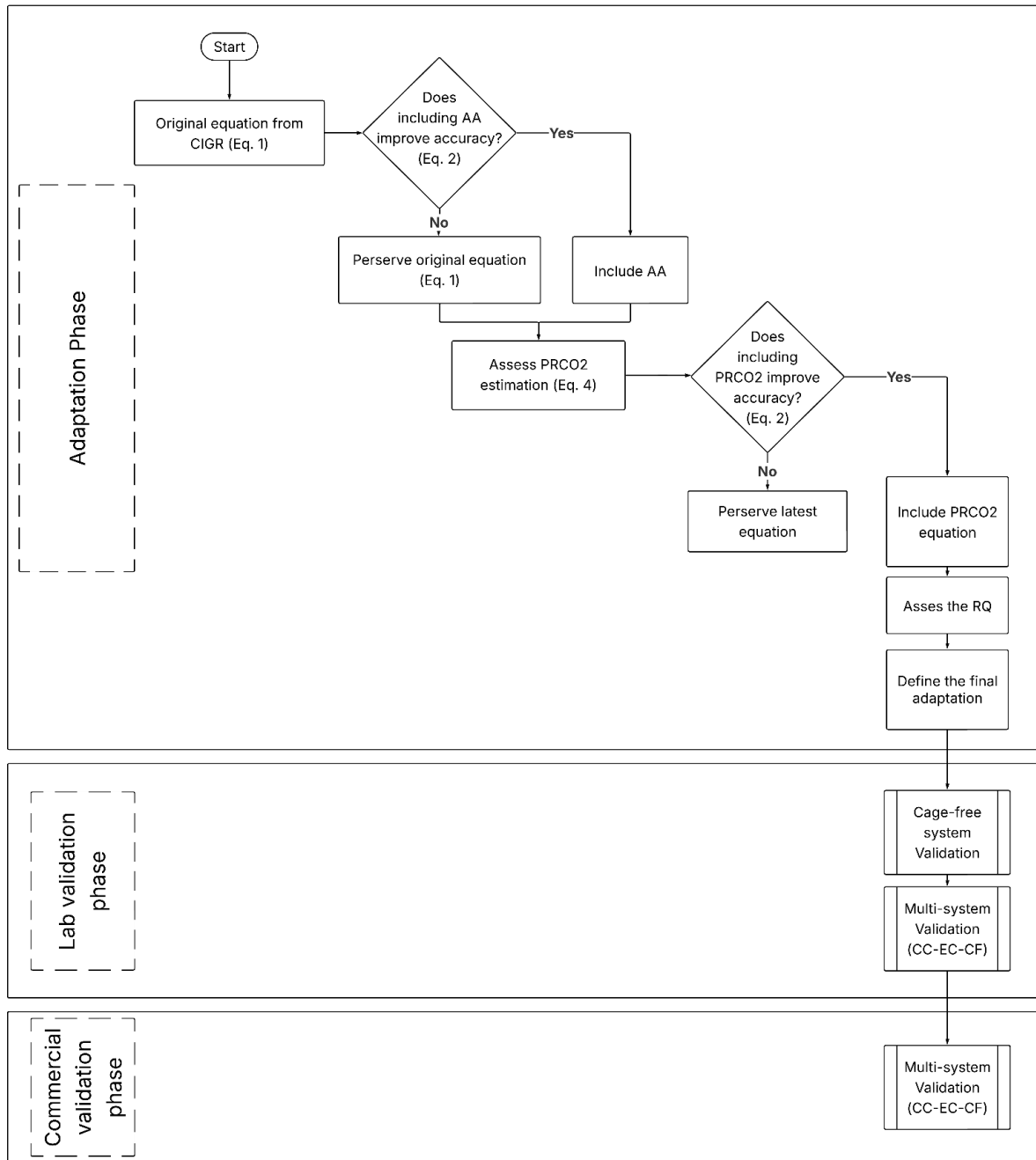


**Figure 21.** Schematic representation of the sequential adaptation and validation process.  
 Abbreviations: AA: Animal activity, PRCO2: CO<sub>2</sub> production rate, RQ: respiratory quotient, CC: conventional cage, EC: enriched cage, CF: Cage-free.

Equation 16 assumes a fixed animal activity factor ( $AA = 1$ ). However, on an hourly basis, AA can vary significantly depending on the behavior of the hens. Therefore, based on the recommendations of Pederson et al. (2002), the first adaptation consisted of replacing the fixed value with dynamic AA values representative of hourly activity patterns (Eq. 17):

$$AA = 1 - a \times \sin[(2 \times \frac{\pi}{24}) 5 \times (h + 6 - hmin)] \quad (17)$$

where  $AA$  is the relative animal activity,  $a$  is a constant expressing the amplitude and is equal to 0.61 for laying hens,  $h$  is the hour, and  $hmin$  is -0.1, which is the time of the day with minimum activity for laying hens (23:55).

Although activity is closely linked to light and feeding schedules (Pedersen et al., 2002), for modeling purposes, a standardized 12-hour light/12-hour dark cycle was used to define the daily animal activity profile. This simplification was necessary to ensure consistency across trial periods, as the actual lighting schedule varied throughout the experimental weeks. The adjustment can be made indirectly by multiplying animal activity by the VR estimated by the CO<sub>2</sub> balance (Pederson et al., 2002) and Eq. 16 becomes:

$$VR_{CO_2} = \frac{0.185 \times AA}{([CO_2]_e - [CO_2]_i) \times 10^{-6}} \quad (18)$$

Pederson et al. (2002) showed that the value of 0.185 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> in Eq. 16 applies to the entire 24-hour period and that significant diurnal variations occur. Consequently, estimates of VR from CO<sub>2</sub> balance based on spot measurements may differ from the measured VR. Hayes et al. (2013) determined the PRCO<sub>2</sub> (mL CO<sub>2</sub> s<sup>-1</sup>) based on the total heat production (THP; W hen<sup>-1</sup>) using the indirect calorimetry technique (Eq. 9). The proportion of CO<sub>2</sub> attributed to manure decomposition (CO<sub>2</sub> manure) has been reported to vary seasonally, typically around 1% in winter and up to 5% in summer, mainly due to higher microbial activity at elevated temperatures (Hayes et al., 2013; Rosa et al., 2019). However, this proportion also depends on manure characteristics and the manure management system (e.g., type of collection, frequency of removal, and accumulation). This study used various manure collection systems during the adaptation and validation phases. Given this variability and the absence of direct measurements of manure CO<sub>2</sub>, we adopted the seasonal correction factors (1% in cold and 5% in warm seasons) from the literature as reference values. Consequently, the metabolic CO<sub>2</sub> during the cold season was estimated to be 99%, while 95% of the total CO<sub>2</sub> was produced at the hen's barn during the warm season. For this study, the cold season was defined as October to April and the warm season as May to September, based on average temperature trends in southern Québec. The CO<sub>2</sub> produced by the heater was neglected because it was electric.

Finally, the RQ values found in the literature vary in a range between 0.80 to 0.99 (Ketelaars et al., 1985; Chepete & Xin, 2004; Liu et al., 2016; Rosa et al., 2019), depending on the age of the birds, metabolic rate, feed intake, and the individual status of the animal (Ouwkerk & Pedersen, 1994). A range of RQ values reported in the literature for laying hens (0.85–0.99) was tested to assess the

influence of different RQ values on model accuracy. To evaluate the impact of diurnal variation, daytime is defined as 6:00 AM to 5:59 PM and nighttime is defined as 6:00 PM to 5:59 AM, and distinct RQ values are applied for each period. Specifically, all possible combinations of RQ values for daytime (0.85 to 0.99) and nighttime (0.85 to 0.99) were generated, resulting in 225 combinations.

### **3.4.2. Adaptation of the model based on the CO<sub>2</sub> balance method**

The adaptation activity was based on the data from Fournel et al. (2012) focusing on conventional cages (CC). The subsequent subsections summarize the experimental setup described in this article.

#### *Experimental rooms*

The experiment took place at the Research and Development Institute for the Agri-Environment's livestock research facility called BABE (*Bilan agroenvironnemental des bâtiments d'élevage*), located at the CRSAD (*Centre de recherche en sciences animales de Deschambault*) in Quebec, Canada. Twelve rooms, each measuring 1.2 m in width, 2.4 m in length, and 2.4 m in height, were used for the experiment. Each room was designed to prevent air exchange between rooms, and equipped with ventilation, electric heating, and lighting systems.

#### *Animal housing*

Thirty white Lohmann LSL-Lite laying hens per room ( $n = 360$ ), aged 19 weeks, were housed in conventional cages (485.5 mm wide x 507 mm deep x 540 mm high; Farmer Automatic, 2010) stacked in two columns of three cages. Each cage included five hens ( $492 \text{ cm}^2 \text{ hen}^{-1}$ ). The study consisted of two consecutive eight-week trials from March to August 2010. The hens were fed daily with  $100 \text{ g hen}^{-1}$  of commercial laying hen feed throughout the experiment ( $35.4 \text{ g kg}^{-1}$  total nitrogen,  $904 \text{ g kg}^{-1}$  dry matter content, 22% proteins, 6.55% fat, 4.88% acid detergent fibre; 2005-000, Aliments Breton, St-Bernard-de-Beauce, QC, Canada). The feed quantity was predetermined before the trials and distributed once daily at 09:00, following a consistent schedule across all experimental phases. Fresh water was provided *ad libitum* via a solenoid valve connected to a data logger, ensuring automatic water supply control. The lighting schedule varied throughout the trials: 13 hours per day during weeks 1-2, 13.5 hours per day during weeks 3-4, and 14 hours per day during weeks 4-8. The light period began daily at 06:00 and ended according to the designated photoperiod. Lights were switched on and off at fixed times. The lighting system was regulated to provide 40 lux at the hens' level (Light Meter, Lux/FC, 840020C, Sper Scientific Ltd., AZ, USA). To prevent interference from external light sources, cardboards were fixed to the windows of the doors separating the rooms from the working area. This lighting schedule was implemented to support animal adaptation and the

initiation of rearing, following standard commercial practices.

#### *Data collection*

Each experimental room had a 0.3-m diameter variable-speed exhaust fan (Model VEN812448, Ziehl Fan Série Z, IEL Technologie Agricole, Ste-Claire, Québec, Canada). Ventilation operated continuously at a fixed rate to ensure air renewal. To maintain the desired room temperature (22–23°C), incoming air from outside was pre-conditioned (PCD) by a centralized system that combined an air conditioning unit and an electric resistance heater. This air was distributed to the 12 rooms via a duct network. In addition, each room had a secondary heater for fine temperature adjustment, regulated by an electronic controller (model RM-2V2S r-matic, IEL Technologie Agricole, Ste-Claire, QC, Canada). Temperature and relative humidity (RH) were measured every 15 min (sensor CS500,  $\pm 0.3$  °C,  $\pm 3\%$  RH, Campbell Scientific Canada, Corp., Edmonton, AB, Canada). Ventilation rate was quantified using a 204 mm iris damper (model 200,  $\pm 5\%$  accuracy, Continental Fan Manufacturing Inc., Buffalo, NY, USA), and pressure differentials were recorded every 15 min by averaging 10-second measurements.

#### *Air CO<sub>2</sub> determination*

Air from each room was pumped to a mobile laboratory using Teflon™ tubing for air sampling. In the mobile laboratory, CO<sub>2</sub> levels were measured by gas chromatography (GC; model 3600, accuracy  $\pm 30$  ppmv, Varian, Walnut Creek, CA, USA) equipped with an electron capture detector. Samples from the experimental rooms were drawn through the GC injection loop every 15 min, with each room sampled sequentially. A complete set of CO<sub>2</sub> measurements for the 12 experimental rooms required a 3-hour sampling period, with one measurement taken for each room every 3 hours. Gas concentrations were synchronized with the ventilation rate data by aligning the timestamp of each CO<sub>2</sub> measurement with the corresponding 15-minute VR. For analyses requiring hourly values, we aggregated all available data within each hourly block (e.g., 00:00–00:59, 01:00–01:59), acknowledging that individual rooms were sampled at different times each day due to the rotating sequence. Calibration checks were conducted every three days between 12:00 PM and 1:00 PM using three standard gas concentrations to ensure measurement reliability.

### **3.4.3. Validation at the laboratory level**

For model validation, data from two previously conducted studies that took place in the twelve laboratory-scale rooms of the BABE laboratory (Gonzalez-Mora et al. (2021) (Section 3.4.2) were used. The first laboratory study only tests the CF system, while the second laboratory study compares

CC, EC, and CF housing approaches. Experimental conditions were fully described in the articles of Gonzalez-Mora et al. (2021) and Philippe et al. (2020) for the first and second studies, respectively. The subsequent subsections provide a detailed summary of the experimental setup in these articles.

#### *Animal housing*

for the first and second studies, respectively. The subsequent subsections provide a detailed summary of the experimental setup in these articles. The rooms were set up to comply with the housing requirements outlined for the CF system in the Code of practice for the care and handling of pullets and laying hens, as established by the National Farm Animal Care Council of Canada (NFACC, 2016). Each room included a wire floor area ( $122 \times 81$  cm, 30 cm high) and a litter area ( $122 \times 38$  cm) covered with 5 cm of wood shavings. The wire floor featured two nest boxes, a feeder, two nipple drinkers, and two perches (5 and 45 cm high, 20 cm hen<sup>-1</sup>). Hens were housed at a density of one per 1115 cm<sup>2</sup>. Manure was collected below the wire floor, dried with forced air, and removed on a weekly basis. Lighting intensity in all rooms was maintained between 10 and 15 lux, with an immediate on/off cycle. A 13.5-hour light/10.5-hour dark photoperiod was implemented. The hens were fed with 100 g hen<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> of a commercial diet (Laying Hen 18% vegetable-based crude protein from Agri-Marché, St-Isidore, QC, Canada). Feeders were filled once in the morning, then verified three times a day and refilled by the end of the day. Feed and water were provided ad libitum. Water was supplied through a solenoid-activated valve connected to a data logger.

In the second study (Philippe et al., 2020), 360 Lohmann LSL-Lite laying hens were randomly allocated to one of three treatment groups (CC, EC, and CF). The CC system consisted of multi-deck battery cages, each accommodating five hens with 493 cm<sup>2</sup> per hen. These cages featured metallic mesh flooring, a linear feeder, and two nipple drinkers. The EC and CF systems adhered to the European Directive 1999/74/CE. The EC cages housed ten hens each, providing 780 cm<sup>2</sup> per bird, excluding the pecking and scratching area (PSA). Each EC cage had two nests, a PSA, two perches, a linear feeder, and three nipple drinkers. The experimental phase spanned 70 days, from 23 to 34 weeks of age. The hens were fed a commercial corn-based diet (27910819, Aliments La Coop Fédérée, Joliette, QC, Canada) at a rate of 100g hen<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, distributed twice daily, with ad libitum access to water. The lighting system provided an intensity of 5 to 10 lux at the hens' level, with a 16-hour light and 8-hour dark photoperiod.

#### *Data collection and CO<sub>2</sub> determination*

In both studies, temperature, RH, and VR measurements were taken, as described in Section 3.4.2. Study 2 utilized the methodology described in Section 3.4.2 for CO<sub>2</sub> determination. In Study 1, CO<sub>2</sub>

concentrations were measured using an infrared gas analyzer (FTIR, model DX4040, Gasmeter, Helsinki, Finland). This analyzer, which employs a Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) and an integrated sample gas pump, recorded concentration levels at 15-min intervals.

#### **3.4.4. Validation at the commercial level**

The commercial-scale validation was based on data from Carranza-Díaz et al. (2023). The subsections below summarize the research conditions.

##### *Experimental setup and animal housing*

The study, conducted between 2020 and 2022, involved 30 laying hen commercial farms with mechanical ventilation systems in Southern Quebec, Canada (Table A1). The laying hens, averaging 57-weeks old, were part of one of three production systems: CC (6 barns), EC (14 barns), and CF (10 barns). Each farm was visited once, during which two measurement sessions were performed on the same day: one in the morning (between 9:00 and 11:00 a.m.) and one in the afternoon (between 1:00 and 3:00 p.m.). The measurements included CO<sub>2</sub> concentrations, air velocity, temperature, and relative humidity (RH). They were carried out at multiple locations: near the ventilation fans, at the center of the barn, at the air intake, and outside the building to ensure representative data. The values obtained during the morning and afternoon sessions were averaged for further analysis.

The CO<sub>2</sub> concentrations were taken using a FTIR (model DX4040, Gasmeter, Helsinki, Finland). Air velocity, humidity, and temperature were measured using a telescopic multifunction thermo-hygrometer-anemometer (VT210 + SFC300 probe, air velocity accuracy  $\pm 3\%$  of reading  $\pm 0.1$  m/s, temperature accuracy  $3\%$  of reading  $\pm 0.25^\circ\text{C}$ , KIMO, Chevry-Cossigny, France). The VR was estimated by multiplying the air velocity of each operating fan by its cross-sectional area and summing the individual flow rates to obtain the total VR for the facility.

The influence of breed on model accuracy is minimal, as only 4 out of the 30 farms (13.3%) raised a breed different from the one used for model adaptation. Given the small proportion of farms with an alternative breed, the impact of this factor on model variability is limited. As a result, any potential bias introduced by breed differences is considered low and unlikely to significantly affect the model's overall accuracy. The farms employed various manure management systems: 21 used manure belt drying systems, four used manure conveyor and scraper systems, two used manure drying on bedded floors, and the remaining three used pit storage systems to collect and store manure in underground pits or tanks beneath livestock housing areas.

### *Statistical analysis*

Two standard metrics were calculated to evaluate the performances between the direct method, the original CO<sub>2</sub> balance, and the adaptations of the latter approach: root mean squared error (RMSE) and the R-squared score (R<sup>2</sup>). These metrics were calculated using Python modules, specifically the `mean_squared_error` and `r2_score` functions from `sklearn` (Pedregosa et al., 2011). According to Moore et al. (2013), an R<sup>2</sup> value below 0.30, between 0.30 and 0.50, between 0.50 to 0.70, and above 0.70 respectively, indicates a minimal effect, a weak effect, a moderate effect, and a strong effect. These metrics are commonly used to evaluate a model's prediction (*Kadiyala & Kumar, 2017; Srisa-An, 2021; Lin et al., 2023*). Additionally, the mean absolute error (MAE) and mean relative error (MRE) were calculated to assess the adapted models' accuracy in absolute and relative terms. All statistical metrics were computed using non-aggregated data (data every 15 minutes). Data aggregation into hourly blocks, as explained before, was performed solely for visualization purposes in the hourly plots to represent average daily trends.

