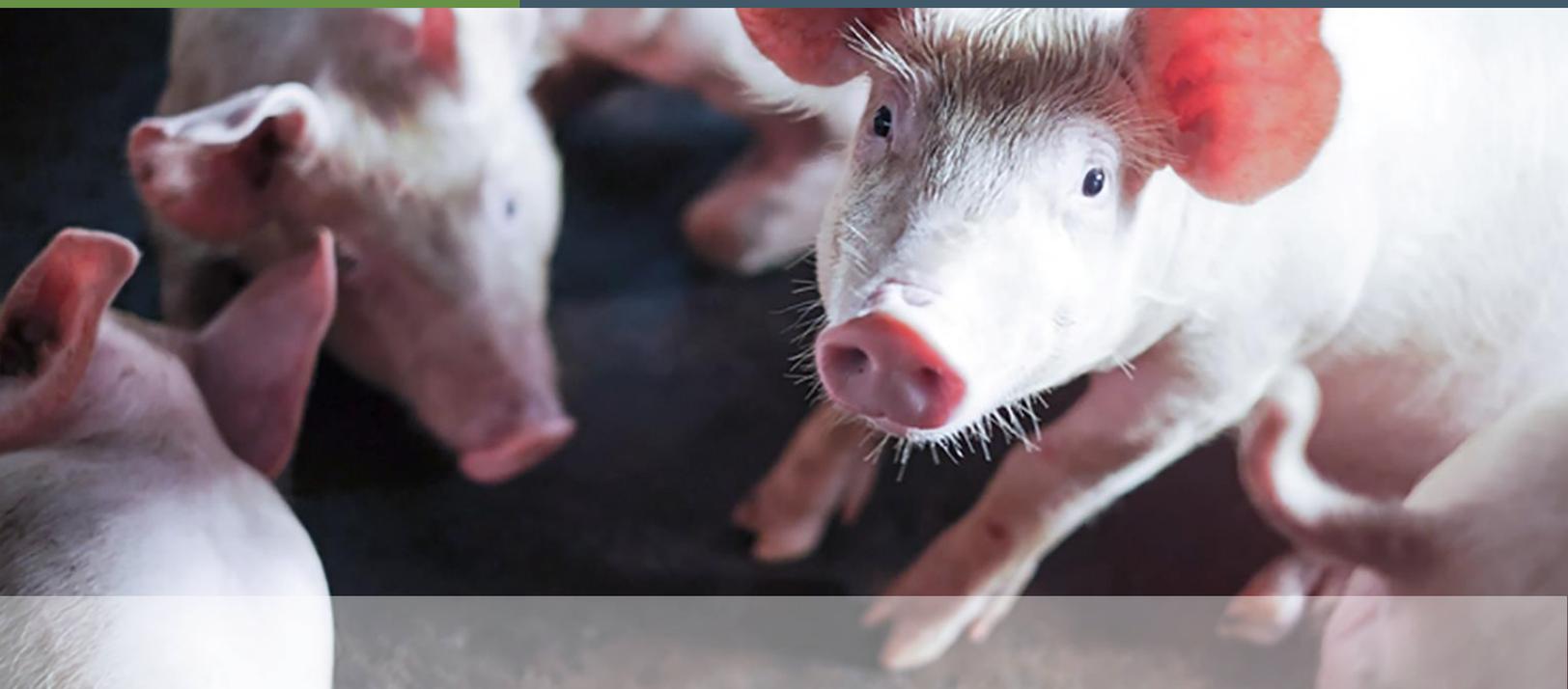


Juin 2023

Rapport final



Évaluation des performances environnementales, agronomiques et économiques d'un système de contrôle automatisé de l'environnement des bâtiments utilisant différentes technologies de conditionnement de l'air

Auteurs

Sébastien Turcotte, agr., Responsable - Bâtiments et régie d'élevage, CDPQ

Jean-Gabriel Turgeon, Chargé de projets, CDPQ

Patrick Gagnon, Ph. D., Responsable - Analyse et valorisation des données, CDPQ

Joahnn Palacios, ing., M. Sc., Professionnel de recherche, IRDA

Laura Daniela Mila Saavedra, ing., Professionnelle de recherche, IRDA

Collaborateurs

Gabrielle Dumas, agr., M. Sc., Chargée de projets, CDPQ

Gabrielle Thibault, étudiante en agronomie, CDPQ

Marie-Aude Ricard, ing., Chargée de projets, CDPQ

Raphaël Mbombo Mwendela, M. Sc., Responsable – Économie et gestion

©Centre de développement du porc du Québec inc.
Dépôt légal 2023
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
Bibliothèque et Archives Canada
ISBN 978-2-925175-16-2

Équipe de réalisation

Répondant	Sébastien Turcotte, agr., Responsable - Bâtiments et régie d'élevage
Direction scientifique	Patrick Gagnon, Ph. D., Responsable - Analyse et valorisation des données
Chargé de projet	Jean-Gabriel Turgeon, Chargé de projets
Collaborateurs	Patrick Gagnon, Ph. D., Responsable - Analyse et valorisation des données Gabrielle Thibault, étudiante en agronomie Raphaël Mbombo Mwendela, M. Sc., Responsable - Économie et gestion Christopher Robitaille, Groupe Robitaille Gabriel Gagné-Marcotte, Directeur Général, ESA Luc Robitaille, Groupe Robitaille Martin Laflamme, Avantis Coopérative Laura Daniela Mila Saavedra, ing., Professionnelle de recherche, IRDA Stéphane Godbout, IRDA

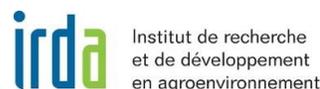
Rédaction	Sébastien Turcotte, agr., Responsable – Bâtiments et régie d'élevage Jean-Gabriel Turgeon, Chargé de projets Patrick Gagnon, Ph. D., Responsable - Analyse et valorisation des données Joahnn Palacios, ing., M. Sc., Professionnel de recherche, IRDA Laura Daniela Mila Saavedra, ing., Professionnelle de recherche, IRDA
------------------	--

Remerciements



Ce projet a été financé par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation dans le cadre du volet 2 du programme Prime-Vert.