The determination of the VR propagation of uncertainties by the CO<sub>2</sub> balance adapted method is given by Equation 15 (ASHRAE, 2005).

## **3.5. Results and discussion**

### **3.5.1. Environmental conditions and laying hen performances**

Table 9 presents data from the three phases of the project: adaptation, laboratory validations, and commercial validation. The table summarizes key parameters such as the number of hens, hen weight, indoor temperature and humidity, ventilation rate, and egg production across different housing systems.

**Table 10.** Hen performance and environmental parameters of sampled farms

| Parameter*                                                                       | Adaptation –<br>Fournel et al.<br>(2012) | Lab validation 1 –<br>Gonzalez-Mora et<br>al. (2021) | Lab validation 2 –<br>Philippe et al.<br>(2020) | Commercial validation –<br>Carranza-Díaz et al.<br>(2023) |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| System                                                                           | CC                                       | CF                                                   | CC–EC–CF                                        | CC–EC–CF                                                  |
| Number of hens                                                                   | 30                                       | 12                                                   | 30                                              | ~ 23,163                                                  |
| Quantity of experimental<br>units                                                | 12 rooms                                 | 12 rooms                                             | 12 rooms                                        | 30 facilities                                             |
| Hens' age at the beginning<br>(weeks)                                            | 19**                                     | 19                                                   | 23                                              | 56 ± 8.3***                                               |
| Hens age at the end (weeks)                                                      | 28**                                     | 38                                                   | 34                                              |                                                           |
| Hen weight (kg)                                                                  | 1.50 ± 0.06                              | 1.73 ± 0.04                                          | 1.57 ± 0.04                                     | 1.72 ± 0.12                                               |
| Indoor temperature (°C)                                                          | 22.2 ± 0.8                               | 21.8 ± 0.4                                           | 20.0 ± 1.55                                     | 22.6 ± 2.4                                                |
| Indoor relative humidity<br>(%)                                                  | 40.0 ± 8.6                               | 34.5 ± 8.4                                           | 28.5 ± 8.6                                      | 57.7 ± 6.3                                                |
| Outdoor temperature (°C)                                                         | 15.7 ± 8.3                               | 4.2 ± 10.4                                           | -1.2 ± 11.5                                     | 3.0 ± 13.3                                                |
| Outdoor relative humidity<br>(%)                                                 | 57.6 ± 19.4                              | 61.6 ± 4.5                                           | 57.5 ± 22.3                                     | 50.7 ± 11.0                                               |
| Measured ventilation rate<br>(m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> ) | 3.84 ± 0.93                              | 6.44 ± 1.45                                          | 4.08 ± 0.68                                     | 1.49 ± 2.24                                               |
| Laying rate (%)                                                                  | 96.2*                                    | 97.7*                                                | 90.3*                                           | ~91.2                                                     |
| Egg production (g d <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> )                            | 54.12                                    | 60.00                                                | 59.23                                           | 61.70                                                     |

\*Average per experimental unit

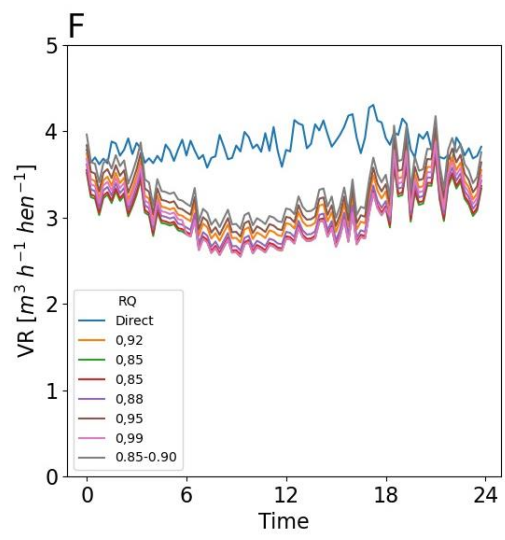
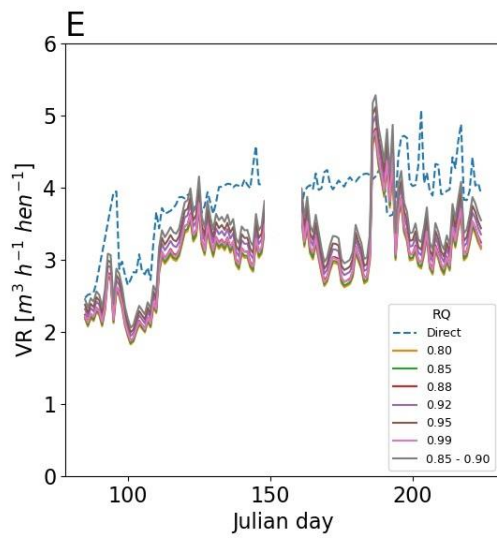
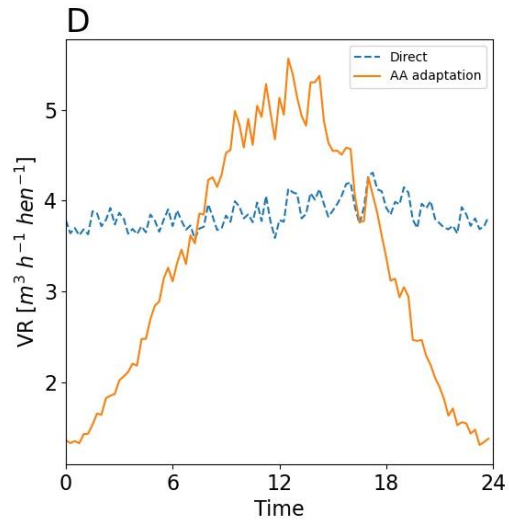
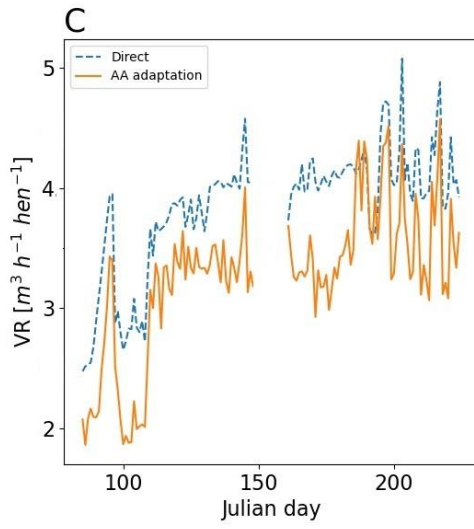
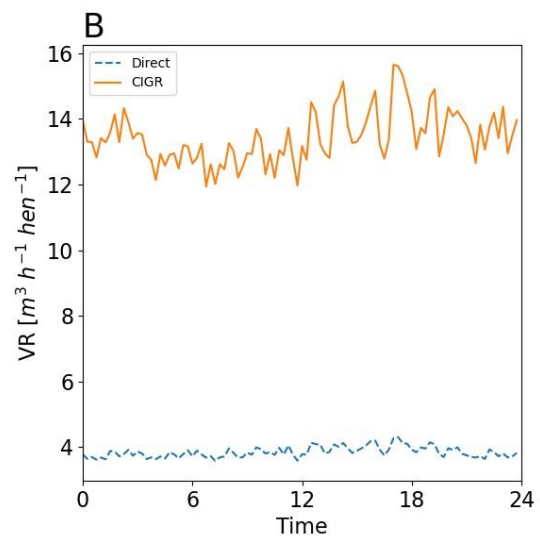
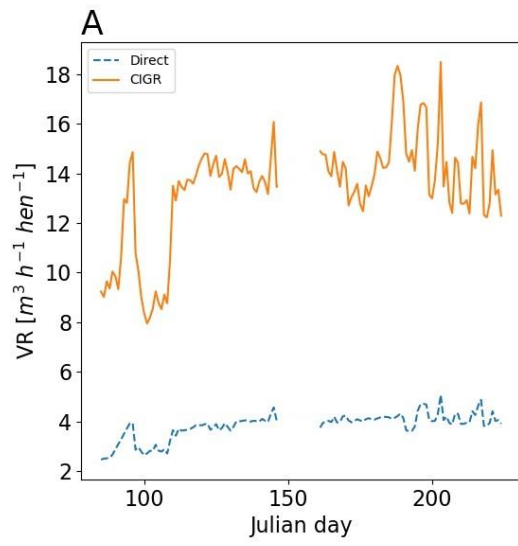
\*\*Each trial

\*\*\*The average age ± sd of all the farms sampled is shown, since they were point measurements.

CC = conventional cages; EC = enriched cages; CF = cage-free system.

### 3.5.2. Model adaptations

The VR determined by the original CIGR equation (Eq. 16) produced an R<sup>2</sup> of 0.60 and an RMSE of 10.14 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup> hen<sup>-1</sup> (Figure 22A and B). This model exhibited significant errors, demonstrating poor predictive capability for VR by frequently overestimating direct measurements. The high variability observed suggests that assumptions of constant animal metabolism and steady-state conditions for CO<sub>2</sub> production and distribution might not always hold under rapidly changing conditions (R. Gates et al., 2009). The CIGR equation assumes a fixed CO<sub>2</sub> production rate per hen, which may not accurately reflect metabolic CO<sub>2</sub> production under varying housing conditions (Pedersen et al., 2002). The metabolic CO<sub>2</sub> production refers to the carbon dioxide generated internally by the hens as a result of cellular respiration, which is influenced by their physiological state and activity levels.



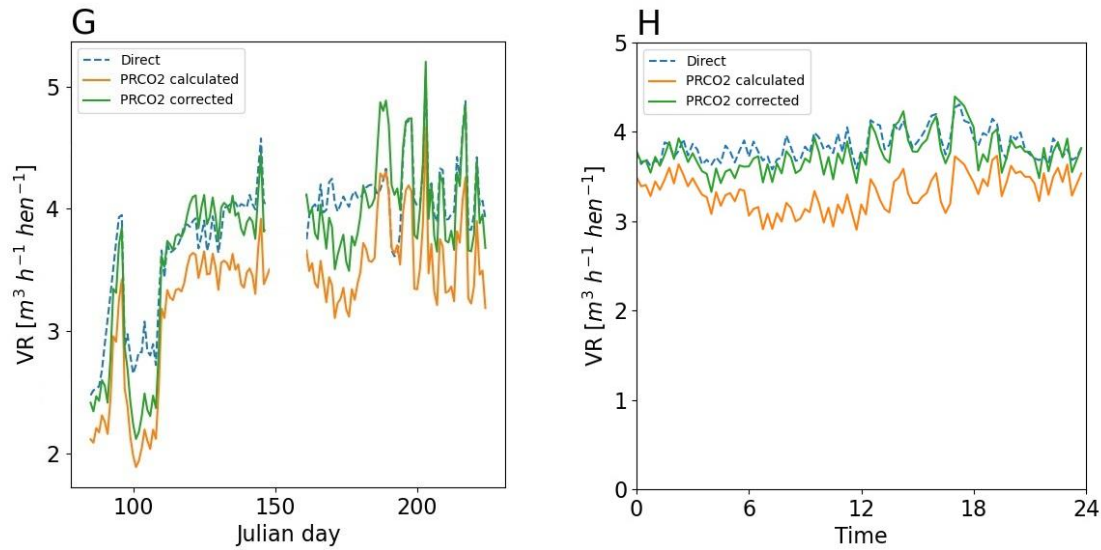


**Figure 22.** Comparison between VR calculated by the direct method and a few adaptations of the CO<sub>2</sub> balance method: (A) CIGR equation by Julian day; (B) CIGR equation by time; (C) animal activity adaptation by Julian day; (D) animal activity adaptation by time; (E) respiration quotient adaptation by Julian day; (F) respiration quotient adaptation by time; (G) PRCO<sub>2</sub> calculation and correction adaptation by Julian day; (H) PRCO<sub>2</sub> calculation and correction adaptation by Julian day. Note: hour of day data covers the interval from 00:00 to 23:45.

The model using the AA calculation (Eq. 17) led to a significant drop in performance, with an  $R^2$  of 0.28 and an RMSE of  $11.58 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$  (Figure 22C and D). This suggests that incorporating AA may not accurately capture the actual metabolic activity of hens in the evaluated conditions. Specifically, the ventilation rate in the research facility was primarily regulated by ambient temperature setpoints, rather than by animal activity, a practice similar to those observed in commercial barns. Additionally, laying hens are known for exhibiting relatively stable activity within light and dark periods due to their strong behavioral sensitivity to abrupt light transitions (Khalil et al., 2004; Mishra et al., 2005). While sharp activity shifts may occur at lights-on and lights-off, activity remains fairly constant during the rest of the period, which deviates from the smooth diurnal variation assumed by sinusoidal models commonly used in other species. This behavioral stability was reflected in our hourly AA calculations, which resulted in a daily average very close to 1 (0.98), supporting the use of a constant activity level ( $AA = 1$ ) as a reasonable assumption for modeling purposes in laying hen facilities (Pedersen et al., 2002). Therefore, sinusoidal AA models may not be suitable for this species and incorporating more physiologically or behaviorally realistic representations, possibly based on direct activity monitoring or refined light-period modeling could improve future estimates.

The RMSE and  $R^2$  values obtained for the different RQ inputs were similar, suggesting minor practical impact on the model's predictive performance (Figure 22E and F). However, the RQ values of 0.90 during the day and 0.85 at night showed the highest  $R^2$  (0.61) and lowest RMSE ( $0.87 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ ) (Annexe 2). These findings suggest that RQ values may provide a more accurate representation of the metabolic conditions of hens at different times of the day. Previous research has demonstrated that RQ values fluctuate with the age and metabolic state of hens, thereby influencing  $\text{CO}_2$  production rates and the efficiency of ventilation systems (Liu et al., 2016). Several studies have directly measured  $\text{O}_2$  consumption and  $\text{CO}_2$  production to determine RQ values in laying hens. For instance, Hayes et al. (2013) conducted long-term monitoring of Hy-Line Brown hens housed in two commercial aviary houses, using a paramagnetic  $\text{O}_2$  analyzer and a photoacoustic  $\text{CO}_2$  analyzer over 19 months. Both houses operated under similar management practices, with the main difference being a 20-week age gap between the two flocks. The authors reported RQ values ranging from 0.60 to 1.23, with average daily values (mean  $\pm$  SE) of  $0.94 \pm 0.01$  and  $0.95 \pm 0.01$  for houses 2 and 3, respectively. Similarly, Chepete & Xin (2004) used large-scale indirect calorimetry chambers designed to simulate commercial production conditions to measure RQ during daily light and dark periods at individual bird and room levels. Their study, which focused on W-36 pullets and layers housed in cages with ad libitum feeding and nipple drinkers for water access, reported RQ values ranging from 0.88 to 0.96, with an average of 0.91 for laying hens between 21 and 64 weeks of age. Additionally, Liu et al. (2016) found that RQ values differed by age, reporting an average of 0.88 for laying hens younger than 28 weeks and 0.82 for those older than 28 weeks. They also highlighted that uncertainties in VR modeling partly arise from uncertainties in the RQ used. Specifically, the RQ can theoretically vary between 0.76 and 1.17, and a 10% error in RQ can cause approximately a 7% error in  $\text{CO}_2$  production estimates. Moreover, variability in  $\text{CO}_2$  production not captured by RQ further contributes to modeling uncertainties. In our study, RQ variability did not significantly affect VR estimation, as the observed values remained within a narrow and predictable range. However, future research could benefit from direct measurements of  $\text{O}_2$  and  $\text{CO}_2$  to refine RQ estimations further and improve model accuracy.

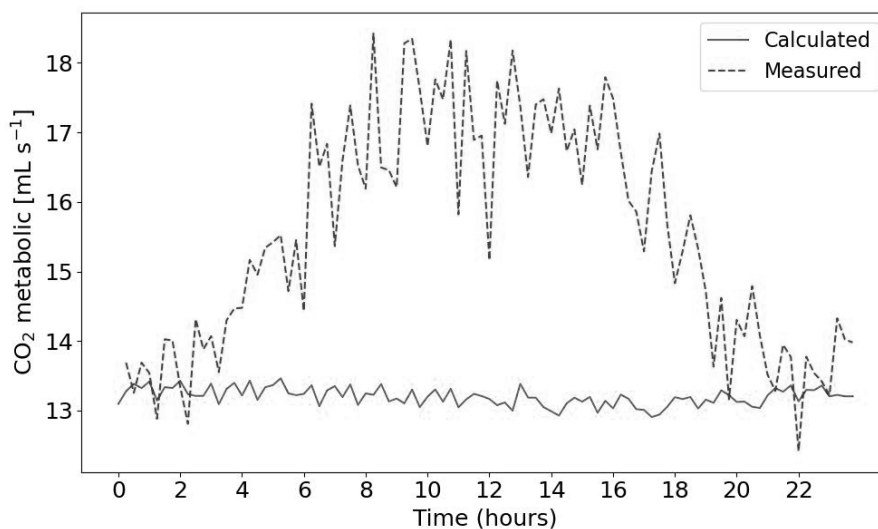


**Figure 23.** Calculated vs measured CO<sub>2</sub> metabolic rates.

The model with the PRCO<sub>2</sub> calculated by Eq. 9 showed slight improvement, with an  $R^2$  of 0.61 and an RMSE of  $0.83 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ . The calculated PRCO<sub>2</sub> likely provides a more direct measure of the hens' metabolic output, offering a more accurate basis for estimating VR (Figure 23). The study's light schedule, which varied from 13 to 14 hours daily, directly impacted the hens' behaviour and metabolic activity. During periods of inactivity, such as when hens are resting or sleeping, metabolic rates decrease, leading to lower CO<sub>2</sub> production. These periods typically align with the dark phase of the light schedule when the hens are less active. This variation must be accounted for in models estimating VR, as it affects the accuracy of CO<sub>2</sub>-based calculations. An adjustment was applied to align the estimated VR with actual measurements better and to account for variations in metabolic activity and CO<sub>2</sub> production between day (6:00 AM to 5:59 PM) and night (6:00 PM to 5:59 AM) periods. As shown in Fig. 21, a consistent discrepancy was observed between the metabolic CO<sub>2</sub> emissions calculated using equation 9 and those measured in the rooms. The measured CO<sub>2</sub> emissions were determined by calculating the CO<sub>2</sub> flow in  $\text{mL s}^{-1}$  utilizing the concentration of CO<sub>2</sub> in the room air and the ventilation rate. On average, the calculated values underestimated measured emissions by 18% during the day and 8% at night. These percentages were therefore applied as correction factors. These values were established by analyzing the difference between the VR curves from direct and CO<sub>2</sub> balance methods. Although the values by the CO<sub>2</sub> balance method underestimated the measurements, the curves followed a similar trend (Figs. 21G and H). The bias was calculated as the average difference between the two curves, leading to adjustments that improved the alignment between predictions and measurements. This adjustment achieved an  $R^2$  of 0.62 and an RMSE of  $0.72 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ hen}^{-1}$ .

The AA, RQ, and  $PRCO_2$  are variables related to animal metabolism that depend on certain factors, including light exposure (England & Ruhnke, 2020), feeding schedules (Yan et al., 2023), and environmental conditions within the housing system (Rosario Díaz et al., 2018). As mentioned above, hens exhibit diurnal variations in their metabolic rates, closely linked to their exposure to light. Hens are more active during daylight hours, leading to increased feed intake and higher metabolic rates, which results in greater  $CO_2$  production as their bodies process the nutrients from their feed (Blatchford et al., 2012; Olanrewaju et al., 2015). Feed intake is another critical factor affecting their metabolic rate. When hens consume feed, their metabolic rate rises to process nutrients, leading to increased  $CO_2$  production (Barzegar et al., 2020). Heat production varies with the feeding schedule, peaking during daylight hours when animals are active (Pedersen et al., 2015). Likewise, Ouwerkerk and Pedersen (1994) stated that RQ depends on the metabolic rate, feed intake, and the individual status of the animal. The commercial feed provided to the hens and the feeding schedule significantly influenced their metabolic activity and  $CO_2$  output. Hens fed ad libitum exhibit higher metabolic activity and thus higher  $CO_2$  production (Teofilo et al., 2022; Koutsoyiannis et al., 2023). Environmental factors such as temperature and humidity influence metabolic rates and  $CO_2$  production. According to Koutsoyiannis et al. (2023), elevated temperatures can lead to increased  $CO_2$  production because of heightened respiratory activity for thermoregulation (e.g., panting). However, equations 10a y 10b accounts for heat dissipation requirements by adjusting the THP: at higher ambient temperatures, hens release less sensible heat, resulting in lower corrected THP values, even when  $CO_2$  production increases. This study also established that lower temperatures could reduce metabolic rates and  $CO_2$  output. At night, lower outdoor temperatures reduce heat transmission and losses, leading to lower VRs and higher indoor humidity than expected (Pedersen et al., 2015; Chauhan et al., 2023). Similarly, humidity levels can impact the respiratory efficiency of hens, affecting their metabolic  $CO_2$  production (Wasti et al., 2020). By not accounting for these environmental variations, the CIGR equation's assumption of uniform conditions contributed to the overestimation of VRs.

The final adaptation, which incorporates the percentage of adjustments to the calculated  $PRCO_2$ , sets AA to 1, and specifies RQ values for day and night, yields the best model performance. This comprehensive approach effectively integrated the most accurate predictors of VR, resulting in a model that provides precise and reliable estimates. The final equation used to estimate VR with the  $CO_2$  balance adapted method is given by:

$$VR_{CO_2} = \frac{PRCO_2}{([CO_2]_e - [CO_2]_i)} * AA * 3600 \quad (19)$$

where:

- $VR_{CO_2}$ : ventilation rate estimated by the  $CO_2$  balance adapted method ( $m^3 h^{-1}$ );
- $PRCO_2$ : total  $CO_2$  production ( $mL s^{-1}$ ), as calculated by eq. 9:

$$PRCO_2 = \left[ \frac{THP}{\frac{16.18}{RQ} + 5.02} * (1 + c) \right] + CO_{2manure} \quad (20)$$

where:

- THP: total heat production, corrected for ambient temperature ( $W hen^{-1}$ ), from Eqs. 10a and 10b;
- RQ: respiratory quotient, i.e. 0.85 during daytime (06:00–17:59) and 0.90 during nighttime (18:00–05:59) (dimensionless);
- $CO_{2manure}$ :  $CO_2$  emissions from manure ( $mL s^{-1}$ );
- c: correction for daytime and nighttime metabolic  $CO_2$  variations, i.e. 0.18 during daytime and 0.08 at nighttime.
- $[CO_2]_e$ : exhaust  $CO_2$  concentration (ppm);
- $[CO_2]_i$ : inlet  $CO_2$  concentration (ppm);
- AA: animal activity factor, for laying hens = 1 (dimensionless);
- 3600: conversion factor from seconds to hours.

The total propagated uncertainty in VR was estimated to be  $\pm 6.2\%$ .

### 3.5.3. Model validations

#### *First laboratory experiment*

The adapted  $CO_2$  balance model was validated in CF conditions of Gonzalez-Mora et al. (2021), obtaining an  $R^2$  of 0.09 and an RMSE of  $4.51 m^3 hr^{-1} hen^{-1}$  (Table 10). This is likely due to the intrinsic characteristics of each housing system, such as increased mobility and space, which introduce greater variability in the model variables. Additionally, the validation revealed another factor that diminishes the predictive potential of the adapted  $CO_2$  balance model. The model can be error-prone when the threshold difference between the exhaust and inlet  $CO_2$  concentrations is not sufficiently high (Figure 24). This may be attributed to the experimental conditions in the first study (Gonzalez-Mora et al., 2021), where only 12 hens were housed per room. In such small-scale setups, the ventilation rate per hen ( $6.44 \pm 1.45 m^3 h^{-1} hen^{-1}$ ) was substantially higher than under commercial conditions, likely diluting the metabolic  $CO_2$  and thereby reducing the concentration gradient. The threshold difference observation aligns with Liu et al. (2016), who summarized baseline data on  $CO_2$  production by laying

hens and identified uncertainties in the CO<sub>2</sub> balance approach for estimating VR. They found that model accuracy decreased when including data where the differences between exhaust and inlet CO<sub>2</sub> concentrations did not exceed 50 ppm. In this model, the highest correlation was observed when the difference exceeded 150 ppm. However, accuracy decreased beyond 200 ppm<sub>v</sub> due to missing data.

**Table 11.** Comparison of VR by direct method and adapted CO<sub>2</sub> balance methods considering the threshold of differences between the exhaust and inlet CO<sub>2</sub> concentrations

| CO <sub>2</sub> Concentrations delta | Data Points | Direct VR (m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> )* | Adapted CO <sub>2</sub> balance VR (m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> )* | MAE  | MSE   | R <sup>2</sup> | RMSE (m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|----------------|-----------------------------------------------------------|
| >0                                   | 4748        | 6.40 ±1.45                                                      | 7.01 ±4.69                                                                               | 1.53 | 20.35 | 0.09           | 4.51                                                      |
| >50                                  | 4743        | 6.40 ±1.45                                                      | 6.93 ±3.47                                                                               | 1.45 | 10.45 | 0.15           | 3.23                                                      |
| >100                                 | 4646        | 6.39 ±1.45                                                      | 6.54 ±2.10                                                                               | 1.08 | 2.79  | 0.38           | 1.67                                                      |
| >150                                 | 4576        | 6.35 ±1.34                                                      | 6.38 ±1.64                                                                               | 0.98 | 1.36  | 0.51           | 1.17                                                      |
| >200                                 | 4475        | 6.24 ±1.10                                                      | 6.27 ±1.48                                                                               | 0.97 | 1.31  | 0.41           | 1.15                                                      |

\*Values are means ± standard deviations

MAE: mean absolute error

MSE: mean squared error

R<sup>2</sup>: Determination coefficient

RMSE: root mean squared error

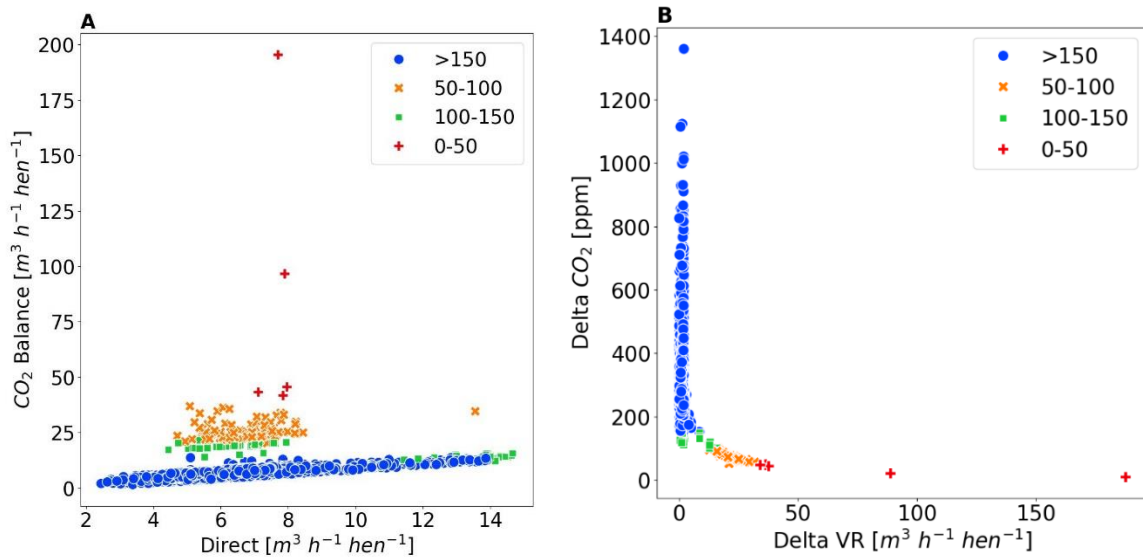


**Figure 24.** (A) Comparison of VR by the direct method and the adapted CO<sub>2</sub> balance method considering the threshold of differences between exhaust and inlet CO<sub>2</sub> concentrations. (B) Differences between exhaust and inlet CO<sub>2</sub> concentrations (Delta CO<sub>2</sub>) vs differences between VR by direct method and adapted CO<sub>2</sub> balance (Delta VR).

## Second laboratory experiment

The results (figure 23) from the adapted CO<sub>2</sub> balance model validated in the three laying hen housing systems (Philippe et al., 2020) revealed varying performance metrics in VR by the direct method and the adapted CO<sub>2</sub> balance. Values for MAE and MSE were similar for the three systems, but CF achieves the highest R<sup>2</sup>, suggesting the best overall fit to the data, followed by CC and EC (Table 12). In this case, the difference between inlet and exhaust CO<sub>2</sub> concentrations was greater than 200 ppm<sub>v</sub> for all data points. Although CF housing systems are generally associated with increased variability due to greater hen mobility and environmental heterogeneity, the better model performance in the second experiment can be attributed to other experimental conditions, such as higher CO<sub>2</sub> differentials and a larger number of animals.

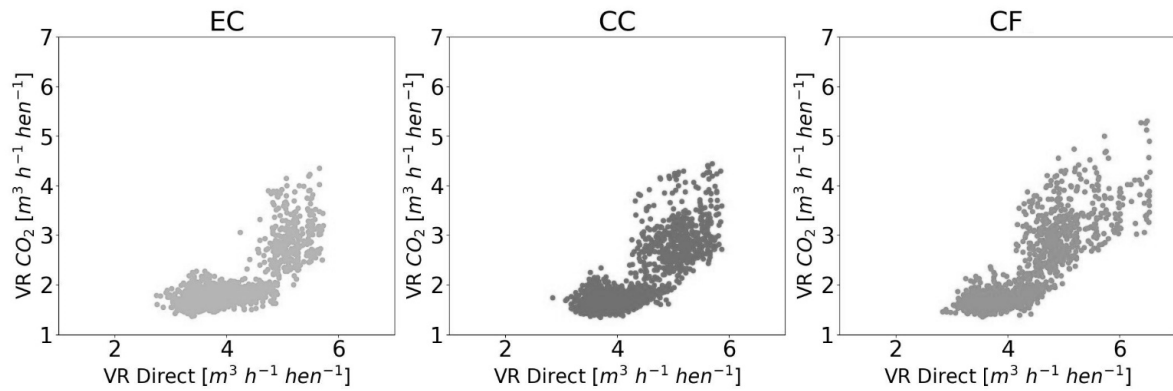


**Figure 25.** Comparison of VR by direct method and adapted CO<sub>2</sub> balance for the enriched cage (EC) system, conventional cage (CC) system, and cage-free system (CF) under laboratory conditions.

**Table 12.** Comparison of VR by direct method and adapted CO<sub>2</sub> balance for the system

| System | Data Points | VR calculated by the direct method (m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> )* | VR calculated by the adapted CO <sub>2</sub> balance model (m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> )* | MAE  | MSE  | R <sup>2</sup> | RMSE (m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> ) |
|--------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|----------------|-----------------------------------------------------------|
| CC     | 1951        | 4.16 ± 0.65                                                                              | 1.99 ± 0.61                                                                                                      | 2.17 | 4.85 | 0.67           | 2.20                                                      |
| EC     | 1959        | 3.97 ± 0.65                                                                              | 1.93 ± 0.50                                                                                                      | 2.04 | 4.30 | 0.63           | 2.07                                                      |
| CF     | 1954        | 4.10 ± 0.71                                                                              | 2.06 ± 0.72                                                                                                      | 2.03 | 4.28 | 0.72           | 2.07                                                      |

\*Values are means ± standard deviations

MAE: mean absolute error

MSE: mean squared error

R<sup>2</sup>: Determination coefficient

RMSE: root mean squared error

### 3.5.4. Commercial validation

For the commercial validation, all three systems correlate well with the model with  $R^2$  greater than 0.60 on the experimental level (Table 13). The EC system exhibits a strong correlation with moderate error metrics and a higher  $R^2$ . This strong correlation is likely influenced not only by the system's moderate variability in CO<sub>2</sub> production, but also by the larger number of data points available for this system. Conversely, the CF system shows the highest error metrics (MAE, MSE, and RMSE), indicating larger deviations between the predicted and actual VR values despite having a good  $R^2$ . This suggests that the variability in CO<sub>2</sub> production due to the dynamic and varied activities of hens in cage-free systems results in higher prediction errors. At the same time, the model captures the overall trend well. The CC system presents a lower correlation. However, this could be attributed to the data size compared to the data size from the other two systems.

**Table 13.** Comparison of VR by direct method and adapted CO<sub>2</sub> balance for the validation with commercial housing systems.

| System | Data Points | VR calculated by Direct method (m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> )* | VR calculated by adapted CO <sub>2</sub> balance model (m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> )* | MAE  | MSE  | R <sup>2</sup> | RMSE (m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> ) |
|--------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|----------------|-----------------------------------------------------------|
| CC     | 12          | 0.64 ± 0.29                                                                          | 0.76 ± 0.21                                                                                                  | 0.16 | 0.05 | 0.62           | 0.21                                                      |
| EC     | 28          | 1.98 ± 2.95                                                                          | 2.56 ± 3.46                                                                                                  | 0.63 | 1.35 | 0.92           | 1.16                                                      |
| CF     | 20          | 1.31 ± 1.46                                                                          | 2.38 ± 3.54                                                                                                  | 1.43 | 6.60 | 0.74           | 2.57                                                      |

\*Values are means ± standard deviations

MAE: mean absolute error

MSE: mean squared error

R<sup>2</sup>: Determination coefficient

RMSE: root mean squared error

### 3.6. Impact of housing systems on the validation performance

The level of environmental control in each system significantly influences model performance. In cage systems (CC and EC), hens are confined to controlled spaces that could produce more uniform CO<sub>2</sub> production rates. The restricted space limits movement, leading to stable metabolic rates and predictable CO<sub>2</sub> output (Tactacan et al., 2009; Zhao et al., 2014; Liu et al., 2020). The limited space and consistent diet also contribute to predictable metabolic processes, resulting in less variation in RQ (Chepete et al., 2004; Barzegar et al., 2020). This stability could simplify the integration of PRCO<sub>2</sub> and RQ into the CO<sub>2</sub> balance model, facilitating easier VR prediction. In CF systems, hens have more freedom to move, perch, and engage in natural behaviours, leading to higher and more variable PRCO<sub>2</sub> due to increased activity levels and changes in metabolic processes. This variability

in activity and diet influences RQ, affecting the accuracy of models used to estimate VRs (Hayes et al., 2012; Barzegar et al., 2020). Consequently, the model requires flexibility to adjust PRCO<sub>2</sub> and RQ values based on real-time metabolic states and behavioural patterns.

Several studies have assessed VR for laying hens by the CO<sub>2</sub> balance method (Li et al., 2004; Liu et al., 2016; Pedersen et al., 1998; Rosa et al., 2019). However, none of these studies were conducted on systems without cages. For instance, the experimental design of Pedersen et al. (1998) included a CF system, but due to inherent differences between the housing systems (in nine buildings), the hens were kept in cages in six buildings and aviary systems in the remaining three. Consequently, only the largest group with cages was considered for the regression analysis. In addition, the authors used time interval integration for their data into intervals, improving their models' predictive ability. Pedersen et al. (1998) studied VR in livestock buildings for laying hens and found that the CO<sub>2</sub> balance method provided good results with an R<sup>2</sup> of 0.90 on a 24-hour basis. Li et al. (2004) compared the VR obtained by direct measurement with the CO<sub>2</sub> balance in a commercial laying hen house at different time intervals (each hour, every two hours, and daily). The results showed strong correlations (R<sup>2</sup> above 0.90). As Carranza-Diaz et al. (2025) observed using time interval integration positively reduces the noise and variability in the data.