Les auteurs tiennent aussi à remercier Avantis Coopérative, Énergie Solution Air, Groupe Robitaille et l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement pour leur contribution à ce projet.



Résumé

Dans les élevages porcins, la majorité des systèmes de chauffage sont au propane et rejettent leur gaz de combustion dans les salles d'élevage. Ces gaz de combustion (CO₂ et vapeur d'eau) détériorent la qualité de l'air et doivent être évacués du bâtiment par le système de ventilation; de la chaleur est donc évacuée simultanément. Une augmentation du taux de renouvellement de l'air contribue donc à élever les besoins de chauffage. Les rejets de CO₂ et de vapeur d'eau dans la salle d'élevage sont ainsi accrus. Ceci n'est pas souhaitable, puisque les gaz, tel que le CO₂, en concentration élevée peuvent avoir un effet négatif sur la croissance et sur la santé des porcelets.

Des technologies existantes permettent de réduire les gaz à effet de serre (GES) produits par le système de chauffage au propane dans les bâtiments de pouponnière. Toutefois, l'absence actuelle d'informations colligées et diffusées concernant ces technologies constitue un frein important à leur adoption en production porcine. Les résultats de l'effet des conditions d'ambiance sur les performances zootechniques ainsi que sur les GES sont actuellement inexistantes.

Un projet de recherche a été conduit par l'équipe du CDPQ dans deux bâtiments de pouponnière représentatifs de la filière porcine québécoise. L'objectif principal du projet était d'évaluer deux technologies existantes qui pourraient permettre de réduire les GES produits par le système de chauffage au propane dans les bâtiments de pouponnière porcine.

Le projet a permis d'évaluer les performances environnementales, agronomiques et économiques de trois traitements différents sur le contrôle automatisé de l'environnement des bâtiments de pouponnière en utilisant différentes technologies de conditionnement de l'air pour répondre aux besoins de porcelets sevrés. Plus précisément, les trois traitements évalués sont :

1. Système de chauffage au propane conventionnel (traitement **témoin**): gaz de combustion rejetés dans la salle d'élevage;
2. Fournaies au propane avec rejet des gaz de combustion à l'extérieur du bâtiment (traitement **sans rejet**);
3. Échangeurs d'air récupérateur de chaleur (traitement **échangeur**).

Puisque l'objectif principal du projet était d'évaluer des technologies qui pourraient permettre de réduire l'utilisation de combustible fossile, les GES produits par le système de chauffage dans les bâtiments de pouponnière porcine, les essais ont eu lieu lors des saisons froides alors que le système de ventilation fonctionne à un débit d'air minimum pour évacuer l'air vicié et les gaz de la salle. Le système de contrôle automatique Maximus a été utilisé pour tous les traitements et la même stratégie de ventilation répondant aux besoins des porcelets a été adoptée dans chacune des salles.

Performances agronomiques

Les performances zootechniques (CA et GMQ) ainsi que la consommation d'eau, mesurées pour chacun des différents traitements, ont été très similaires. Ces résultats étaient attendus puisque la même stratégie de ventilation a été adoptée pour chacun des traitements.

Le taux de mortalité enregistré pour les traitements témoin et sans rejet est significativement plus élevé que pour l'échangeur. La diminution de mortalité pour le traitement échangeur pourrait être liée aux conditions d'ambiance améliorées, mais cette explication ne semble pas justifier cette différence en totalité.

Débit de ventilation

Le traitement échangeur d'air permet un débit d'air moyen significativement plus élevé que les traitements témoin et sans rejet. En moyenne, le débit de ventilation du traitement échangeur était 76,8 % plus élevé que le témoin, tandis que celui sans rejet était 12,9 % plus faible.

Le débit de ventilation dans la salle est fortement lié à la température extérieure, indiquant un effet de saisonnalité. Il est également fortement lié au jour d'élevage et augmente graduellement avec l'âge des animaux.

Consommation énergétique (propane et électricité)

La consommation de propane par lot a été réduite en moyenne de 34,16 % par rapport au témoin pour l'utilisation de la fournaise avec rejets à l'extérieur, tandis qu'elle a significativement été diminuée de 52,96 % pour le traitement échangeur.

Pour l'électricité, il est possible d'observer une diminution de 4 % pour le traitement sans rejet comparativement au témoin, tandis que pour le traitement échangeur, une hausse de 321 % de la consommation électrique est notée. La consommation électrique est fortement liée au jour d'élevage, soit à une augmentation des besoins en ventilation pour les animaux.

Conditions d'ambiance

Tel qu'attendu, la température ambiante et l'humidité relative dans la salle ont été très similaires entre les traitements (même consigne pour tous les traitements). Ceux-ci sont fortement liés au jour d'élevage des porcelets. De plus, il existe une relation inverse entre l'humidité relative et les débits de ventilation. Plus les débits de ventilation sont élevés, plus l'air est renouvelé dans la salle. L'air extérieur étant moins chargé en humidité que l'air intérieur, une diminution de l'humidité relative dans la salle d'élevage est ainsi notée.

Les concentrations moyennes en CO₂ dans la salle d'élevage ont été relativement similaires entre les différents traitements (témoin : 3323 ppm; sans rejet : 3224 ppm; échangeur : 3075 ppm). La concentration en dioxyde de carbone dans la salle d'élevage est directement liée à la température extérieure (saisonnalité) qui a un lien direct avec le débit de ventilation et le fonctionnement des systèmes de chauffage. La concentration en CO₂ est aussi influencée par le jour d'élevage des animaux.

Performances environnementales

Les analyses environnementales ont démontré que le traitement sans rejet émet légèrement moins de CO₂ équivalent que le traitement témoin. Seule la salle avec le traitement échangeur a permis une réduction des émissions de CO₂ équivalent, suggérant le meilleur traitement pour réduire les émissions de GES.