With the adaptations used in this study, the model can be used for CC, EC, and CF systems, allowing for more continuous VR calculations. Under an experimental scale scenario, the model demonstrates consistent performance across various systems, but fine-tuning is particularly critical in CF systems. The significant variability in hen behaviour and environmental factors in these systems lead to greater fluctuations in CO<sub>2</sub> production, introducing larger errors and more accurately reflecting the complexity of real-world conditions. On a commercial scale, although the application has been limited to a small number of farms and a single climate region, the robust model results suggest its potential for broader use. These promising outcomes indicate that, with further validation and refinement, the adapted CO<sub>2</sub> balance model could become a valuable tool for accurately predicting VR across diverse poultry farming systems and regions, ultimately enhancing management practices and animal welfare. Further research should investigate several key factors influencing CO<sub>2</sub> production. For example, light exposure and feeding schedules affect birds' metabolic activity and behavior, impacting CO<sub>2</sub> output. Moreover, manure management, including removal frequency, bedding substrate, and accumulation patterns, plays a dual role: directly contributing to CO<sub>2</sub> emissions through microbial decomposition, and indirectly affecting animal behavior, especially in CF systems where birds interact more with the litter, increasing exploratory activity and metabolic

demand. Integrating these parameters could help improve model accuracy and adaptability across a broader range of commercial settings.

This study adapted and validated the CO<sub>2</sub> balance method to predict VR in laying hen housing systems. The key findings highlight the ability of the model to improve prediction accuracy through PRCO<sub>2</sub>, and RQ adjustments, particularly in controlled environments. Although the model initially exhibited variability, further refinements resulted in significant improvements, leading to a helpful tool for predicting VRs. This research provides a reliable method for estimating VR, which could enable more precise airflow control when integrated into monitoring systems over the long term. By accurately determining VR, this approach allows for reliable measurements of CO<sub>2</sub> emissions based on concentration levels, helping industry better understand their environmental impact.

### **3.7. Conclusions**

This study adapted and validated the CO<sub>2</sub> balance method for calculating VR in laying hen housing systems. The results highlight the potential of the adapted model to provide accurate VR estimates, even under varying conditions. The original CO<sub>2</sub> balance model, derived from the CIGR equation, exhibited limitations in capturing the full range of factors affecting VR, resulting in high prediction errors. However, incorporating specific RQ values for day and night, and adjusting the PRCO<sub>2</sub>, significantly improved the model's accuracy, yielding the best performance. This comprehensive adaptation demonstrates the model's potential for more precise VR estimation.

The adapted model was validated across three housing systems (CC, EC, and CF) at both the experimental and commercial scales. Despite the inherent differences in hen activity and environmental conditions among these systems, the model consistently achieved high R<sup>2</sup>, indicating good predictive capability. The commercial validation of the adapted CO<sub>2</sub> balance model demonstrates a good correlation, despite the limited number of farms and the model's application in only one climate region.

Unlike direct measurement techniques, the adapted method is less resource-intensive and more feasible for on-farm application, offering a practical and scalable tool for estimating VR in commercial poultry production. This enables more accurate emission factor calculations and supports real-time monitoring efforts for environmental management.

Beyond its practical application, this study addresses knowledge gaps by critically evaluating core modeling assumptions, such as the appropriateness of constant versus variable activity profiles and

the impacts of ambient temperature, housing design, and CO<sub>2</sub> gradients on model reliability. Although some initial prediction variability was observed, targeted refinements reduced error and confirmed the model's robustness across multiple systems. Additionally, this work contributes to the field by improving the accessibility and accuracy of VR estimation methods, encouraging their integration into routine environmental monitoring in poultry operations, and laying a foundation for future studies focused on refining physiological parameters, breed-specific CO<sub>2</sub> production, and manure emission dynamics.

# Conclusion

## Sommaire

Ce projet visait à évaluer la précision des méthodes indirectes pour le calcul du TV dans les fermes de poules pondeuses, en se concentrant sur les systèmes d'hébergement en CC, en CE et en V. L'importance de la ventilation a été mise en évidence, non seulement pour le bien-être animal, mais aussi pour la gestion des émissions de GES et de  $\text{NH}_3$ .

L'impact des systèmes d'hébergement (CC, CE et V) sur les émissions gazeuses dans les élevages de poules pondeuses a été examiné. À travers une série d'échantillonnages menés dans trente fermes de production d'œufs du sud du Québec, les concentrations de GES, comprenant le  $\text{CO}_2$ , le  $\text{CH}_4$  et le  $\text{N}_2\text{O}$ , et de  $\text{NH}_3$ , la vitesse de l'air, l'humidité et la température ont été mesurées à l'intérieur des bâtiments d'élevage. Les résultats indiquent que, bien que la différence ne soit pas significative, les V présentent des émissions de  $\text{CO}_2$  plus élevées par rapport aux systèmes en CC et CE. Cette différence est largement attribuée à la gestion de la ventilation, qui est cruciale pour le contrôle des émissions et le bien-être animal. Le manque de ventilation adéquate (soit par la capacité des ventilateurs, soit par la valeur de consigne de fonctionnement) dans les systèmes de volière, associés à une plus grande quantité d'oiseaux, peut conduire à des niveaux de pollution de l'air plus élevés, affectant non seulement la santé des oiseaux, mais aussi la qualité de l'air dans les installations. Il a été souligné que la ventilation est un facteur essentiel pour la gestion des émissions, car elle influence directement les conditions environnementales au sein des fermes. Les concentrations de gaz n'affectent pas seulement l'environnement, mais peuvent également avoir un impact sur les performances des poules pondeuses, ce qui met en évidence la nécessité d'une approche équilibrée conciliant le bien-être animal et les considérations environnementales.

Étant donné l'importance de la ventilation dans le calcul des émissions, une deuxième étape a consisté à évaluer deux méthodes indirectes pour estimer le taux de ventilation : le bilan de  $\text{CO}_2$  et le bilan thermique. Les mesures directes peuvent être très exigeantes en termes de main-d'œuvre, de temps, et nécessitent souvent un équipement coûteux. Ces défis limitent leur capacité à fournir des données continues et à grande échelle. En revanche, les méthodes indirectes, offrent une alternative intéressante. Elles permettent de dériver le taux de ventilation à partir de mesures plus accessibles et moins intrusives, telles que les concentrations de gaz ou la température ambiante, tout en requérant moins de ressources pour les mesures continues. Pour y arriver, des données provenant des expérimentations réalisées par Fournel et al. (2012) ont été utilisées. Les résultats initiaux ont montré

une faible corrélation ( $R^2 = 0,28$ ) entre les estimations des méthodes indirectes et les mesures directes de taux de ventilation. Cela a mis en évidence la nécessité d'améliorer la précision des techniques d'estimation. Pour remédier à cette insuffisance, un processus d'agrégation journalière et horaire des données a été mis en œuvre, consistant à collecter et à faire la moyenne des données par intervalles horaires et quotidiens. Les résultats ont montré que parmi les méthodes évaluées, la méthode du bilan  $\text{CO}_2$  a fait preuve d'une plus grande précision. Bien que les deux méthodes reposent sur des hypothèses, la méthode du bilan de  $\text{CO}_2$  s'est avérée mieux adaptée à l'estimation du taux de ventilation, en particulier lorsque l'agrégation des données journalière a été appliquée, ce qui a considérablement amélioré sa précision par rapport à la méthode du bilan thermique. En outre, la méthode du bilan de  $\text{CO}_2$  nécessite moins de variables d'entrée pour déterminer le taux, ce qui réduit le risque d'erreurs. De cette étape, il est possible de conclure que, bien que les méthodes indirectes puissent être utiles pour estimer le taux de ventilation, leur efficacité dépend de la qualité des données et de l'application de techniques d'analyse appropriées. Des variables clés ont également été identifiées (activité animale, production métabolique de  $\text{CO}_2$  et taux de respiration), mettant en avant la nécessité d'une approche adaptative pour améliorer les estimations dans des environnements ovocoles.

Étant donné l'influence des variables de la dynamique du métabolisme animal, la dernière étape du projet a été dédiée à l'adaptation et la validation de la méthode du bilan de  $\text{CO}_2$ . Pour proposer les adaptations nécessaires, les données collectées d'une expérimentation en laboratoire impliquant des poules pondeuses dans des cages conventionnelles (CC) ont été utilisées. Une validation du modèle adapté a ensuite été réalisée à l'aide des données d'une autre étude menée dans les mêmes conditions contrôlées. Une validation en milieu commercial a suivi à l'aide des données recueillies lors de la première étape du projet (chapitre 1). Les validations ont montré que le modèle pouvait prédire le taux de ventilation dans l'élevage des poules pondeuses avec une précision considérable, notamment grâce à l'adaptation de variables telles que le coefficient respiratoire (valant 0,90 pendant la journée et 0,85 pendant la nuit), le taux de production de  $\text{CO}_2$  (avec une correction de +18 % pendant le jour et de +8 % pendant la nuit), ainsi que l'activité animale. Bien que l'activité animale soit fixée à 1 dans certains cas, ce paramètre peut varier au cours de la journée pour refléter les fluctuations horaires réelles de l'activité des animaux, ce que le modèle prend en compte. Cette modulation horaire de l'activité permet d'améliorer l'exactitude des prédictions du taux de ventilation. De plus, le modèle fonctionne lorsque la différence entre les niveaux de  $\text{CO}_2$  intérieur et extérieur était inférieure à 150 ppm. La validation tant au niveau expérimental que commercial d'un modèle de bilan de  $\text{CO}_2$ , indépendant du système de logement, peut fournir des outils utiles aux producteurs ovocoles. La mise

en œuvre de ce modèle peut contribuer à une meilleure gestion de la ventilation, alignant durabilité environnementale et bien-être animal.

Les résultats obtenus à travers l'évaluation des différentes méthodes indirectes et leurs adaptations respectives peuvent aider les chercheurs et/ou les producteurs à choisir le modèle le plus approprié en fonction de leurs besoins spécifiques et du niveau de précision requis. Par exemple, si seules des données journalières sont disponibles, le modèle basé sur le bilan de CO<sub>2</sub> avec données agrégées est une option valable. Si la différence de concentration de CO<sub>2</sub> est très faible, la méthode basée sur le bilan thermique pourrait être plus adaptée. En revanche, si des données à intervalles très courts (de quelques minutes) sont requises, les adaptations proposées permettent d'améliorer la précision dans ce contexte spécifique. Pour faciliter cette prise de décision, un outil a été développé et est présenté au Tableau 14 et à la Figure 26 afin de guider l'utilisateur dans le choix du modèle le plus approprié selon ses conditions particulières.

**Tableau 14.** Résumé des résultats de chaque méthode

| Méthode                                                          | R <sup>2</sup> | RMSE<br>(m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> poule <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------|
| Bilan de CO <sub>2</sub> sans agrégation                         | 0.28           | 1.46                                                          |
| Bilan thermique sans agrégation                                  | 0.07           | 1.01                                                          |
| Bilan de CO <sub>2</sub> avec moyenne quotidienne                | 0.85           | 0.22                                                          |
| Bilan thermique avec moyenne quotidienne                         | 0.55           | 0.36                                                          |
| Bilan de CO <sub>2</sub> avec moyenne horaire                    | 0.28           | 0.17                                                          |
| Bilan thermique avec moyenne horaire                             | 0.46           | 0.14                                                          |
| Bilan de CO <sub>2</sub> adapté (données sans agrégation)        | 0.63           | 0.72                                                          |
| Bilan de CO <sub>2</sub> adapté (delta CO <sub>2</sub> <150 ppm) | 0.09 - 0.51    | 4.51 - 1.17                                                   |

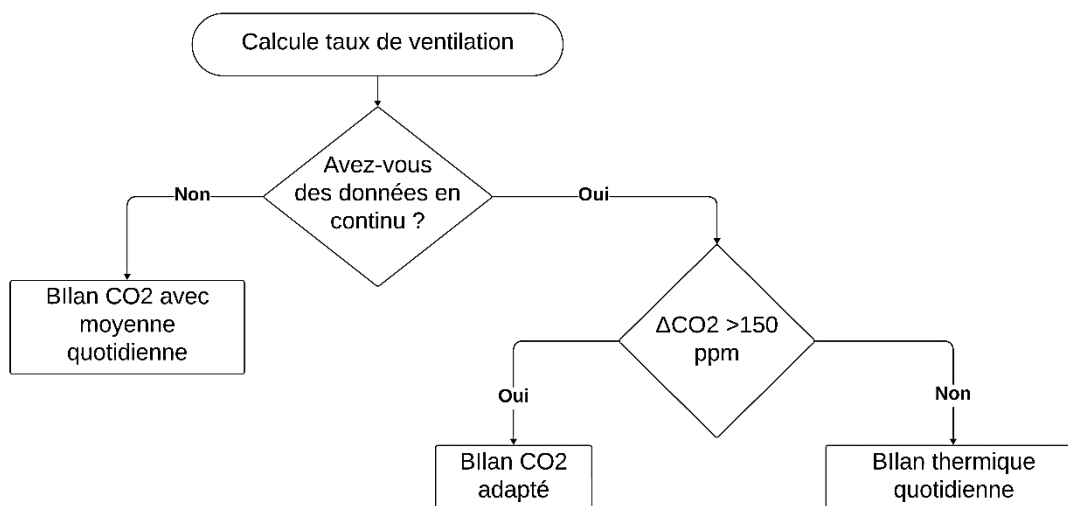


**Figure 26.** Arbre de décision pour choisir la méthode à utiliser.

## Contributions

Ce projet de thèse a apporté plusieurs contributions importantes au domaine de la gestion de la ventilation dans les systèmes d'élevage de poules pondeuses. Premièrement, une contribution majeure réside dans la comparaison des émissions de gaz de trois types de systèmes de logement pour poules pondeuses. Il est important de noter qu'il existe peu d'études antérieures sur ce sujet dans le contexte commercial du Québec, en particulier pour des systèmes d'élevage de poules pondeuses sous conditions climatiques spécifiques. La recherche sur les émissions dans les élevages ovocoles sous des climats froids, comme celui du Québec, est encore limitée. Cette lacune dans la littérature rend cette étude particulièrement pertinente pour l'industrie ovocole québécoise, où les conditions climatiques peuvent influencer significativement la gestion de la ventilation et les émissions de gaz.

Considérant l'importance de la ventilation, les résultats ont montré que le bilan de CO<sub>2</sub> fournissait des estimations plus précises pour connaître le taux de ventilation dans un contexte de production d'œufs, en particulier lorsque les données étaient agrégées à la journée. L'agrégation des données a significativement amélioré la fiabilité des estimations de la ventilation pour les deux méthodes, ce qui constitue une avancée par rapport aux études antérieures qui se concentraient sur des mesures à court terme. Cette étude a particulièrement mis en lumière l'importance d'intégrer des éléments dynamiques, tels que les variations du métabolisme des animaux, améliorant ainsi la précision des modèles. Les corrections apportées au modèle de bilan de CO<sub>2</sub> ont été cruciales, car elles considéraient les variations de l'activité métabolique des poules pondeuses, en ajustant l'activité animale, le quotient respiratoire et la production de CO<sub>2</sub> selon le moment de la journée. Ces ajustements ont permis de mieux refléter les conditions réelles des systèmes d'élevage, augmentant ainsi la robustesse du modèle. Les validations effectuées ont montré une excellente capacité prédictive du modèle, tant au niveau expérimental que commercial, ce qui souligne son utilité pour l'élevage de poules pondeuses. Également, la différence minimale entre les concentrations en CO<sub>2</sub> extérieur et intérieur a également été identifiée et permis d'obtenir une corrélation plus élevée entre les simulations et observations. Il est important de noter qu'il n'existe pas d'études antérieures qui se soient penchées sur ce type de méthode pour des systèmes de logement sans cages. Cela fait de cette recherche une contribution innovante, qui offre de nouvelles perspectives pour la mesure et la gestion de la ventilation ainsi que le contrôle des émissions dans les élevages de poules pondeuses. En ce sens, cette étude présente une approche innovante en offrant un outil d'aide à la décision et des recommandations pratiques pour le choix du modèle de ventilation le plus adapté en fonction des besoins spécifiques et du niveau de précision requis.

L'incorporation des adaptations étudiées dans ce projet a également montré des bénéfices tant au niveau expérimental que commercial. Avec l'amélioration du calcul du taux de ventilation, le projet a contribué à une meilleure compréhension des émissions, ce qui a des implications directes sur la santé des animaux. Une ventilation optimale favorise un environnement de vie sain pour les poules, réduisant les risques de maladies et d'infections, tout en garantissant la sécurité des travailleurs en minimisant leur exposition aux gaz nocifs. De plus, une meilleure gestion de la ventilation peut entraîner des avantages économiques significatifs, tels qu'une augmentation de la production et une réduction des coûts liés aux traitements de santé animale.

## **Recommandations pour l'avenir**

Cette étude ouvre plusieurs pistes de recherche visant à approfondir la gestion de la ventilation et des émissions dans le cadre de production d'œufs de consommation. Pour l'évaluation des émissions au niveau commercial, il est essentiel d'entreprendre des recherches à long terme pour mieux comprendre la dynamique entre les différents types de systèmes de logement et, ainsi, évaluer leurs effets sur la qualité de l'air, ainsi que sur la santé et le bien-être des animaux. Par ailleurs, l'évaluation des impacts de différents régimes alimentaires et de nouvelles pratiques de gestion sur les émissions de GES et de  $\text{NH}_3$  (tels que la gestion optimisée des excréments via le choix de litières ou la fréquence de nettoyage, ou encore l'adaptation des horaires d'alimentation) pourrait également apporter des données complémentaires précieuses pour la modélisation.

De même, il serait pertinent de continuer à affiner les modèles indirects de ventilation, notamment en développant des adaptations spécifiques aux conditions climatiques variées, comme celles que l'on retrouve dans d'autres régions froides ou dans des climats plus chauds et humides. Ces adaptations pourraient permettre d'étendre les résultats obtenus au Québec à d'autres zones géographiques, élargissant ainsi l'applicabilité des modèles de ventilation. Il est également essentiel d'intégrer des facteurs supplémentaires dans ces modèles. Parmi ces facteurs, la race des poules, la gestion des déjections et le temps d'exposition lumineuse devraient être considérés car ils peuvent influencer de manière significative la production de gaz par les animaux et les effluents et, par conséquent, les taux de ventilation. De plus, une autre amélioration serait d'augmenter le nombre de fermes commerciales échantillonnées. Cela permettrait de renforcer la précision des estimations et de mieux guider les pratiques de gestion de la ventilation et des émissions dans les systèmes commerciaux. En tenant compte de ces éléments, les modèles deviendraient plus robustes et mieux adaptés aux conditions réelles d'élevage ovicole. Des recherches futures pourraient également se concentrer sur l'évaluation des paramètres influençant la méthode thermique, tels que les différences de température entre l'intérieur et l'extérieur des installations, l'humidité relative et les niveaux d'activité des animaux.