Effets technico-économiques

L'analyse a permis de déterminer l'impact technico-économique de l'utilisation de la fournaise sans rejet et de l'échangeur de chaleur en production porcine. Selon les données du projet, la transition de l'utilisation d'une fournaise au propane conventionnelle vers une fournaise rejetant les gaz de combustion à l'extérieur permet un bénéfice net annuel de 2 796 \$ et un retour sur investissement de 0,94 an. La transition de l'utilisation d'une fournaise au propane conventionnelle vers l'échangeur de chaleur permet un bénéfice net annuel de 2 975 \$ et un retour sur investissement de 4,3 ans.

Conclusion

Les performances agronomiques, environnementales et économiques des deux technologies testées sont vraiment intéressantes et présentent plusieurs avantages pour les producteurs qui les mettront en place. À la lumière de ces résultats, il pourrait être opportun de tester ces deux technologies dans un autre type d'élevage où les besoins énergétiques sont importants, comme dans la section mise-bas des maternités, ainsi que de tester la combinaison des deux technologies dans la même salle d'élevage.

Finalement, il serait très intéressant de mener des travaux supplémentaires dans le but de mieux comprendre ce qui se passe avec les émissions de gaz lorsque les débits de ventilation augmentent en fin d'élevage.

Table des matières

Liste des tableaux.....	x
Liste des figures	xi
1 Mise en contexte.....	1
2 Objectifs	2
3 Effets des conditions d’ambiance sur les performances des porcelets en pouponnière.....	3
3.1 Ventilation	4
3.2 Température ambiante.....	5
3.3 Température effective ou ressentie par l’animal.....	6
3.3.1 Vitesse d’air.....	7
3.3.2 Humidité relative	7
3.3.3 Variabilité spatiale des conditions d’ambiance	8
3.4 Polluants de l’air en élevage.....	8
3.4.1 Ammoniac (NH ₃)	9
3.4.2 Dioxyde de carbone (CO ₂).....	10
3.4.3 Sulfure d'hydrogène (H ₂ S).....	10
3.4.4 Les poussières	11
4 Émissions de gaz à effet de serre (GES)	11
5 Stratégies d’optimisation du confort des porcelets.....	12
5.1 Microenvironnements	12
5.2 Réduction du chauffage la nuit.....	12
5.3 Échangeurs de chaleur.....	13
5.4 Fournaises avec rejet des gaz de combustion à l’extérieur	14
6 Matériel et méthodes	15

6.1	Traitements.....	15
6.1.1	Traitement témoin.....	15
6.1.2	Traitement sans rejet de combustion.....	16
6.1.3	Traitement échangeur de chaleur	17
6.2	Description du dispositif expérimental	18
6.2.1	Description des bâtiments d'élevage et des traitements.....	19
6.2.2	Pesée et alimentation des porcelets	23
6.3	Système de contrôle des conditions d'ambiance et de la ventilation	25
6.3.1	Équipements et consigne.....	25
6.3.2	Instrumentation	26
6.3.3	Vitesse de l'air	28
6.4	Laboratoire MESANGES	28
6.4.1	Mesure du débit.....	29
6.4.2	Calcul des émissions des gaz évacués de chacune des salles de pouponnière	30
6.5	Analyses	32
6.5.1	Retrait des données	32
6.5.2	Analyses statistiques.....	33
7	Résultats et discussion	34
7.1	Effets agronomiques de l'utilisation des technologies étudiées.....	34
7.2	Effets sur les débits de ventilation	35
7.3	Effets sur la consommation énergétique	36
7.3.1	Propane.....	36
7.3.2	Électricité	38
7.4	Effets sur les conditions d'ambiance	41

7.4.1	Température ambiante.....	41
7.4.2	Humidité relative (HR)	43
7.4.3	Dioxyde de carbone (CO ₂).....	45
7.5	Performances environnementales	49
7.5.1	Concentration mesurée des différents gaz à la sortie des ventilateurs.....	49
7.5.2	Émissions des différents gaz dans chacune des salles.....	52
7.5.3	Conclusion sur les émissions.....	53
8	Analyse technico-économique.....	53
8.1	Fournaise rejetant les gaz de combustion à l'extérieur du bâtiment	54
8.1.1	Impact sur la consommation d'énergie	54
8.1.2	Impact sur les performances zootechniques.....	55
8.1.3	Coût d'entretien de la fournaise sans rejet	56
8.1.4	Retour sur investissement	56
8.2	Échangeur d'air récupérateur de chaleur.....	57
8.2.1	Impact sur la consommation d'énergie	57
8.2.2	Impact sur les performances zootechniques.....	57
8.2.3	Coût d'entretien de l'échangeur d'air récupérateur de chaleur	58
8.2.4	Retour sur investissement	58
8.3	Résumé des impacts technico-économiques	59
9	Observations sur les technologies	60
10	Conclusion	61
11	Références.....	63
	Annexe 1	68
	Annexe 2	70

Liste des tableaux

Tableau 1. Évolution des consignes de température pour un lot d'élevage en période froide en fonction de l'âge des porcelets.....	25
Tableau 2. Performances zootechniques et consommation d'eau selon le traitement	34
Tableau 3. Température ambiante moyenne (°F) dans les salles d'élevage par lot selon le traitement	41
Tableau 4. Humidité relative (%) dans la salle d'élevage par lot selon le traitement.....	43
Tableau 5. Concentration en dioxyde de carbone (CO ₂ ; ppm) dans la salle d'élevage par lot selon le traitement.....	46
Tableau 6. Pourcentage de temps pour chaque traitement dont la concentration en CO ₂ se trouve dans l'intervalle, ainsi que température moyenne dans la salle d'élevage et le nombre moyen de jour d'élevage à ce moment	47
Tableau 7. Inventaire, poids moyen des porcelets ainsi que la consommation moyenne d'aliment et d'eau dans chacune des salles de la pouponnière Avantis - AGR3.....	49
Tableau 8. Émissions moyennes totales des différents gaz.	53
Tableau 9. Coûts annuels par salle pour la transition d'une fournaise conventionnelle au propane (témoin) vers une nouvelle technologie de conditionnement de l'air des porcelets	59

Liste des figures

Figure 1.	Zone de thermoneutralité des porcelets selon le poids.....	3
Figure 2.	Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur air-air	13
Figure 3.	Fournaise au propane LB White de 50 000 à 100 000 BTU (30 kW).....	16
Figure 4.	Fournaise au propane avec rejet des gaz de combustion à l'extérieur du bâtiment.....	16
Figure 5.	Dessin technique de l'échangeur de chaleur air-air ESA-3000.....	17
Figure 6.	Vue extérieure et intérieure de l'échangeur de chaleur air-air ESA-3000	18
Figure 7.	Salle d'élevage de la pouponnière AGR3 d'Avantis Coopérative	19
Figure 8.	Plan de plancher de la pouponnière AGR3 d'Avantis Coopérative	20
Figure 9.	Salle d'élevage de la pouponnière 227D du Groupe Robitaille	21
Figure 10.	Plan de plancher de la pouponnière 227D du Groupe Robitaille	22
Figure 11.	Balace de plancher utilisée dans la pouponnière #3 du site AGR d'Avantis Coopérative et dans la pouponnière 227D du Groupe Robitaille.	23
Figure 12.	Trémies sèches installées dans chacun des parcs de la pouponnière #3 du site AGR d'Avantis Coopérative et de la pouponnière 227D de Groupe Robitaille.	24
Figure 13.	Points d'eau dans la pouponnière #3 du site AGR d'Avantis Coopérative et dans la pouponnière 227D du Groupe Robitaille.	24
Figure 14.	Contrôleur Maximus permettant de contrôler et de monitorer les conditions d'ambiance.....	26
Figure 15.	Instrumentation utilisée dans chacune des salles d'élevage.....	27
Figure 16.	Laboratoire mobile MESANGES de l'IRDA pour la mesure en continu des émissions à la sortie des ventilateurs.	29
Figure 17.	Montage utilisé pour la calibration standardisée des ventilateurs.	30
Figure 18.	Débit moyen (CFM/porc) par lot selon le traitement comparativement à la température extérieure (°F).....	35
Figure 19.	Débit moyen (CFM/porc) dans la salle d'élevage selon le jour d'élevage pour les différents traitements.....	35

Figure 20. Consommation moyenne de propane (L) par traitement	36
Figure 21. Consommation totale de propane (L) par lot par traitement	37
Figure 22. Consommation moyenne de propane (L) et température ambiante de la salle (°F) par salle par jour d'élevage selon les différents traitements.....	38
Figure 23. Consommation électrique totale (kWh) par lot par traitement.....	38
Figure 24. Consommation moyenne d'électricité (kWh) et température ambiante de la salle (°F) par jour d'élevage selon les différents traitements.....	39
Figure 25. Consommation moyenne de propane (L) et d'électricité (kWh) par salle par jour d'élevage selon les différents traitements	40
Figure 26. Écart de température entre la salle (°F) et la température de consigne (°F) pour les différents traitements selon le jour d'élevage	42
Figure 27. Humidité relative (%) dans la salle d'élevage selon le jour d'élevage et débit de ventilation (CFM/porc) pour les différents traitements.....	44
Figure 28. Consommation de propane (L) horaire lors d'une journée froide (15 janvier 2022) en relation avec l'humidité relative (%) de la salle selon le traitement.....	45
Figure 29. Concentration en CO ₂ (ppm) par lot selon le traitement comparativement à la température extérieure (°F).....	46
Figure 30. Concentration en CO ₂ (ppm) et débit de ventilation dans la salle d'élevage (CFM/porc) selon le jour d'élevage pour les différents traitements.....	48
Figure 31. Concentration en CO ₂ dans les différentes salles et dans l'air extérieur (ppm).....	50
Figure 32. Concentration en CH ₄ dans les différentes salles et dans l'air extérieur (ppm).	50
Figure 33. Concentration en N ₂ O dans les différentes salles et dans l'air extérieur (ppm).	51
Figure 34. Concentration en NH ₃ des différentes salles et de l'air extérieur (ppm).	51
Figure 35. Émissions de CO ₂ par jour par kg porc par traitement.	52

1 Mise en contexte

Actuellement, la majorité des systèmes de chauffage dans les élevages porcins sont au propane, et rejettent leurs gaz de combustion dans les salles d'élevage. Ces gaz de combustion, le CO₂ et la vapeur d'eau, détériorent la qualité de l'air et doivent être évacués du bâtiment par le système de ventilation. De ce fait, de la chaleur est évacuée en même temps que les gaz. Il est donc plus difficile de contrôler leurs concentrations. Une augmentation du taux de renouvellement de l'air augmente les besoins de chauffage. Les rejets de dioxyde de carbone et d'eau dans les salles sont ainsi accrus. Ceci n'est pas souhaitable, car le dioxyde de carbone en concentration élevée peut avoir un effet négatif sur la croissance et sur la santé des porcelets.

Différentes technologies alternatives permettent de réduire les rejets de CO₂ et d'eau dans les salles d'élevage, de même que la quantité de propane utilisée pour chauffer les bâtiments de pouponnière. Les coûts de ces équipements peuvent être un frein à leur adoption en production porcine. Malgré tout, le potentiel de réduction de l'utilisation d'énergie fossile pour le chauffage des bâtiments d'élevage, de même que les nouvelles fonctionnalités des contrôles de ventilation modernes, offrent de nouvelles opportunités pour réviser l'utilisation de ces équipements et améliorer les conditions d'ambiance dans les salles d'élevage.