L'optimisation de cette méthode pourrait inclure l'utilisation de capteurs avancés pour recueillir des données en temps réel, ainsi que l'intégration d'algorithmes d'apprentissage automatique pour analyser les données et prédire les besoins en ventilation (c'est-à-dire un jumeau numérique). En combinant ces éléments, il serait possible de créer des systèmes de gestion de la ventilation plus réactifs et adaptés aux conditions changeantes des élevages.

Il serait également bénéfique d'évaluer l'efficacité des modèles développés pour d'autres types d'animaux, tels que d'autres espèces d'oiseaux, ou même des animaux comme les bovins, ovins et porcins, en considérant leurs variables métaboliques spécifiques telles que le THP et le RQ, pour lesquels des équations (pour la production totale de chaleur, THP) et des plages de valeurs (pour le quotient de respiration, RQ) ont déjà été développées. Certaines parties du modèle, notamment celles relatives aux ajustements du métabolisme animal et aux calculs des bilans de CO<sub>2</sub> et thermique, pourraient être adaptées aux besoins spécifiques de ces autres espèces.

En résumé, la validation de ces méthodes dans des systèmes sans cages, qui deviennent de plus en plus courants dans l'industrie ovicole, constitue un axe de recherche important. Jusqu'à présent, peu d'études se sont penchées sur l'application des méthodes du bilan de CO<sub>2</sub> et du bilan thermique dans des systèmes de volière ou des systèmes en plein air, et cela représente une opportunité intéressante. Les systèmes en plein air posent toutefois des défis particuliers, notamment en raison de l'absence de confinement qui complique le contrôle des paramètres environnementaux (température, ventilation, humidité) et la mesure précise des flux gazeux. Ces contraintes techniques nécessitent des approches méthodologiques adaptées pour garantir la fiabilité des résultats.

# Bibliographie

- Al-Abdullatif, A., & Azzam, M. M. (2023). Effects of Hot Arid Environments on the Production Performance, Carcass Traits, and Fatty Acids Composition of Breast Meat in Broiler Chickens. *Life* 2023, Vol. 13, Page 1239, 13(6), 1239. <https://doi.org/10.3390/LIFE13061239>
- Albright, L. (1990). *Environment control for animals and plants* (P. DeVore-Hansen, Ed.; 4th ed.). ASAE.
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World Agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. In *WORLD AGRICULTURE*. [www.fao.org/economic/esa](http://www.fao.org/economic/esa)
- Al-Homoud, Dr. M. S. (2005). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 40(3), 353–366. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.013>
- ANSI, & ASABE. (2017). *Guidelines for Use of Thermal Insulation in Agricultural Buildings American Society of Agricultural and Biological Engineers*.
- Apalowo, O. O., Ekunseitan, D. A., & Fasina, Y. O. (2024). Impact of Heat Stress on Broiler Chicken Production. *Poultry* 2024, Vol. 3, Pages 107-128, 3(2), 107–128. <https://doi.org/10.3390/POULTRY3020010>
- APHA. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater 20th ed.* American Public Health Assoc.
- ASAE. (2003). *ASAE Standards - Standards Engineering Practices Data. 50th edition.* American Society of Agricultural Engineers.
- ASHRAE. (2005). *Engineering Analysis Of Experimental Data* (Issue 4, pp. 5–75).
- ASHRAE. (2017). Psychrometrics. In *2017 ASHRAE Handbook—Fundamentals*.
- Bacsik, Z., Mink, J., & Keresztury, G. (2004). FTIR Spectroscopy of the Atmosphere. I. Principles and Methods. *Applied Spectroscopy Reviews*, 39(3), 295–363. <https://doi.org/10.1081/ASR-200030192>
- Bacsik, Z., Mink, J., & Keresztury, G. (2005). FTIR Spectroscopy of the Atmosphere Part 2. Applications. *Applied Spectroscopy Reviews*, 40(4), 327–390. <https://doi.org/10.1080/05704920500230906>
- Barratt, D., Nguenpang, M. A., & Atkins, M. D. (2016). Fast-response Velocity and Shear Stress Measurements. In *Application of Thermo-Fluidic Measurement Techniques* (pp. 101–123). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809731-1.00004-6>
- Barreto-Mendes, L., Ferreira-Tinoco, I. de F., Ogink, N., Osorio-Hernandez, R., & Osorio-Saraz, J. A. (2014). A refined protocol for calculating air flow rate of naturally ventilated broiler barns based on co2 mass balance. *DYNA*, 81(185), 189. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n185.38069>
- Barzegar, S., Wu, S.-B., Choct, M., & Swick, R. A. (2020). Factors affecting energy metabolism and evaluating net energy of poultry feed. *Poultry Science*, 99(1), 487–498. <https://doi.org/10.3382/ps/pez554>
- Bist, R. B., Subedi, S., Chai, L., & Yang, X. (2023). Ammonia emissions, impacts, and mitigation strategies for poultry production: A critical review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 328). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116919>

- Blanes, V., & Pedersen, S. (2005). Ventilation Flow in Pig Houses measured and calculated by Carbon Dioxide, Moisture and Heat Balance Equations. *Biosystems Engineering*, 92(4), 483–493. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.09.002>
- Blatchford, R. A., Archer, G. S., & Mench, J. A. (2012). Contrast in light intensity, rather than day length, influences the behavior and health of broiler chickens. *Poultry Science*, 91(8), 1768–1774. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-02051>
- Bourque, P.-A. (2010). *Planète terre*. Université Laval.  
<http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/bibliographie.html>
- Brouwer, E. (1965). Report of Sub-Committee on Constants and Factors. In London: Academic Press (Ed.), *Proceeding of the 3rd Symposium on Energy Metabolism, May 1964* (pp. 441–443).
- Brown-Brandl, T. M., Hayes, M. D., Xin, H., Nienaber, J. A., Li, H., Eigenberg, R. A., Stinn, J. P., & Shepherd, T. (2014). Heat and Moisture Production of Modern Swine. *Agricultural and Biosystems Engineering Conference Proceedings and Presentations*, 534.
- Bustamante, E., García-Diego, F.-J., Calvet, S., Estellés, F., Beltrán, P., Hospitaler, A., & Torres, A. (2013). Exploring Ventilation Efficiency in Poultry Buildings: The Validation of Computational Fluid Dynamics (CFD) in a Cross-Mechanically Ventilated Broiler Farm. *Energies*, 6(5), 2605–2623. <https://doi.org/10.3390/en6052605>
- Calvet, S., Gates, R. S., Zhang, G. Q., Estellés, F., Ogink, N. W. M., Pedersen, S., & Berckmans, D. (2013). Measuring gas emissions from livestock buildings: A review on uncertainty analysis and error sources. *Biosystems Engineering*, 116(3), 221–231.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.11.004>
- Camirand, J., & Gingras, C. (2011). *Un élevage plus efficace : un gage de respect pour l'environnement*.
- Campbell, D. L. M., de Haas, E. N., & Lee, C. (2019). A review of environmental enrichment for laying hens during rearing in relation to their behavioral and physiological development. *Poultry Science*, 98(1), 9–28. <https://doi.org/10.3382/ps/pey319>
- Carew, R. (2010). Ammonia emissions from livestock industries in Canada: Feasibility of abatement strategies. *Environmental Pollution*, 158(8), 2618–2626.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.05.004>
- Carranza-Díaz, A. K., Larios-Martínez, A. D., Ruiz-González, A., Duchaine, C., Boulianne, M., Godbout, S., & Fournel, S. (2023). Assessing greenhouse gas and ammonia emissions: A comparison of three egg production systems in Québec, Canada. *Canadian Biosystems Engineering*, 65(1), 5.01-5.12. <https://doi.org/10.7451/CBE.2023.65.5.1>
- Carranza-Díaz, A. K., Larios-Martínez, A. D., Ruiz-Gonzalez, A., Godbout, S., & Fournel, S. (2024). (2024). Assessing ventilation rate by direct and indirect measurement methods in layer barns. *Journal of the ASABE*. [Manuscrito Enviado Para Publicación] Submitted June 25, 2024 and Revised September 20., 68(2), 147–159. <https://doi.org/10.13031/ja.16115>
- Chai, L., Ni, J.-Q., Diehl, C. A., Kilic, I., Heber, A. J., Chen, Y., Cortus, E. L., Bogan, B. W., Lim, T. T., Ramirez-Dorronsoro, J.-C., & Chen, L. (2012a). Ventilation rates in large commercial layer hen houses with two-year continuous monitoring. *British Poultry Science*, 53(1), 19–31. <https://doi.org/10.1080/00071668.2011.643766>
- Chai, L., Ni, J.-Q., Diehl, C. A., Kilic, I., Heber, A. J., Chen, Y., Cortus, E. L., Bogan, B. W., Lim, T. T., Ramirez-Dorronsoro, J.-C., & Chen, L. (2012b). Ventilation rates in large commercial

- layer hen houses with two-year continuous monitoring. *British Poultry Science*, 53(1), 19–31. <https://doi.org/10.1080/00071668.2011.643766>
- Chauhan, S. S., Zhang, M., Osei-Amponsah, R., Clarke, I., Sejian, V., Warner, R., & Dunshea, F. R. (2023). Impact of heat stress on ruminant livestock production and meat quality, and strategies for amelioration. *Animal Frontiers*, 13(5), 60–68. <https://doi.org/10.1093/af/vfad046>
- Cheng, M., McCarl, B., & Fei, C. (2022). Climate Change and Livestock Production: A Literature Review. *Atmosphere*, 13(1), 140. <https://doi.org/10.3390/atmos13010140>
- Chepete, H. J., & Xin, H. (2004). Ventilation rates of a laying hen house based on new vs. Old heat and moisture production data. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(6). <https://doi.org/10.13031/2013.17722>
- Chepete, J., Xin, H., Puma, M., & Gates, R. (2004). Heat and moisture production of poultry and their housing systems: Pullets and layers. *ASHRAE Transactions*, 110, 286.
- Chielo, L., Pike, T., & Cooper, J. (2016). Ranging Behaviour of Commercial Free-Range Laying Hens. *Animals*, 6(5), 28. <https://doi.org/10.3390/ani6050028>
- Ciarelli, C., Pillan, G., Bordignon, F., Xiccato, G., Birolo, M., & Trocino, A. (2023). Space use and navigation ability of hens at housing in the aviary for the laying phase: effect of enrichment with additional perches and genotype. *Poultry Science*, 102(11), 102962. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102962>
- CNSAE. (2017). *Code de pratiques pour le soin et la manipulation des poulettes et pondeuses*.
- David, B., Mejdell, C., Michel, V., Lund, V., & Moe, R. (2015). Air Quality in Alternative Housing Systems may have an Impact on Laying Hen Welfare. Part II—Ammonia. *Animals*, 5(3), 886–896. <https://doi.org/10.3390/ani5030389>
- David, B., Mejdell, C., Michel, V., Lund, V., & Oppermann Moe, R. (2012). Air Quality in Alternative Housing Systems May Have an Impact on Laying Hen Welfare. Part II-Ammonia. *Animals*, 5, 886–896. <https://doi.org/10.3390/ani5030389>
- de Vries, M., & de Boer, I. J. M. (2010). Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, 128(1–3), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007>
- Dines, W. H. (1892). Anemometer comparisons. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 18(83), 165–185. <https://doi.org/10.1002/qj.4970188303>
- Domínguez, V., Irisarri, P., & Gonnet, S. (2007). Emisiones de óxido nitroso por suelos cultivados con arroz: efecto de un inhibidor de la nitrificación. *Agrociencia*, 11(2), 50–57.
- Edouard, N., Mosquera, J., van Dooren, H. J. C., Mendes, L. B., & Ogink, N. W. M. (2016). Comparison of CO<sub>2</sub>- and SF<sub>6</sub>- based tracer gas methods for the estimation of ventilation rates in a naturally ventilated dairy barn. *Biosystems Engineering*, 149, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.001>
- England, A., & Ruhnke, I. (2020). The influence of light of different wavelengths on laying hen production and egg quality. *World's Poultry Science Journal*, 76(3), 443–458. <https://doi.org/10.1080/00439339.2020.1789023>
- Estelles, F., Fernandez, N., Torres, A. G., & Calvet, S. (2011). Use of CO<sub>2</sub> balances to determine ventilation rates in a fattening rabbit house. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(3), 713. <https://doi.org/10.5424/sjar/20110903-368-10>

- Fabbri, C., Valli, L., Guarino, M., Costa, A., & Mazzotta, V. (2007a). Ammonia, methane, nitrous oxide and particulate matter emissions from two different buildings for laying hens. *Biosystems Engineering*, 97(4), 441–455. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.036>
- Fabbri, C., Valli, L., Guarino, M., Costa, A., & Mazzotta, V. (2007b). Ammonia, methane, nitrous oxide and particulate matter emissions from two different buildings for laying hens. *Biosystems Engineering*, 97(4), 441–455. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.036>
- Fournel, S., Godbout, S., & Lagacé, R. (2011). *Étude comparative des émissions de gaz et d'odeurs issues de différents systèmes de gestion des déjections en production d'oeufs de consommation*. Université Laval.
- Fournel, S., Pelletier, F., Godbout, S., Lagacé, R., & Feddes, J. (2012). Greenhouse gas emissions from three cage layer housing systems. *Animals*, 2(1), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ani2010001>
- FPOQ. (2012). *Guide d'aide à la décision*.
- FPOQ. (2022). *RAPPORT ANNUEL 2022/23*. [https://oeuf.ca/wp-content/uploads/2023/04/12579\\_FPOQ-RA-2022-23-int-v8.pdf](https://oeuf.ca/wp-content/uploads/2023/04/12579_FPOQ-RA-2022-23-int-v8.pdf)
- Fulton, R. M. (2019). Health of Commercial Egg Laying Chickens in Different Housing Systems. *Avian Diseases*, 63(3), 420. <https://doi.org/10.1637/11942-080618-Reg.1>
- Gates, R., Casey, K., Xin, H., & Burns, R. (2009). Building Emissions Uncertainty Estimates. *Transactions of the ASABE*, 52(4), 1345–1351. <https://doi.org/10.13031/2013.27784>
- Gates, R. S., Casey, K. D., Xin, H., Wheeler, E. F., & Simmons, J. D. (2004). FAN ASSESSMENT NUMERATION SYSTEM (FANS) DESIGN AND CALIBRATION SPECIFICATIONS. *Transactions of the ASAE*, 47(5), 1709–1715. <https://doi.org/10.13031/2013.17613>
- Gonzalez-Mora, A. F., Larios, A. D., Rousseau, A. N., Godbout, S., Morin, C., Palacios, J. H., Grenier, M., & Fournel, S. (2021). Assessing environmental control strategies in cage-free egg production systems: Effect on spatial occupancy and natural behaviors. *Animals*, 11(1), 1–13. <https://doi.org/10.3390/ani11010017>
- Gonzalez-Mora, A. F., Rousseau, A. N., Larios, A. D., Godbout, S., & Fournel, S. (2022). Assessing environmental control strategies in cage-free aviary housing systems: Egg production analysis and Random Forest modeling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106854>
- Gouvernement du Canada. (2021, June 3). *Agricultural Ammonia Indicator*. <https://agriculture.canada.ca/en/environment/resource-management/indicators/agricultural-ammonia-indicator>
- Gouvernement du Québec. (2020). *Production d'œufs*.
- Gouvernement du Québec. (2023a). *Production d'œufs*. <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/agriculture/industrie-agricole-au-quebec/productions-agricoles/production-oeufs>
- Gouvernement du Québec. (2023b). *Règlement sur la santé et la sécurité du travail*.
- Grassauer, F., Arulnathan, V., & Pelletier, N. (2023). Towards a net-zero greenhouse gas emission egg industry: A review of relevant mitigation technologies and strategies, current emission reduction potential, and future research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 181, 113322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113322>
- Green, J., & Dyer, I. (2009). Measurement of humidity. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, 10(1), 45–47. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2008.11.016>

- Groot Koerkamp, P., & Elzing, A. (1996). Degradation of Nitrogenous Components in and Volatilization of Ammonia from Litter in Aviary Housing Systems for Laying Hens. *Transactions of the ASAE*, 39(1), 211–218. <https://doi.org/10.13031/2013.27500>
- Hase, F., Frey, M., Blumenstock, T., Groß, J., Kiel, M., Kohlhepp, R., Mengistu Tsidu, G., Schäfer, K., Sha, M. K., & Orphal, J. (2015). Application of portable FTIR spectrometers for detecting greenhouse gas emissions of the major city Berlin. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(7), 3059–3068. <https://doi.org/10.5194/amt-8-3059-2015>
- Hassouna, M., Eglin, T., & et al. (2015). *Measuring emissions from livestock farming: greenhouse gases, ammonia and nitrogen oxides*. Ademe and INRA.
- Hayes, M. D., Xin, H., Li, H., Shepherd, T. A., & Zhao, Y. (2013). *Heat and Moisture Production of Hy-Line Brown Hens in Aviary Houses in the Midwestern U.S.* [http://lib.dr.iastate.edu/abe\\_eng\\_pubs](http://lib.dr.iastate.edu/abe_eng_pubs)
- Hayes, M. D., Xin, H., Li, H., Shepherd, T., Zhao, Y., & John Paul Stinn. (2012). Bioenergetics of Hy-Line Brown Hens in Aviary Houses. *2012 IX International Livestock Environment Symposium (ILES IX)*. <https://doi.org/10.13031/2013.41576>
- Holden, N. M., Wolfe, M. L., Ogejo, J. A., & Cummins, E. J. (2020). *Introduction to Biosystems Engineering*. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) in association with Virginia Tech Publishing, Virginia Tech Libraries. <https://doi.org/10.21061/IntroBiosystemsEngineering>
- Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., & Van der Linden, P. J. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. [http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/pdf/WG1\\_TAR-FRONT.PDF](http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/pdf/WG1_TAR-FRONT.PDF)
- Hu, J. Y., Li, Y. I., & Yeung, K. W. (2006). In vivo physiological measurements. In *Clothing Biosensory Engineering* (pp. 285–300). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845691462.285>
- Huijsmans, J. F. M., Hol, J. M. G., & Hendriks, M. M. W. B. (2001). Effect of application technique, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to grassland. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 49(4), 323–342. [https://doi.org/10.1016/S1573-5214\(01\)80021-X](https://doi.org/10.1016/S1573-5214(01)80021-X)
- Hy-Line. (2017). *Hy-Line W-36*. <https://www.hyline.com/varieties/w-36>
- IAEA-International Atomic Energy Agency. (1992). Manual on measurement of methane. *Manual on Measurement OfMethane and Nitrous Oxide Emission from Agricultural*, 52.
- IMAN. (2021, January 2). *Mesure de débit par pression différentielle*. <https://instrumentationman.com/mesure-de-debit-par-pression-differentielle/>
- Jahnke, J. A. (1993). *Continuous emission monitoring* (p. 302). Van Nostrand Reinhold.
- Johnsen, L. G., Skou, P. B., Khakimov, B., & Bro, R. (2017). Gas chromatography – mass spectrometry data processing made easy. *Journal of Chromatography A*, 1503, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2017.04.052>
- Kadiyala, A., & Kumar, A. (2017). Applications of Python to evaluate environmental data science problems. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(6), 1580–1586. <https://doi.org/10.1002/ep.12786>
- Kang, H. K., Park, S. B., Kim, S. H., & Kim, C. H. (2016). Effects of stock density on the laying performance, blood parameter, corticosterone, litter quality, gas emission and bone mineral density of laying hens in floor pens. *Poultry Science*, 95(12), 2764–2770. <https://doi.org/10.3382/ps/pew264>