Le projet a permis d'évaluer les performances environnementales, agronomiques et économiques de trois traitements différents sur le contrôle automatisé de l'environnement des bâtiments de pouponnière en utilisant différentes technologies de conditionnement de l'air pour répondre aux besoins de porcelets sevrés. Les trois traitements ont été évalués dans deux pouponnières (Avantis - pouponnière AGR3 et Groupe Robitaille - pouponnière 227D) :

1. **Système de chauffage au propane conventionnel (témoin)** : gaz de combustion rejetés dans la salle d'élevage;
2. **Fournaises avec rejet des gaz de combustion à l'extérieur du bâtiment (sans rejet)** :
 - Devraient permettre d'obtenir la meilleure qualité d'air, car aucun gaz de combustion du système de chauffage ne sera envoyé dans la salle.
3. **Échangeurs d'air récupérateurs de chaleur (échangeur)** : besoins en chauffage diminués d'environ 50 %
 - Devraient permettre d'améliorer les conditions d'ambiance pour un même débit de ventilation en réduisant la consommation de propane, et donc, les rejets de CO₂ et de vapeur d'eau par le système de chauffage;
 - Devraient permettre de diminuer les courants d'air froids sur les animaux avec le préchauffage de l'air qu'offre ces systèmes.

Les deux technologies testées, soit les échangeurs d'air récupérateurs de chaleur ainsi que les fournaises au propane avec rejet des gaz de combustion à l'extérieur du bâtiment, sont déjà commercialisées et ont été éprouvées dans le domaine avicole. Dans le cadre de ce projet, elles sont contrôlées à partir d'un système Maximus, ce dernier permettant également de gérer l'ensemble des paramètres du système de ventilation et d'évaluer en continu les conditions d'ambiance dans les salles d'élevage.

2 Objectifs

L'objectif principal du projet était d'évaluer deux technologies existantes qui pourraient permettre de réduire les GES produits par le système de chauffage au propane dans les bâtiments de pouponnière porcine. Pour ce faire, les objectifs spécifiques suivants ont été réalisés :

- Évaluer les performances environnementales d'un système de contrôle automatisé couplé à deux technologies existantes (échangeur d'air récupérateur de chaleur de Énergie Solutions Air (ESA) et une fournaise au propane où les gaz de combustion (CO₂ et vapeur d'eau) sont expulsés à l'extérieur du bâtiment), comparativement à l'utilisation des systèmes classiques de chauffage au propane où les gaz de combustion sont relâchés dans les salles d'élevage;
- Évaluer les impacts agronomiques de l'utilisation de ces technologies, notamment sur la santé et le bien-être des animaux, sur leur taux de croissance et leur efficacité alimentaire;
- Évaluer l'impact technico-économique de l'utilisation de ces technologies et déterminer leur intervalle de retour sur investissement;
- Diffuser les résultats de ce projet pour faciliter l'adoption de ces technologies et ainsi améliorer les performances environnementales, agronomiques et économiques du secteur porcin.

3 Effets des conditions d’ambiance sur les performances des porcelets en pouponnière

Les performances des porcelets en pouponnière sont influencées par plusieurs facteurs, notamment la ventilation, la température ambiante et les polluants de l’air. Une dégradation des conditions d’ambiance influence la santé des animaux, les performances zootechniques et les résultats économiques. En effet, de mauvaises conditions d’ambiance peuvent entraîner une diminution du gain de poids moyen quotidien (GMQ) et une détérioration de la conversion alimentaire (CA).

Les porcs sont très sensibles au stress thermique (température très élevée ou basse). Ils ont des performances et une santé optimales lorsqu’ils se trouvent dans leur zone de thermoneutralité ou de confort. La zone de thermoneutralité correspond à un intervalle de conditions d’ambiance souhaitables pour les animaux, minimisant leurs efforts de thermorégulation. Cet intervalle est borné par la température critique inférieure et la température critique supérieure (Figure 1). Au sein de cette zone, l’énergie disponible pour la croissance de l’animal est optimale, c’est-à-dire qu’il s’agit de l’intervalle où l’aliment est le mieux utilisé pour les dépôts de maigre et de gras (Massabie, 2006). Dans la zone de thermoneutralité, la production totale de chaleur de l’animal est constante pour une ingestion alimentaire donnée. En-dessous de la température critique inférieure (hypothermie), la chaleur métabolique commence à augmenter pour compenser l’élévation des pertes de chaleur. En contrepartie, au-delà de la température critique supérieure (hyperthermie), la conductance des tissus est maximale et la répartition des pertes de chaleur latente commence à augmenter. La chaleur latente représente la quantité de chaleur produite par l’animal et qui est libérée par le changement de phase de l’eau (passage de l’eau sous forme liquide à de la vapeur d’eau) (Marcon *et al.*, 2017). Elle est dissipée par les pertes de vapeur d’eau via la respiration de l’animal et par l’évaporation à la surface de la peau, augmentant le taux d’humidité de l’air ambiant (Forcada et Abecia, 2019). Lorsque la température et l’humidité relative sont trop élevées, les porcs ne sont plus en mesure de conserver leur température corporelle optimale (Smith et Eastwood, 2017). Ils quittent alors la zone de thermoneutralité pour entrer dans un état d’hyperthermie ou de stress thermique.

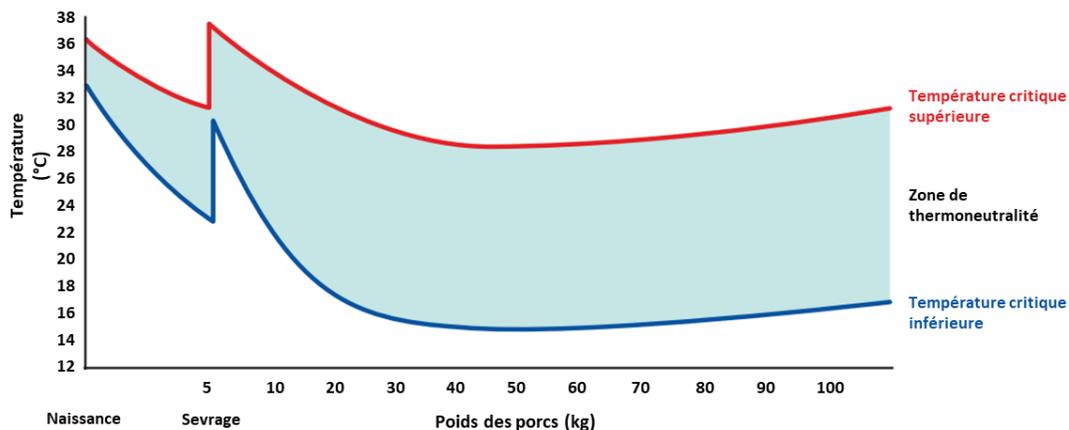


Figure 1. Zone de thermoneutralité des porcelets selon le poids (adapté de AHDB, 2016).

Lorsque la température ambiante se trouve en dehors des limites de thermoneutralité, les porcelets se retrouvent en déséquilibre thermique. Ils doivent alors se rééquilibrer en adaptant leur prise alimentaire ou en fournissant des efforts de thermorégulation. Les porcelets tentent de diminuer les effets des stress thermiques de deux façons : en augmentant la dissipation de la chaleur ou en réduisant la chaleur produite par le métabolisme. Pour augmenter la dissipation de la chaleur, il est possible d'augmenter l'exposition des surfaces corporelles en effectuant des changements de positions ou d'augmenter la superficie de contact avec une surface froide dans le but de se rafraîchir. Le taux d'évaporation respiratoire peut également être modulé en haletant. Comme l'ingestion alimentaire est une source de production de chaleur, les porcelets peuvent aussi réduire la génération de chaleur métabolique en diminuant les quantités consommées (Myer et Bucklin, 2009). La prise alimentaire du porcelet est ainsi un facteur déterminant des seuils des températures critiques (AHDB pork, 2016). L'environnement thermique doit donc être adapté afin de contrôler la chaleur produite par le métabolisme des animaux, dans le but de les garder en zone de thermoneutralité. Ceci peut être fait en ajustant la ventilation et le chauffage. Un mauvais paramétrage des conditions d'ambiance peut entraîner une réduction du gain de poids (GMQ) et une augmentation de la conversion alimentaire (CA).

Le sevrage est une période stressante pour les porcelets; les conditions d'élevage se voient changées. Le retrait de la truie, le mélange avec les autres portées, le changement de ration alimentaire et d'environnement sont tous des facteurs de stress ayant des effets importants chez le porcelet. Dans les premiers jours suivant le sevrage, la transition du lait vers une alimentation solide peut causer une diminution de la prise alimentaire. Ainsi, la diminution de la production de chaleur liée à la réduction de la prise alimentaire, ainsi que le retrait de la truie, causent une augmentation des besoins en température chez le porcelet nouvellement sevré (Le Dividich et Herpin, 1994). Un déficit énergétique très marqué est observé durant la première semaine suivant le sevrage par rapport aux exigences thermiques assez élevées du porcelet sevré (Quiniou *et al.*, 2000). C'est pourquoi il est d'autant plus important de porter une attention particulière aux paramètres décrits ci-dessous.

3.1 Ventilation

Le système de ventilation utilisé a un effet majeur sur les performances des porcelets en pouponnière. En effet, le système de ventilation permet de remplacer l'air vicié comprenant le surplus de chaleur, d'eau et le CO₂ produits par les animaux, de même que les poussières et les nombreux gaz produits par les microbes ainsi que la décomposition des excréments (Lemay, 2007) par de l'air frais (AHDB pork, 2016; Le Dividich et Herpin, 1994). La ventilation représente la principale voie de déperdition de la chaleur du bâtiment, en particulier en saison hivernale (Le Dividich et Rinaldo, 1989). Celle-ci influence ainsi à la fois la température ambiante, la température effective, les besoins en chauffage ainsi que les polluants atmosphériques. Tous ces facteurs peuvent affecter de manière importante la consommation alimentaire ainsi que les performances des porcelets sevrés.

3.2 Température ambiante

La température souhaitable pour les porcelets sevrés entre 5 et 20 kg est de 30 à 24 °C, tandis qu'elle peut atteindre 35 °C durant les 4 à 5 jours suivant le sevrage pour compenser le changement d'environnement et le stress que vivent les porcelets (CNSAE, 2014). Les besoins en température peuvent ainsi être divisés en deux périodes au moment du sevrage, soit la phase critique et la phase postcritique. La phase critique comprend les deux semaines après le sevrage, où le porcelet commence la réalimentation et s'habitue à son environnement. Les besoins en chaleur sont alors augmentés. La phase postcritique s'en suit, où le porcelet est adapté à son nouvel environnement (Le Dividich et Herpin, 1994). Durant les deux premières semaines suivant le sevrage, le porcelet a une zone de confort thermique élevée (Figure 1). Au-delà de ces deux semaines, une augmentation de la température ambiante provoque une diminution de la consommation d'aliment (Quiniou et *al.*, 2000). Lorsque la température ambiante se rapproche de celle de la peau de l'animal, les pertes de chaleur latente augmentent par accroissement du rythme respiratoire (Massabie, 2006). L'appétit et par conséquent, la consommation d'aliment, diminuent, entraînant une dégradation du GMQ (Massabie, 2006).

Le Dividich (1981) a conduit une expérimentation dans le but de déterminer la température ambiante optimale pour des porcelets sevrés âgés de 21 jours. Deux traitements ont été testés, soit différentes diminutions graduelles de la température de 28 à 20 °C, un maintien à des températures élevées (28 °C puis diminution à 26 °C) ou un maintien à des températures froides (20 °C). Les taux de croissance des porcelets maintenus à des températures élevées durant la période de post-sevrage étaient plus faibles que ceux des porcelets exposés à une température ambiante qui était diminuée graduellement. Les porcelets maintenus à des températures faibles ont également eu un GMQ plus faible et une CA plus élevée que les porcelets ayant été exposés à une diminution graduelle de la température environnementale. Les gains maximaux ont été obtenus dans la salle ayant une température de 28 °C durant la première semaine suivant le sevrage, puis une diminution de 2 °C par semaine jusqu'à la cinquième semaine.