- Ketelaars, E. H., Arets, A., Van Der Hel, W., Wilbrink, A. J., & Verstegen, M. W. A. (1985). Effect of housing systems on the energy balance of laying hens. In *Netherlands Journal of Agricultural Science* (Vol. 33).
- Khalil, A. M., Matsui, K., & Takeda, K. (2004). Diurnal and oviposition-related changes in heart rate, body temperature and locomotor activity of laying hens. *Animal Science Journal*, 75(2), 169–174. <https://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2004.00172.x>
- Kilic, I., & Yaslioglu, E. (2014). Ammonia and Carbon Dioxide Concentrations in a Layer House. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 27(8), 1211–1218. <https://doi.org/10.5713/ajas.2014.14099>
- Kim, D.-H., Lee, Y.-K., Kim, S.-H., & Lee, K.-W. (2020). The Impact of Temperature and Humidity on the Performance and Physiology of Laying Hens. *Animals*, 11(1), 56. <https://doi.org/10.3390/ani11010056>
- Kim, J.-H. (2015). Protein Quality and Amino Acid Utilization in Chickens. *Korean Journal of Poultry Science*, 42(1), 87–100. <https://doi.org/10.5536/KJPS.2014.42.1.87>
- Kim, N. Y., Kim, S. J., Oh, M., Jang, S. Y., & Moon, S. H. (2021). Changes in facial surface temperature of laying hens under different thermal conditions. *Animal Bioscience*, 34(7), 1235–1242. <https://doi.org/10.5713/ab.20.0647>
- Kiwan, A., Berg, W., Fiedler, M., Ammon, C., Gläser, M., Müller, H.-J., & Brunsch, R. (2013). Air exchange rate measurements in naturally ventilated dairy buildings using the tracer gas decay method with <sup>85</sup>Kr, compared to CO<sub>2</sub> mass balance and discharge coefficient methods. *Biosystems Engineering*, 116(3), 286–296. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.11.011>
- Koutsoyiannis, D., Onof, C., Kundzewicz, Z. W., & Christofides, A. (2023). On Hens, Eggs, Temperatures and CO<sub>2</sub>: Causal Links in Earth's Atmosphere. *Sci*, 5(3), 35. <https://doi.org/10.3390/sci5030035>
- Kubba, S. (2010). Indoor Environmental Quality. In *LEED Practices, Certification, and Accreditation Handbook* (pp. 211–269). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-691-0.00007-2>
- Larios, A. D., Kaur Brar, S., Avalos Ramírez, A., Godbout, S., Sandoval-Salas, F., & Palacios, J. H. (2016). Challenges in the measurement of emissions of nitrous oxide and methane from livestock sector. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 15(2), 285–297. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9394-x>
- Larivière, T. (2016, February 5). Fin des cages conventionnelles pour les poules. *La Terre*. <https://www.laterre.ca/actualites/elevages/fin-des-cages-conventionnelles-pour-les-poules>
- Lay, D. C., Fulton, R. M., Hester, P. Y., Karcher, D. M., Kjaer, J. B., Mench, J. A., Mullens, B. A., Newberry, R. C., Nicol, C. J., O'Sullivan, N. P., & Porter, R. E. (2011). Hen welfare in different housing systems. *Poultry Science*, 90(1), 278–294. <https://doi.org/10.3382/ps.2010-00962>
- Leinonen, I., & Kyriazakis, I. (2016). How can we improve the environmental sustainability of poultry production? *Proceedings of the Nutrition Society*, 75(3), 265–273. <https://doi.org/10.1017/S0029665116000094>
- Leyendecker, M., Hamann, H., Hartung, J., Kamphues, J., Neumann, U., Sürrie, C., & Distl, O. (2005). Keeping laying hens in furnished cages and an aviary housing system enhances their

- bone stability. *British Poultry Science*, 46(5), 536–544.  
<https://doi.org/10.1080/00071660500273094>
- Li, D., Tong, Q., Shi, Z., Zheng, W., Wang, Y., Li, B., & Yan, G. (2020). Effects of Cold Stress and Ammonia Concentration on Productive Performance and Egg Quality Traits of Laying Hens. *Animals*, 10(12), 2252. <https://doi.org/10.3390/ani10122252>
- Li, H., Xin, H., Burns, R. T., Roberts, S. A., Li, S., Kliebenstein, J., & Bregendahl, K. (2012). Reducing ammonia emissions from laying-hen houses through dietary manipulation. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(2), 160–169.  
<https://doi.org/10.1080/10473289.2011.638414>
- Li, H., Xin, H., & Liang, Y. (2004). Comparison of Direct vs. Indirect Ventilation Rate Determination for Manure Belt Laying Hen Houses. 2004, Ottawa, Canada August 1 - 4, 2004. <https://doi.org/10.13031/2013.16892>
- Li, H., Xin, H., Liang, Y., Gates, R. S., Wheeler, E. F., & Heber, A. J. (2004). Comparison of direct vs. indirect ventilation rate determination for manure belt laying hen houses. *ASAE Annual International Meeting 2004*, 6155–6166.
- Li, H., Xin, H., Liang, Y., Gates, R. S., Wheeler, E. F., & Heber, A. J. (2005). COMPARISON OF DIRECT VS. INDIRECT VENTILATION RATE DETERMINATIONS IN LAYER BARNS USING MANURE BELTS. *Transactions of the ASAE*, 48(1).  
<https://doi.org/10.13031/2013.17950>
- Lin, X., Zhang, R., Jiang, S., El-Mashad, H. M., & Xin, H. (2018). Fan and ventilation rate monitoring of cage-free layer houses in California. *Transactions of the ASABE*, 61(6), 1939–1950. <https://doi.org/10.13031/trans.12831>
- Lin, Z., Huang, X., & Chen, J. (2023). Prediction Model of Sailing Ship Price Based on Random Forest Regression. *Highlights in Business, Economics and Management*, 16, 29–33.  
<https://doi.org/10.54097/hbem.v16i.10530>
- Liu, Q. X., Zhou, Y., Li, X. M., Ma, D. D., Xing, S., Feng, J. H., & Zhang, M. H. (2020). Ammonia induce lung tissue injury in broilers by activating NLRP3 inflammasome via Escherichia/Shigella. *Poultry Science*, 99(7), 3402–3410.  
<https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.03.019>
- Liu, Y., Zhang, G., Rong, L., Li, Z., Wang, S., & Wang, C. (2020). Concentrations and emissions of ammonia from different laying hen production systems of conventional cage, aviary and natural mating colony cage in North China Plain. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(19).  
<https://doi.org/10.3390/app10196820>
- Liu, Z., Powers, W., & Harmon, J. D. (2016). Estimating Ventilation Rates of Animal Houses through CO2 Balance. *Transactions of the ASABE*, 59(1), 321–328.  
<https://doi.org/10.13031/trans.59.10235>
- Lohmann Breeders. (2016). *Lohmann LSL-Classic : Guide d'élevage production en cage*.  
[https://lohmann-breeders.com/files/downloads/MG/Cage/LB\\_MG\\_Cage\\_LSL-Classic\\_FR.pdf](https://lohmann-breeders.com/files/downloads/MG/Cage/LB_MG_Cage_LSL-Classic_FR.pdf)
- Lopez Hurtado, P., Rouilly, A., Vandenbossche, V., & Raynaud, C. (2016). A review on the properties of cellulose fibre insulation. *Building and Environment*, 96, 170–177.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.031>
- Mahmoudi, Y. (2016). *Impacts du type de logement en élevage de poules pondeuses sur les performances zootechniques et le bien-être animal* [Université Laval].  
<https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/26829/1/32448.pdf>

- Makkonen, L., & Laakso, T. (2005). Humidity Measurements in Cold and Humid Environments. *Boundary-Layer Meteorology*, 116(1), 131–147. <https://doi.org/10.1007/s10546-004-7955-y>
- Melikov, A. K. (2016). Advanced air distribution: improving health and comfort while reducing energy use. *Indoor Air*, 26(1), 112–124. <https://doi.org/10.1111/ina.12206>
- Mikovits, C., Zollitsch, W., Hörtenhuber, S. J., Baumgartner, J., Niebuhr, K., Piringer, M., Anders, I., Andre, K., Hennig-Pauka, I., Schönhart, M., & Schauburger, G. (2019). Impacts of global warming on confined livestock systems for growing-fattening pigs: simulation of heat stress for 1981 to 2017 in Central Europe. *International Journal of Biometeorology*, 63(2), 221–230. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-01655-0>
- Miles, D. M., Miller, W. W., Branton, S. L., Maslin, W. R., & Lott, B. D. (2006). Ocular Responses to Ammonia in Broiler Chickens. *Avian Diseases*, 50(1), 45–49. <https://doi.org/10.1637/7386-052405R.1>
- Mishra, A., Koene, P., Schouten, W., Spruijt, B., van Beek, P., & Metz, J. H. M. (2005). Temporal and sequential structure of behavior and facility usage of laying hens in an enriched environment. *Poultry Science*, 84(7), 979–991. <https://doi.org/10.1093/ps/84.7.979>
- Mohammad Al-Kerwi, M. S., Mardenli, O., Mahdi Jasim, M. R., & Al-Majeed, M. A. (2022). Effects of Harmful Gases Emitted from Poultry Houses on Productive and Health Performance. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1060(1), 012082. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1060/1/012082>
- Mohammed, A., Abdel-baky, A., Ashraf, E., Hamdy, M., Helmy, A., Mahrous, M., Anower, M., Khaled, M., Abdel-Haseeb, M., Moustafa, M., Fateh-elbab, M., Fayez, Y., Hassan, M., Fouad, M., & Abdellah, M. (2021). The Influence of Harmful Greenhouse Gases (GHG) Emission In-Door of Broiler Chickens' System on Their Health: "Options of Prevention and Control." *Egyptian Journal of Veterinary Sciences*, 52(3), 275–282. <https://doi.org/10.21608/ejvs.2021.66839.1221>
- Mohiuddin, S. S., & Khattar, D. (2024). *Biochemistry, Ammonia*.
- Mollenhorst, H., Rodenburg, T. B., Bokkers, E. A. M., Koene, P., & de Boer, I. J. M. (2005). On-farm assessment of laying hen welfare: a comparison of one environment-based and two animal-based methods. *Applied Animal Behaviour Science*, 90(3–4), 277–291. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2004.08.011>
- Moore D. S., Notz W., & Fligner M. A. (2013). *The basic practice of statistics* (W.H. Freeman., Ed.; 6th ed.).
- Morris, M. D. (1991). Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, 33(2), 161. <https://doi.org/10.2307/1269043>
- Mote, C. R., & Griffis, C. L. (1980). Variations in the composting process for different organic carbon sources. *Agricultural Wastes*, 2(3), 215–223. [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(80\)90018-9](https://doi.org/10.1016/0141-4607(80)90018-9)
- Nannoni, E., Buonaiuto, G., Martelli, G., Lizzi, G., Trevisani, G., Garavini, G., & Sardi, L. (2022). Influence of Increased Freedom of Movement on Welfare and Egg Laying Pattern of Hens Kept in Aviaries. *Animals*, 12(18), 2307. <https://doi.org/10.3390/ani12182307>
- Naylor, T. A., Wiedemann, S. G., Phillips, F. A., Warren, B., McGahan, E. J., & Murphy, C. M. (2016). Emissions of nitrous oxide, ammonia and methane from Australian layer-hen manure storage with a mitigation strategy applied. *Animal Production Science*, 56(9), 1367. <https://doi.org/10.1071/AN15584>

- Ndegwa, P. M., Vaddella, V. K., Hristov, A. N., & Joo, H. S. (2009). Measuring Concentrations of Ammonia in Ambient Air or Exhaust Air Stream using Acid Traps. *Journal of Environmental Quality*, 38(2), 647–653. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0211>
- NFACC. (2016). *Code of practice for the care and handling of pullets and laying hens*. <https://www.nfacc.ca/poultry-code-of-practice>
- NFACC. (2017). *POUR LE SOIN ET LA MANIPULATION DES POULETTES ET PONDEUSES CODE DE PRATIQUES*. [www.lesoeufs.ca/](http://www.lesoeufs.ca/)
- Nfaoui, H. (2012). Wind Energy Potential. In *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 73–92). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00204-3>
- Ngwabie, N. M., Acobta, A. N., Manga, V. E., & VanderZaag, A. C. (2018). Emission factors of greenhouse gases from layer and broiler barns in Cameroon. *Atmospheric Environment*, 176, 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.12.018>
- Ni, J.-Q., Liu, S., Diehl, C. A., Lim, T.-T., Bogan, B. W., Chen, L., Chai, L., Wang, K., & Heber, A. J. (2017). Emission factors and characteristics of ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide, and particulate matter at two high-rise layer hen houses. *Atmospheric Environment*, 154, 260–273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.01.050>
- Ning, X., Bregendahl, K., & Burns, R. T. (2008). *Feeding, defecation and gaseous emission dynamics of W-36 laying hens*.
- Occupational Safety and Health Administration. (2017). *Permissible Exposure Limits – Annotated Tables*. <https://www.osha.gov/annotated-pels>
- Ogink, N. W. M., Mosquera, J., Calvet, S., & Zhang, G. (2013a). Methods for measuring gas emissions from naturally ventilated livestock buildings: Developments over the last decade and perspectives for improvement. *Biosystems Engineering*, 116(3), 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.10.005>
- Ogink, N. W. M., Mosquera, J., Calvet, S., & Zhang, G. (2013b). Methods for measuring gas emissions from naturally ventilated livestock buildings: Developments over the last decade and perspectives for improvement. *Biosystems Engineering*, 116(3), 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.10.005>
- Olanrewaju, H. A., Miller, W. W., Maslin, W. R., Collier, S. D., Purswell, J. L., & Branton, S. L. (2015). Influence of Photoperiod, Light Intensity and Their Interaction on Health Indices of Modern Broilers Grown to Heavy Weights. *International Journal of Poultry Science*, 14(4), 183–190. <https://doi.org/10.3923/ijps.2015.183.190>
- Ontario Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs. (2010). *Ventilation for Livestock and Poultry Barns: Vol. Publication 833*. Queen's Printer for Ontario.
- Ouwerkerk, E. N. J., & Pedersen S. (1994, August 29). Application of the carbon dioxide mass balance method to evaluate ventilation rates in livestock buildings. In *Proc. XII CIGR World Congress on Agricultural Engineering*.
- Park, G., Lee, I. bok, Yeo, U. hyeon, Ha, T., Kim, R. woo, & Lee, S. yeon. (2018). Ventilation rate formula for mechanically ventilated broiler houses considering aerodynamics and ventilation operating conditions. *Biosystems Engineering*, 175, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.09.002>
- Paura, L., Arhipova, I., Jankovska, L., Bumanis, N., Vitols, G., & Adjutovs, M. (2022). Evaluation and association of laying hen performance, environmental conditions and gas concentrations

- in barn housing system. *Italian Journal of Animal Science*, 21(1), 694–701.  
<https://doi.org/10.1080/1828051X.2022.2056528>
- Pedersen, S., Blanes-Vidal, V., Joergensen, H., Chwalibog, A., Haeussermann, A., Heetkamp, M., & Aarnink, A. (2008). Carbon Dioxide Production in Animal Houses: A literature review. *Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal*, X.
- Pedersen, S., Jørgensen, H., & Theil, P. K. (2015). *Influence of diurnal variation in animal activity and digestion on animal heat production*. <http://www.cigrjournal.org>
- Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J. O., Metz, J. H. M., Groot Koerkamp, P. W. G., Uenk, G. H., Phillips, V. R., Holden, M. R., Sneath, R. W., Short, J. L., White, R. P., Hartung, J., Seedorf, J., Schröder, M., Linkert, K. H. H., & Wathes, C. M. (1998). A Comparison of Three Balance Methods for Calculating Ventilation Rates in Livestock Buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70(1), 25–37. <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0276>
- Pedersen, S., & Thomsen, M. G. (2000). Heat and moisture production of broilers kept on straw bedding. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 75(2), 177–187.  
<https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0497>
- Pederson, Søren., Sällvik, Krister., International Commission of Agricultural Engineering. Section II., & European Society of Agricultural Engineers. (2002). *4th report of working group on climatization of animal houses : heat and moisture production at animal and house levels*. Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- Philippe, F. X., Mahmoudi, Y., Cinq-Mars, D., Lefrançois, M., Moula, N., Palacios, J., Pelletier, F., & Godbout, S. (2020). Comparison of egg production, quality and composition in three production systems for laying hens. *Livestock Science*, 232, 103917.  
<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.103917>
- Phillips, V. R., Lee, D. S., Scholtens, R., Garland, J. A., & Sneath, R. W. (2001). SE—Structures and Environment: A Review of Methods for measuring Emission Rates of Ammonia from Livestock Buildings and Slurry or Manure Stores, Part 2: monitoring Flux Rates, Concentrations and Airflow Rates. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(1), 1–14. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0618>
- Phillips, V. R., Scholtens, R., Lee, D. S., Garland, J. A., & Sneath, R. W. (2000). SE—Structures and Environment. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77(4), 355–364.  
<https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0613>
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aaq0216>
- Preisinger, R. (2018). Innovative layer genetics to handle global challenges in egg production. *British Poultry Science*, 59(1), 1–6. <https://doi.org/10.1080/00071668.2018.1401828>
- Razavi, S., & Gupta, H. V. (2016). A new framework for comprehensive, robust, and efficient global sensitivity analysis: 2. Application. *Water Resources Research*, 52(1), 440–455.  
<https://doi.org/10.1002/2015WR017559>
- Razavi, S., Sheikholeslami, R., Gupta, H. V., & Haghnegahdar, A. (2019). VARS-TOOL: A toolbox for comprehensive, efficient, and robust sensitivity and uncertainty analysis.