Au froid, l'augmentation de la production de chaleur s'accompagne d'une réduction de la quantité d'énergie métabolisable disponible pour la croissance (Le Dividich et Rinaldo, 1989). Lorsque les porcs sont maintenus à des températures plus basses que leur température critique inférieure, ils auront tendance à augmenter leur prise alimentaire et à modifier leur métabolisme lipidique. Une partie de la quantité ingérée sera utilisée pour la production de chaleur afin de maintenir une température interne stable. L'indice de consommation augmentera alors que le taux de gain de poids quotidien ainsi que les dépôts lipidiques auront tendance à diminuer (Chenard, 2001; Le Dividich et Herpin, 1994). Différents changements morphologiques, anatomiques et comportementaux peuvent également être mis en place par les porcelets dans le but de diminuer les pertes de chaleurs. Des changements comportementaux à courts termes sont d'abord retrouvés, soit la piloérection, le blotissement des congénères et les changements posturaux. L'exposition prolongée à des températures froides induit des modifications morphologiques ayant pour but de réduire les pertes par la diminution des surfaces exposées, comme une apparence de porcelet radet (corps, membres, museau et queue plus courts) ainsi qu'une augmentation de la pilosité (Dauncey et Ingram, 1986).

Faure *et al.* (2012) ont analysé l'effet de l'exposition des porcelets au froid durant la période de post-sevrage (traitement froid : 23 °C à 15 °C; traitement thermoneutre : 28 °C à 23 °C). Ils ont trouvé que la consommation alimentaire était plus élevée pour les porcelets exposés à une température ambiante froide que pour les porcelets se trouvant dans leur zone de thermoneutralité, indiquant des besoins énergétiques supérieurs. Les porcelets du traitement froid ont également eu un GMQ plus faible et un indice de consommation plus élevé. Ces différents résultats combinés se sont traduits par un retard de croissance moyen de 1,1 kg chez les porcelets exposés au froid à la fin de la période de post-sevrage. L'ajustement de la température aux besoins des porcelets peut donc entraîner des répercussions importantes sur les performances zootechniques.

Les températures en élevage doivent ainsi être optimisées afin que les porcelets se trouvent en zone de thermorégulation, et éviter de descendre sous la température critique inférieure. Le Dividich (1981) a analysé l'importance de la constance de la température dans l'environnement des porcelets. Ils ont trouvé qu'une fluctuation de la température de ± 4 °C au courant de la première semaine après le sevrage causait une diminution de 10 % du GMQ durant la phase post-sevrage en plus d'augmenter les épisodes de diarrhée. Lemoine *et al.* (2022) a vérifié l'effet d'un arrêt de chauffage de courte durée sur les porcelets sevrés, soit de mimer un incident survenant au 48^e jour d'âge. Le chauffage a été arrêté durant une période de sept heures afin d'atteindre la température de 19,1 °C (supérieur à la température critique inférieure pour des porcelets de 15 kg), causant un écart de 7,6 °C par rapport à la consigne. Cette étude visait à simuler un bris d'équipement de chauffage. Aucun effet n'a été noté sur les performances de croissance ou le taux de diarrhée entre les deux salles. Cependant, la baisse de température a dégradé de façon significative l'indice de consommation des porcelets et a augmenté l'irritation des voies respiratoires. En effet, à la suite du stress thermique, les porcelets ont eu une consommation d'aliment significativement plus élevée que les porcelets témoins. Le lendemain de « l'incident », le risque de tousser ou d'éternuer était multiplié par 5,5 pour les porcelets de la salle froide comparativement au témoin. Un bref incident de chauffage peut ainsi avoir des répercussions marquées sur la consommation alimentaire et sur leur susceptibilité aux maladies.

3.3 Température effective ou ressentie par l'animal

Contrairement à la mesure de la température ambiante, soit celle notée sur un thermomètre par exemple, la température effective correspond à la température réellement ressentie par l'animal. Celle-ci est affectée par plusieurs facteurs, notamment la température de l'air, la circulation de l'air, l'humidité, le type de surface de plancher, la litière, le degré d'humidité du plancher, la taille du porc, la taille du groupe, le genre d'aliments, la prise alimentaire et le statut sanitaire (CNSAE, 2014). Baker (2004) rapporte les limites de la zone de température effective de confort des porcs selon leur masse établie par McFarlane (2004) et propose différents facteurs d'ajustement permettant de convertir la température bulbe sec en température effective selon, notamment, le type de plancher, la vitesse de l'air au niveau des animaux, l'isolation du bâtiment et la présence de système de chauffage radiant ou de système de refroidissement.

3.3.1 Vitesse d'air

La vitesse d'air au niveau des animaux affecte la température ressentie. Les jeunes animaux sont plus susceptibles aux courants d'air que les porcs plus âgés (Le Dividich et Herpin, 1994). Pour les porcelets sevrés, la vitesse d'air recommandée au niveau des animaux est de 0,1 m/s (IFIP, 2019).

Selon Baker (2004), des vitesses de 0,15, 0,46 et 1,52 m/s diminuent respectivement la température ressentie par les porcs de -3,89, -7,22 et -10 °C. Ainsi, la modulation de la vitesse de l'air doit se faire en fonction de la température ambiante ainsi que selon la température ciblée de la zone de thermoneutralité de l'animal, dans le but d'optimiser la température effective.

Par exemple, Massabie *et al.* (2001) ont remarqué que, pour des températures entre 24 et 28 °C, une vitesse moyenne de 1 m/s réduit la température ressentie par les porcs de 5 à 6 °C. Avec les courants d'air, les animaux évacuent davantage de chaleur vers l'environnement et peuvent ainsi se refroidir. Toutefois, plus la température dans la salle est chaude et se rapproche de la température de peau des porcs (environ 32 °C), moins le transfert de chaleur et le refroidissement sont efficaces (Chêne Vert, 2020). Ainsi, la vitesse de l'air doit être modulée selon la température ambiante afin de s'approcher de la zone de thermoneutralité des porcelets.