- Environmental Modelling & Software*, 112, 95–107.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.005>
- RNC. (2016). *Tables for Calculating Effective Thermal Resistance of Opaque Assemblies*.  
<https://natural-resources.canada.ca/energy/efficiency/housing/new-homes/energy-starr-new-homes-standard/tables-for-calculating-effective-thermal-resistance-opaque-assemblies/14176>
- Romillac, N. (2019). Ammonification. In *Encyclopedia of Ecology* (pp. 256–263). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10889-9>
- Rosa, E., Arriaga, H., Calvet, S., & Merino, P. (2019). Assessing ventilation rate measurements in a mechanically ventilated laying hen facility. *Poultry Science*, 98(3), 1211–1221.  
<https://doi.org/10.3382/ps/pey524>
- Rosario Díaz, Á., Alavéz Ramírez, R., Caballero Caballero, M., Chiñas Castillo, F., Montes Bernabé, J. L., & Silva Rivera, M. E. (2018). Análisis de condiciones higrotérmicas para las gallinas de postura en el estado de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 21, 4317–4327. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i21.1533>
- Samer, M., Ammon, C., Loebstin, C., Fiedler, M., Berg, W., Sanftleben, P., & Brunsch, R. (2012). Moisture balance and tracer gas technique for ventilation rates measurement and greenhouse gases and ammonia emissions quantification in naturally ventilated buildings. In *Building and Environment* (Vol. 50, pp. 10–20). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.008>
- Samer, M., Loebstin, C., Fiedler, M., Ammon, C., Berg, W., Sanftleben, P., & Brunsch, R. (2011). Heat balance and tracer gas technique for airflow rates measurement and gaseous emissions quantification in naturally ventilated livestock buildings. *Energy and Buildings*, 43(12), 3718–3728. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.008>
- Schuck-Paim, C., Negro-Calduch, E., & Alonso, W. J. (2021). Laying hen mortality in different indoor housing systems: a meta-analysis of data from commercial farms in 16 countries. *Scientific Reports*, 11(1), 3052. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81868-3>
- Schuppli, C. A., von Keyserlingk, M. A. G., & Weary, D. M. (2014). Access to pasture for dairy cows: Responses from an online engagement. *Journal of Animal Science*, 92(11), 5185–5192. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7725>
- Shepherd, T. A., Zhao, Y., Li, H., Stinn, J. P., Hayes, M. D., & Xin, H. (2015). Environmental assessment of three egg production systems — Part II. Ammonia, greenhouse gas, and particulate matter emissions. *Poultry Science*, 94(3), 534–543.  
<https://doi.org/10.3382/ps/peu075>
- Shields, S., & Greger, M. (2013). Animal Welfare and Food Safety Aspects of Confining Broiler Chickens to Cages. *Animals*, 3(2), 386–400. <https://doi.org/10.3390/ani3020386>
- Smil, V. (2011). Nitrogen cycle and world food production. *World Agriculture*, 2, 9–13.
- Snell, H. G. J., Seipelt, F., & Weghe, H. F. A. V. den. (2003). Ventilation Rates and Gaseous Emissions from Naturally Ventilated Dairy Houses. *Biosystems Engineering*, 86(1), 67–73. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00113-2](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00113-2)
- Sobol, I. M. (1993). Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models. *Mathematical Modelling and Computational Experiments*, 4, 407–414.
- Soin de ferme et alimentation. (2020). *Avantages et inconvénients d'élever des pondeuses en volière*.  
<https://www.farmfood360.ca/fr/eggfarms/aviary/AviaryAdvantagesAndDisadvantages.html>

- Soltanzadeh, A., Adeli, S. H., Sadeghi Yarandi, M., Heidari, H., & Mahdinia, M. (2023). Does exposure to ammonia concentrations lower than the threshold limit value cause acute pulmonary effects? *Toxicology and Industrial Health*, 39(8), 471–479. <https://doi.org/10.1177/07482337231185463>
- Soto-Herranz, M., Sánchez-Báscones, M., Antolín-Rodríguez, J. M., & Martín-Ramos, P. (2021). Reduction of Ammonia Emissions from Laying Hen Manure in a Closed Composting Process Using Gas-Permeable Membrane Technology. *Agronomy*, 11(12), 2384. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122384>
- Srisa-An, C. (2021). Guideline of Collinearity - Avoidable Regression Models on Time-series Analysis. *2021 2nd International Conference on Big Data Analytics and Practices (IBDAP)*, 28–32. <https://doi.org/10.1109/IBDAP52511.2021.9552165>
- Statistics Canada. (2022). *Table 18-10-0002-01 Monthly average retail prices for food and other selected products*.
- Statistique Canada. (2022, June 6). *Poultry and egg statistics, May 2022 and annual 2021*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/220606/dq220606f-eng.htm>
- Swelum, A. A., El-Saadony, M. T., Abd El-Hack, M. E., Abo Ghanima, M. M., Shukry, M., Alhotan, R. A., Hussein, E. O. S., Suliman, G. M., Ba-Awadh, H., Ammari, A. A., Taha, A. E., & El-Tarabily, K. A. (2021a). Ammonia emissions in poultry houses and microbial nitrification as a promising reduction strategy. *Science of The Total Environment*, 781, 146978. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146978>
- Swelum, A. A., El-Saadony, M. T., Abd El-Hack, M. E., Abo Ghanima, M. M., Shukry, M., Alhotan, R. A., Hussein, E. O. S., Suliman, G. M., Ba-Awadh, H., Ammari, A. A., Taha, A. E., & El-Tarabily, K. A. (2021b). Ammonia emissions in poultry houses and microbial nitrification as a promising reduction strategy. *Science of The Total Environment*, 781, 146978. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146978>
- Tactacan, G. B., Guenter, W., Lewis, N. J., Rodriguez-Lecompte, J. C., & House, J. D. (2009). Performance and welfare of laying hens in conventional and enriched cages. *Poultry Science*, 88(4), 698–707. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00369>
- Taylor, R. C., Omed, H., & Edwards-Jones, G. (2014). The greenhouse emissions footprint of free-range eggs. *Poultry Science*, 93(1), 231–237. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03489>
- Teofilo, G. F. da S., Lizana, R. R., Camargos, R. de S., Leme, B. B., Morillo, F. A. H., Silva, R. L., Fernandes, J. B. K., & Sakomura, N. K. (2022). Effect of feed restriction on the maintenance energy requirement of broiler breeders. *Animal Bioscience*, 35(5), 690–697. <https://doi.org/10.5713/ab.21.0183>
- Tran, V. Van, Park, D., & Lee, Y.-C. (2020). Indoor Air Pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2927. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082927>
- Turner, I., Heidari, D., & Pelletier, N. (2022). Life cycle assessment of contemporary Canadian egg production systems during the transition from conventional cage to alternative housing systems: Update and analysis of trends and conditions. *Resources, Conservation and Recycling*, 176, 105907. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105907>
- Viegas, S., Faísca, V. M., Dias, H., Clérigo, A., Carolino, E., & Viegas, C. (2013). Occupational Exposure to Poultry Dust and Effects on the Respiratory System in Workers. *Journal of*

- Toxicology and Environmental Health, Part A*, 76(4–5), 230–239.  
<https://doi.org/10.1080/15287394.2013.757199>
- Vitt, R., Weber, L., Zollitsch, W., Hörtenhuber, S. J., Baumgartner, J., Niebuhr, K., Piringer, M., Anders, I., Andre, K., Hennig-Pauka, I., Schönhart, M., & Schaubberger, G. (2017). Modelled performance of energy saving air treatment devices to mitigate heat stress for confined livestock buildings in Central Europe. *Biosystems Engineering*, 164, 85–97.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.013>
- Wang, X., Ndegwa, P. M., Joo, H. S., Neerackal, G. M., Stöckle, C. O., Liu, H., & Harrison, J. H. (2016). Indirect method versus direct method for measuring ventilation rates in naturally ventilated dairy houses. *Biosystems Engineering*, 144, 13–25.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.010>
- Wasti, S., Sah, N., & Mishra, B. (2020). Impact of Heat Stress on Poultry Health and Performances, and Potential Mitigation Strategies. *Animals*, 10(8), 1266.  
<https://doi.org/10.3390/ani10081266>
- Webster, A. B., & Fletcher, D. L. (2001). Reactions of Laying Hens and Broilers to Different Gases Used for Stunning Poultry. *Poultry Science*, 80(9), 1371–1377.  
<https://doi.org/10.1093/ps/80.9.1371>
- Wight, G. (1994). *Fundamentals of air sampling* (Lewis Publishers).
- Winterbone, D. E. (1997). Irreversible Thermodynamics. In *Advanced Thermodynamics for Engineers* (pp. 316–344). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-034067699-8/50018-1>
- Xin, H., Li, H., Burns, R., Gates, R., Overhults, D., & Earnest, J. (2009). Use of CO<sub>2</sub> Concentration Difference or CO<sub>2</sub> Balance to Assess Ventilation Rate of Broiler Houses. *Transactions of the ASABE*, 52(4), 1353–1361. <https://doi.org/10.13031/2013.27787>
- Yamamoto, Noriko., Nishiura, Hideaki., Honjo, Takahisa., Ishikawa, Yoshiki., & Suzuki, Koji. (1994). Continuous Determination of Atmospheric Ammonia by an Automated Gas Chromatographic System. *Analytical Chemistry*, 66(5), 756–760.  
<https://doi.org/10.1021/ac00077a028>
- Yan, J., Wang, J., Chen, J., Shi, H., Liao, X., Pan, C., Liu, Y., Yang, X., Ren, Z., & Yang, X. (2023). Adjusting phosphate feeding regimen according to daily rhythm increases eggshell quality via enhancing medullary bone remodeling in laying hens. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 14(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s40104-023-00829-0>
- Zhao, Y., Shepherd, T. A., Li, H., & Xin, H. (2015). Environmental assessment of three egg production systems- Part I: Monitoring system and indoor air quality. *Poultry Science*, 94(3), 518–533. <https://doi.org/10.3382/ps/peu076>
- Zhao, Y., Shepherd, T. A., Xin, H., & Li, H. (2014). Concentrations of Ammonia, Greenhouse Gases and Particulate Matters in Conventional Cage, Aviary, and Enriched Colony Laying-Hen Houses. *2014 ASABE Annual International Meeting*, 1–14.  
<https://doi.org/10.13031/aim.20141904027>
- Zhou, Y., Wang, C., & Firor, R. (2003). *Analysis of Permanent Gases and Methane with the Agilent 6820 Gas Chromatograph*.
- Zhou, Z., Qin, Z., Li, H., Sun, Q., Xia, L., & Yu, G. (2017a). Balance Model to Calculate the Ventilation Rate of a Mechanically Ventilated Finishing Pig House in East China. *125(Mseee)*, 4–10. <https://doi.org/10.2991/mseee-17.2017.37>

- Zhou, Z., Qin, Z., Li, H., Sun, Q., Xia, L., & Yu, G. (2017b). *Balance Model to Calculate the Ventilation Rate of a Mechanically Ventilated Finishing Pig House in East China*. *125(Mseee)*, 4–10. <https://doi.org/10.2991/mseee-17.2017.37>
- Zhu, G., Ma, X., Gao, Z., Ma, W., Li, J., & Cai, Z. (2014). Characterizing CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from an intensive dairy operation in summer and fall in China. *Atmospheric Environment*, *83*, 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.11.001>

## Annexe A. Caractéristiques des fermes commerciales échantillonnées

**Table A1.** Summary of hen housing conditions and manure management system

| System | N° hens | Average hen weight (kg) | Age (weeks) | Temperature (°C) |         | Relative humidity (%) |         | Ventilation rate (m <sup>3</sup> hr <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> ) | Manure management system           |
|--------|---------|-------------------------|-------------|------------------|---------|-----------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
|        |         |                         |             | Indoor           | Outdoor | Indoor                | Outdoor |                                                                       |                                    |
| CC     | 20,000  | 1.6                     | 64          | 20.93            | 7.70    | 49                    | 48      | 1.04                                                                  | Pit storage                        |
| EC     | 22,800  | 1.8                     | 56          | 20.09            | 4.47    | 55                    | 72      | 0.76                                                                  | Manure belt drying system          |
| CF     | 16,000  | 1.5                     | 45          | 25.85            | 27.00   | 66                    | 53      | 5.32                                                                  | Manure drying on bedded floors     |
| CF     | 15,000  | 1.7                     | 55          | 25.46            | 25.00   | 59                    | 49      | 0.80                                                                  | Manure drying on bedded floors     |
| EC     | 14,000  | 1.4                     | 50          | 21.27            | -0.40   | 63                    | 71      | 0.56                                                                  | Pit storage                        |
| CF     | 18,000  | 1.9                     | 50          | 22.07            | 0.80    | 67                    | 46      | 1.08                                                                  | Manure conveyor and scraper system |
| EC     | 13,919  | 1.9                     | 60          | 23.95            | -0.70   | 55                    | 57      | 0.53                                                                  | Pit storage                        |
| CF     | 19,500  | 1.8                     | 69          | 18.54            | -2.30   | 56                    | 46      | 0.98                                                                  | Manure belt drying system          |
| CC     | 35,000  | 1.6                     | 46          | 23.09            | -2.00   | 57                    | 58      | 0.78                                                                  | Manure belt drying system          |
| EC     | 17,000  | 1.8                     | 57          | 22.24            | -11.20  | 64                    | 44      | 0.11                                                                  | Manure belt drying system          |
| EC     | 48,000  | 1.7                     | 55          | 25.85            | -2.40   | 66                    | 61      | 0.58                                                                  | Manure belt drying system          |
| EC     | 14,484  | 1.7                     | 65          | 22.62            | 1.00    | 57                    | 46      | 0.61                                                                  | Manure belt drying system          |
| EC     | 19,997  | 1.8                     | 57          | 23.73            | 0.64    | 54                    | 44      | 0.63                                                                  | Manure belt drying system          |
| EC     | 9000    | 1.7                     | 45          | 21.24            | -6.70   | 57                    | 37      | 0.86                                                                  | Manure belt drying system          |
| EC     | 92,000  | 1.7                     | 50          | 22.96            | -12.00  | 54                    | 47      | 0.70                                                                  | Manure belt drying system          |
| CF     | 22,978  | 1.7                     | 60          | 21.12            | -6.24   | 66                    | 34      | 0.97                                                                  | Manure conveyor and scraper system |

|    |        |     |    |       |        |    |    |       |                                    |
|----|--------|-----|----|-------|--------|----|----|-------|------------------------------------|
| EC | 12,000 | 1.8 | 55 | 20.51 | -5.62  | 42 | 51 | 0.82  | Manure belt drying system          |
| CF | 17,675 | 1.7 | 57 | 21.69 | -1.80  | 52 | 34 | 0.16  | Manure belt drying system          |
| CF | 12,935 | 1.7 | 55 | 24.21 | 5.80   | 56 | 74 | 0.52  | Manure belt drying system          |
| CF | 33,417 | 1.6 | 43 | 23.16 | 5.75   | 71 | 71 | 2.07  | Manure conveyor and scraper system |
| CF | 13,694 | 1.6 | 58 | 21.08 | -3.48  | 52 | 52 | 0.71  | Manure conveyor and scraper system |
| CF | 21,065 | 1.6 | 57 | 22.20 | -3.09  | 58 | 44 | 0.46  | Manure belt drying system          |
| CC | 16,510 | 1.7 | 51 | 17.14 | -14.80 | 59 | 32 | 0.77  | Manure belt drying system          |
| CC | 25,040 | 1.9 | 57 | 20.79 | -11.43 | 62 | 47 | 0.45  | Manure belt drying system          |
| CC | 44,028 | 1.8 | 68 | 22.01 | -7.44  | 51 | 52 | 0.23  | Manure belt drying system          |
| CC | 25,009 | 1.7 | 67 | 21.84 | -5.76  | 57 | 50 | 0.55  | Manure belt drying system          |
| EC | 22,500 | 1.8 | 73 | 26.9  | 25.6   | 52 | 53 | 3.33  | Manure belt drying system          |
| EC | 10,518 | 1.8 | 64 | 26.69 | 28.5   | 63 | 56 | 11.45 | Manure belt drying system          |
| EC | 33,600 | 1.7 | 59 | 23.46 | 30.01  | 51 | 38 | 2.32  | Manure belt drying system          |
| EC | 9221   | 1.7 | 37 | 26.62 | 26.45  | 58 | 54 | 4.51  | Manure belt drying system          |

---

## Annexe B. Combinaisons de taux de respiration (RQ) pour le jour et la nuit avec les valeurs correspondantes de R<sup>2</sup> et de RMSE

| RQ<br>jour | RQ<br>nuit | R <sup>2</sup> | RMSE<br>(m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> ) | RQ<br>jour | RQ<br>nuit | R <sup>2</sup> | RMSE<br>(m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> ) |
|------------|------------|----------------|-------------------------------------------------------------|------------|------------|----------------|-------------------------------------------------------------|
| 0.85       | 0.85       | 0.597          | 1.179                                                       | 0.87       | 0.90       | 0.591          | 0.989                                                       |
| 0.85       | 0.86       | 0.609          | 1.100                                                       | 0.87       | 0.91       | 0.603          | 0.912                                                       |
| 0.85       | 0.87       | 0.604          | 1.058                                                       | 0.87       | 0.92       | 0.598          | 1.042                                                       |
| 0.85       | 0.88       | 0.602          | 0.902                                                       | 0.87       | 0.93       | 0.592          | 1.124                                                       |
| 0.85       | 0.89       | 0.592          | 1.073                                                       | 0.87       | 0.94       | 0.599          | 0.941                                                       |
| 0.85       | 0.90       | 0.592          | 1.197                                                       | 0.87       | 0.95       | 0.590          | 1.076                                                       |
| 0.85       | 0.91       | 0.590          | 0.916                                                       | 0.87       | 0.96       | 0.608          | 0.898                                                       |
| 0.85       | 0.92       | 0.607          | 1.041                                                       | 0.87       | 0.97       | 0.594          | 0.887                                                       |
| 0.85       | 0.93       | 0.602          | 1.160                                                       | 0.87       | 0.98       | 0.603          | 1.045                                                       |
| 0.85       | 0.94       | 0.604          | 1.114                                                       | 0.87       | 0.99       | 0.596          | 1.048                                                       |
| 0.85       | 0.95       | 0.589          | 1.100                                                       | 0.87       | 1.00       | 0.600          | 1.080                                                       |
| 0.85       | 0.96       | 0.609          | 1.102                                                       | 0.88       | 0.85       | 0.600          | 1.110                                                       |
| 0.85       | 0.97       | 0.606          | 0.989                                                       | 0.88       | 0.86       | 0.593          | 1.192                                                       |
| 0.85       | 0.98       | 0.593          | 0.967                                                       | 0.88       | 0.87       | 0.609          | 1.040                                                       |
| 0.85       | 0.99       | 0.593          | 1.137                                                       | 0.88       | 0.88       | 0.605          | 0.977                                                       |
| 0.85       | 1.00       | 0.593          | 1.137                                                       | 0.88       | 0.89       | 0.609          | 1.132                                                       |
| 0.86       | 0.85       | 0.595          | 1.156                                                       | 0.88       | 0.90       | 0.608          | 0.959                                                       |
| 0.86       | 0.86       | 0.600          | 1.171                                                       | 0.88       | 0.91       | 0.602          | 1.015                                                       |
| 0.86       | 0.87       | 0.598          | 1.039                                                       | 0.88       | 0.92       | 0.608          | 0.896                                                       |
| 0.86       | 0.88       | 0.595          | 1.036                                                       | 0.88       | 0.93       | 0.591          | 0.878                                                       |
| 0.86       | 0.89       | 0.602          | 1.133                                                       | 0.88       | 0.94       | 0.593          | 1.188                                                       |
| 0.86       | 0.90       | 0.592          | 1.084                                                       | 0.88       | 0.95       | 0.590          | 1.146                                                       |
| 0.86       | 0.91       | 0.595          | 1.102                                                       | 0.88       | 0.96       | 0.596          | 1.100                                                       |
| 0.86       | 0.92       | 0.597          | 1.133                                                       | 0.88       | 0.97       | 0.597          | 1.005                                                       |
| 0.86       | 0.93       | 0.599          | 1.164                                                       | 0.88       | 0.98       | 0.595          | 0.927                                                       |
| 0.86       | 0.94       | 0.605          | 0.982                                                       | 0.88       | 0.99       | 0.606          | 0.922                                                       |
| 0.86       | 0.95       | 0.593          | 0.994                                                       | 0.88       | 1.00       | 0.596          | 0.953                                                       |
| 0.86       | 0.96       | 0.600          | 0.901                                                       | 0.89       | 0.85       | 0.595          | 1.051                                                       |
| 0.86       | 0.97       | 0.601          | 1.061                                                       | 0.89       | 0.86       | 0.600          | 1.106                                                       |
| 0.86       | 0.98       | 0.590          | 0.882                                                       | 0.89       | 0.87       | 0.592          | 1.088                                                       |
| 0.86       | 0.99       | 0.602          | 1.024                                                       | 0.89       | 0.88       | 0.606          | 0.962                                                       |
| 0.86       | 1.00       | 0.593          | 1.049                                                       | 0.89       | 0.89       | 0.591          | 1.185                                                       |
| 0.87       | 0.85       | 0.590          | 0.965                                                       | 0.89       | 0.90       | 0.610          | 1.114                                                       |
| 0.87       | 0.86       | 0.609          | 1.065                                                       | 0.89       | 0.91       | 0.605          | 1.053                                                       |
| 0.87       | 0.87       | 0.609          | 0.880                                                       | 0.89       | 0.92       | 0.593          | 1.072                                                       |
| 0.87       | 0.88       | 0.606          | 0.882                                                       | 0.89       | 0.93       | 0.589          | 1.008                                                       |
| 0.87       | 0.89       | 0.595          | 1.141                                                       | 0.89       | 0.94       | 0.606          | 0.952                                                       |

| RQ<br>jour | RQ<br>nuit | R <sup>2</sup> | RMSE<br>(m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> ) |
|------------|------------|----------------|-------------------------------------------------------------|
| 0.89       | 0.95       | 0.604          | 0.987                                                       |
| 0.89       | 0.96       | 0.604          | 1.120                                                       |
| 0.89       | 0.97       | 0.605          | 0.875                                                       |
| 0.89       | 0.98       | 0.591          | 0.908                                                       |
| 0.89       | 0.99       | 0.597          | 0.885                                                       |
| 0.89       | 1.00       | 0.591          | 0.883                                                       |
| 0.90       | 0.85       | 0.610          | 0.870                                                       |
| 0.90       | 0.86       | 0.602          | 1.102                                                       |
| 0.90       | 0.87       | 0.596          | 1.026                                                       |
| 0.90       | 0.88       | 0.590          | 0.902                                                       |
| 0.90       | 0.89       | 0.596          | 1.032                                                       |
| 0.90       | 0.90       | 0.596          | 1.026                                                       |
| 0.90       | 0.91       | 0.604          | 0.927                                                       |
| 0.90       | 0.92       | 0.602          | 1.013                                                       |
| 0.90       | 0.93       | 0.608          | 1.002                                                       |
| 0.90       | 0.94       | 0.599          | 1.073                                                       |
| 0.90       | 0.95       | 0.592          | 1.080                                                       |
| 0.90       | 0.96       | 0.604          | 0.885                                                       |
| 0.90       | 0.97       | 0.605          | 0.994                                                       |
| 0.90       | 0.98       | 0.601          | 1.077                                                       |
| 0.90       | 0.99       | 0.605          | 1.036                                                       |
| 0.90       | 1.00       | 0.599          | 1.153                                                       |
| 0.91       | 0.85       | 0.600          | 1.087                                                       |
| 0.91       | 0.86       | 0.598          | 0.924                                                       |
| 0.91       | 0.87       | 0.590          | 0.893                                                       |
| 0.91       | 0.88       | 0.591          | 1.082                                                       |
| 0.91       | 0.89       | 0.590          | 0.879                                                       |
| 0.91       | 0.90       | 0.602          | 1.063                                                       |
| 0.91       | 0.91       | 0.596          | 1.180                                                       |
| 0.91       | 0.92       | 0.600          | 1.060                                                       |
| 0.91       | 0.93       | 0.608          | 0.998                                                       |
| 0.91       | 0.94       | 0.594          | 1.082                                                       |
| 0.91       | 0.95       | 0.598          | 1.021                                                       |
| 0.91       | 0.96       | 0.605          | 1.050                                                       |
| 0.91       | 0.97       | 0.594          | 1.181                                                       |
| 0.91       | 0.98       | 0.591          | 0.997                                                       |
| 0.91       | 0.99       | 0.595          | 1.187                                                       |
| 0.91       | 1.00       | 0.592          | 1.169                                                       |
| 0.92       | 0.85       | 0.609          | 0.935                                                       |
| 0.92       | 0.86       | 0.606          | 0.893                                                       |
| 0.92       | 0.87       | 0.602          | 0.903                                                       |
| 0.92       | 0.88       | 0.607          | 0.876                                                       |
| 0.92       | 0.89       | 0.606          | 0.901                                                       |

| RQ<br>jour | RQ<br>nuit | R <sup>2</sup> | RMSE<br>(m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> ) |
|------------|------------|----------------|-------------------------------------------------------------|
| 0.92       | 0.90       | 0.593          | 1.095                                                       |
| 0.92       | 0.91       | 0.608          | 0.893                                                       |
| 0.92       | 0.92       | 0.600          | 0.975                                                       |
| 0.92       | 0.93       | 0.606          | 1.149                                                       |
| 0.92       | 0.94       | 0.608          | 0.878                                                       |
| 0.92       | 0.95       | 0.596          | 1.139                                                       |
| 0.92       | 0.96       | 0.591          | 0.963                                                       |
| 0.92       | 0.97       | 0.594          | 0.909                                                       |
| 0.92       | 0.98       | 0.598          | 1.100                                                       |
| 0.92       | 0.99       | 0.606          | 1.078                                                       |
| 0.92       | 1.00       | 0.607          | 1.160                                                       |
| 0.93       | 0.85       | 0.589          | 1.113                                                       |
| 0.93       | 0.86       | 0.600          | 1.135                                                       |
| 0.93       | 0.87       | 0.598          | 0.963                                                       |
| 0.93       | 0.88       | 0.594          | 0.929                                                       |
| 0.93       | 0.89       | 0.592          | 1.118                                                       |
| 0.93       | 0.90       | 0.596          | 1.136                                                       |
| 0.93       | 0.91       | 0.609          | 1.197                                                       |
| 0.93       | 0.92       | 0.596          | 1.006                                                       |
| 0.93       | 0.93       | 0.600          | 0.993                                                       |
| 0.93       | 0.94       | 0.604          | 1.126                                                       |
| 0.93       | 0.95       | 0.597          | 0.982                                                       |
| 0.93       | 0.96       | 0.609          | 1.177                                                       |
| 0.93       | 0.97       | 0.609          | 1.153                                                       |
| 0.93       | 0.98       | 0.594          | 1.012                                                       |
| 0.93       | 0.99       | 0.599          | 1.118                                                       |
| 0.93       | 1.00       | 0.595          | 1.119                                                       |
| 0.94       | 0.85       | 0.595          | 0.904                                                       |
| 0.94       | 0.86       | 0.590          | 1.168                                                       |
| 0.94       | 0.87       | 0.602          | 1.037                                                       |
| 0.94       | 0.88       | 0.600          | 1.143                                                       |
| 0.94       | 0.89       | 0.590          | 0.976                                                       |
| 0.94       | 0.90       | 0.595          | 1.166                                                       |
| 0.94       | 0.91       | 0.608          | 0.998                                                       |
| 0.94       | 0.92       | 0.594          | 0.874                                                       |
| 0.94       | 0.93       | 0.592          | 1.169                                                       |
| 0.94       | 0.94       | 0.599          | 0.900                                                       |
| 0.94       | 0.95       | 0.610          | 0.975                                                       |
| 0.94       | 0.96       | 0.594          | 1.184                                                       |
| 0.94       | 0.97       | 0.603          | 1.184                                                       |
| 0.94       | 0.98       | 0.605          | 1.059                                                       |
| 0.94       | 0.99       | 0.594          | 1.079                                                       |
| 0.94       | 1.00       | 0.604          | 1.018                                                       |

| RQ<br>jour | RQ<br>nuit | R <sup>2</sup> | RMSE<br>(m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> ) |
|------------|------------|----------------|-------------------------------------------------------------|
| 0.95       | 0.85       | 0.597          | 0.967                                                       |
| 0.95       | 0.86       | 0.602          | 0.978                                                       |
| 0.95       | 0.87       | 0.602          | 1.092                                                       |
| 0.95       | 0.88       | 0.600          | 1.118                                                       |
| 0.95       | 0.89       | 0.591          | 1.131                                                       |
| 0.95       | 0.90       | 0.607          | 1.131                                                       |
| 0.95       | 0.91       | 0.596          | 0.900                                                       |
| 0.95       | 0.92       | 0.593          | 1.033                                                       |
| 0.95       | 0.93       | 0.590          | 0.889                                                       |
| 0.95       | 0.94       | 0.601          | 1.051                                                       |
| 0.95       | 0.95       | 0.603          | 1.016                                                       |
| 0.95       | 0.96       | 0.589          | 1.163                                                       |
| 0.95       | 0.97       | 0.600          | 0.986                                                       |
| 0.95       | 0.98       | 0.594          | 0.909                                                       |
| 0.95       | 0.99       | 0.603          | 0.917                                                       |
| 0.95       | 1.00       | 0.593          | 1.121                                                       |
| 0.96       | 0.85       | 0.604          | 1.074                                                       |
| 0.96       | 0.86       | 0.597          | 0.903                                                       |
| 0.96       | 0.87       | 0.609          | 0.898                                                       |
| 0.96       | 0.88       | 0.592          | 1.101                                                       |
| 0.96       | 0.89       | 0.596          | 0.894                                                       |
| 0.96       | 0.90       | 0.591          | 1.141                                                       |
| 0.96       | 0.91       | 0.608          | 1.103                                                       |
| 0.96       | 0.92       | 0.607          | 0.897                                                       |
| 0.96       | 0.93       | 0.594          | 0.898                                                       |
| 0.96       | 0.94       | 0.603          | 1.196                                                       |
| 0.96       | 0.95       | 0.606          | 0.994                                                       |
| 0.96       | 0.96       | 0.601          | 0.992                                                       |
| 0.96       | 0.97       | 0.600          | 1.138                                                       |
| 0.96       | 0.98       | 0.594          | 1.183                                                       |
| 0.96       | 0.99       | 0.591          | 1.195                                                       |
| 0.96       | 1.00       | 0.608          | 1.119                                                       |
| 0.97       | 0.85       | 0.608          | 0.994                                                       |
| 0.97       | 0.86       | 0.602          | 0.898                                                       |
| 0.97       | 0.87       | 0.596          | 1.126                                                       |
| 0.97       | 0.88       | 0.596          | 1.054                                                       |
| 0.97       | 0.89       | 0.604          | 1.010                                                       |
| 0.97       | 0.90       | 0.608          | 1.169                                                       |
| 0.97       | 0.91       | 0.608          | 0.907                                                       |
| 0.97       | 0.92       | 0.605          | 1.033                                                       |
| 0.97       | 0.93       | 0.602          | 0.874                                                       |
| 0.97       | 0.94       | 0.591          | 1.025                                                       |
| 0.97       | 0.95       | 0.592          | 0.889                                                       |

| RQ<br>jour | RQ<br>nuit | R <sup>2</sup> | RMSE<br>(m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> ) |
|------------|------------|----------------|-------------------------------------------------------------|
| 0.97       | 0.96       | 0.608          | 0.909                                                       |
| 0.97       | 0.97       | 0.602          | 0.909                                                       |
| 0.97       | 0.98       | 0.589          | 1.084                                                       |
| 0.97       | 0.99       | 0.591          | 1.116                                                       |
| 0.97       | 1.00       | 0.603          | 1.063                                                       |
| 0.98       | 0.85       | 0.589          | 1.188                                                       |
| 0.98       | 0.86       | 0.592          | 0.994                                                       |
| 0.98       | 0.87       | 0.601          | 0.964                                                       |
| 0.98       | 0.88       | 0.604          | 1.157                                                       |
| 0.98       | 0.89       | 0.603          | 0.944                                                       |
| 0.98       | 0.90       | 0.594          | 1.188                                                       |
| 0.98       | 0.91       | 0.604          | 0.874                                                       |
| 0.98       | 0.92       | 0.594          | 1.190                                                       |
| 0.98       | 0.93       | 0.596          | 0.884                                                       |
| 0.98       | 0.94       | 0.605          | 1.164                                                       |
| 0.98       | 0.95       | 0.603          | 1.044                                                       |
| 0.98       | 0.96       | 0.607          | 1.198                                                       |
| 0.98       | 0.97       | 0.603          | 0.894                                                       |
| 0.98       | 0.98       | 0.601          | 1.053                                                       |
| 0.98       | 0.99       | 0.591          | 1.190                                                       |
| 0.98       | 1.00       | 0.597          | 1.043                                                       |
| 0.99       | 0.85       | 0.595          | 1.078                                                       |
| 0.99       | 0.86       | 0.594          | 1.100                                                       |
| 0.99       | 0.87       | 0.609          | 1.020                                                       |
| 0.99       | 0.88       | 0.597          | 1.077                                                       |
| 0.99       | 0.89       | 0.608          | 1.063                                                       |
| 0.99       | 0.90       | 0.602          | 1.167                                                       |
| 0.99       | 0.91       | 0.606          | 0.885                                                       |
| 0.99       | 0.92       | 0.600          | 0.963                                                       |
| 0.99       | 0.93       | 0.601          | 1.184                                                       |
| 0.99       | 0.94       | 0.599          | 1.164                                                       |
| 0.99       | 0.95       | 0.593          | 1.020                                                       |
| 0.99       | 0.96       | 0.604          | 1.075                                                       |
| 0.99       | 0.97       | 0.595          | 0.962                                                       |
| 0.99       | 0.98       | 0.590          | 0.932                                                       |
| 0.99       | 0.99       | 0.603          | 1.023                                                       |
| 0.99       | 1.00       | 0.593          | 0.987                                                       |
| 1.00       | 0.85       | 0.609          | 1.063                                                       |
| 1.00       | 0.86       | 0.609          | 0.896                                                       |
| 1.00       | 0.87       | 0.608          | 1.192                                                       |
| 1.00       | 0.88       | 0.597          | 1.195                                                       |
| 1.00       | 0.89       | 0.589          | 1.100                                                       |
| 1.00       | 0.90       | 0.608          | 1.047                                                       |

| RQ<br>jour | RQ<br>nuit | R <sup>2</sup> | RMSE<br>(m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> ) |
|------------|------------|----------------|-------------------------------------------------------------|
| 1.00       | 0.91       | 0.598          | 0.972                                                       |
| 1.00       | 0.92       | 0.609          | 1.139                                                       |
| 1.00       | 0.93       | 0.609          | 1.096                                                       |
| 1.00       | 0.94       | 0.607          | 0.924                                                       |
| 1.00       | 0.95       | 0.595          | 1.171                                                       |

| RQ<br>jour | RQ<br>nuit | R <sup>2</sup> | RMSE<br>(m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> hen <sup>-1</sup> ) |
|------------|------------|----------------|-------------------------------------------------------------|
| 1.00       | 0.96       | 0.597          | 1.141                                                       |
| 1.00       | 0.97       | 0.607          | 1.183                                                       |
| 1.00       | 0.98       | 0.596          | 1.109                                                       |
| 1.00       | 0.99       | 0.593          | 1.072                                                       |
| 1.00       | 1.00       | 0.601          | 1.008                                                       |