3.3.2 Humidité relative

Pour les porcelets sevrés, l'humidité relative visée se situe entre 60 et 70 % (Chenard, 2001). Pour des porcelets maintenus dans la zone de thermoneutralité, l'humidité de l'air n'influence pas de façon marquée les performances des porcelets sevrés (Le Dividich et Herpin, 1994). En soi, l'humidité relative élevée n'a pas d'influence majeure sur les porcelets (Myer et Bucklin, 2009). Cependant, l'effet de l'humidité relative peut être considérable lorsque les animaux se trouvent au-dessus de la température critique supérieure ou en dessous de la température critique inférieure (Le Dividich et Herpin, 1994). La température effective est alors divergente de la température ambiante. Un taux d'humidité élevé peut également affecter l'occurrence et la prévalence de certaines maladies infectieuses, notamment la prolifération de virus, de bactéries et de champignons. Ce taux élevé peut également contribuer à détériorer la qualité de l'aliment et à augmenter les risques de pathologies chez les porcs (Xiong *et al.*, 2017).

Brown-Brandl *et al.* (2014) estiment que jusqu'à 1,9 kg/m² d'eau par jour peuvent être évaporés des planchers. Cependant, si l'humidité relative de l'air est très élevée, il est possible que les planchers et l'environnement des porcs soient plus humides, particulièrement par temps froid où les débits de ventilation sont réduits. Par temps chaud, les porcelets tenteront de libérer d'avantage d'énergie sous forme de chaleur latente, en évaporant de l'eau dans leur corps et en la rejetant dans l'environnement par respiration. Par contre, si l'air est très humide, les porcelets devront augmenter leur rythme respiratoire pour libérer cette énergie. Une humidité relative élevée peut ainsi exacerber les effets négatifs d'une température chaude chez les porcelets en diminuant la capacité d'évaporation et en augmentant le stress thermique (Le Dividich et Herpin, 1994; Xiong *et al.*, 2017).

3.3.3 Variabilité spatiale des conditions d'ambiance

Une problématique est régulièrement observée concernant la variabilité spatiale des conditions d'ambiance dans les salles d'élevage, affectant la température effective des porcelets. Des variations importantes de température et de vitesse d'air entre les différents emplacements d'une même salle d'élevage peuvent influencer le confort et les performances des animaux. Puisque l'air frais entre à une température froide dans les salles d'élevage en hiver, il est possible d'y observer des écarts de température très importants entre les enclos et même à l'intérieur de ceux-ci.

Ces différences de température ne se reflètent pas nécessairement jusqu'au niveau des porcelets lorsque les entrées d'air sont bien calibrées. Cependant un dérèglement de cette calibration, même minime, augmente les risques d'obtenir des courants d'air froids sur les porcelets, qui eux, ont des effets importants sur la température effective. De plus, en saison froide, puisque l'entrée d'air est configurée de sorte que l'air entrant dans la salle longe le plafond pour ne pas créer de courants d'air sur les porcelets, le plafond sera plus froid que la température moyenne de la salle, ce qui augmentera la perte de chaleur par radiation des porcelets.

3.4 Polluants de l'air en élevage

En plus de la température, les polluants d'élevage peuvent également influencer les performances des porcelets sevrés. Les principaux polluants générés dans les porcheries sont l'ammoniac (NH_3), le sulfure d'hydrogène (H_2S), le dioxyde de carbone (CO_2), les poussières et les microorganismes en suspension dans l'air (Donham *et al.*, 1989). Les polluants atmosphériques, comprenant notamment les bioaérosols et les gaz, peuvent contribuer aux facteurs de stress vécus par les porcelets au moment du sevrage, affectant ainsi leurs performances (Wathes, 2001). Lee *et al.* (2005) ont comparé les effets de deux environnements sur les performances des porcelets, soit un élevage souillé et un élevage propre. Les auteurs ont trouvé que les porcelets logés dans l'environnement propre ont eu des meilleures performances de croissance ainsi qu'une meilleure consommation alimentaire, en plus d'avoir une concentration réduite en cortisol plasmatique comparativement aux porcelets de l'environnement souillé.

Ainsi, il est nécessaire d'optimiser les paramètres d'ambiance pour les porcelets dans le but d'améliorer leur confort et de maximiser leurs performances. Les contrôles de ventilation doivent aussi être maximisés dans le but de répondre aux besoins saisonniers. En raison de la diminution de la ventilation en hiver pour limiter les pertes de chaleur, une augmentation importante des polluants de l'air stagnant peut être notée. En contrepartie, en été, les changements d'air fréquents peuvent également contribuer à augmenter les mouvements d'air. Par exemple, une ventilation trop forte peut faire remonter l'ammoniac des dalots ou causer une mise en suspension de bioaérosols (Wathes, 2001; CNSAE; 2014).

La plupart des informations disponibles sur les limites d'exposition recommandées pour ces polluants proviennent de réglementation pour les normes du travail. Cependant, ces valeurs ne représentent pas les véritables exigences de qualité de l'air pour les porcs. Les limites d'exposition pour les hommes sont basées sur huit heures de travail par jour, tandis que les porcs sont présents en tout temps, sont plus près du sol et davantage en contact avec les gaz générés dans les dalots. Des niveaux élevés en CO₂ et en humidité relative sont des indicateurs d'une mauvaise ventilation. D'après Schneberger *et al.* (2015), la combinaison d'une forte exposition au CO₂ et à la poussière augmente les réponses immunitaires des voies respiratoires des porcs. L'influence combinée de ces gaz a été associée à une susceptibilité accrue aux maladies respiratoires, au stress et à une baisse de productivité des porcs (Michiels *et al.*, 2015).

3.4.1 Ammoniac (NH₃)

Le NH₃ est généré par l'hydrolyse de l'urine ou par la décomposition des matières organiques (ÉPIDALIS, 2019). Pour les porcelets sevrés, la concentration maximale recommandée pour l'ammoniac est de 20 ppm (Lemay 2007). Au-delà de 50 ppm, il est possible de constater une baisse des performances pouvant aller jusqu'à 10 % du GMQ (ÉPIDALIS, 2019; Massabie, 2006). À ces taux, la capacité du porc à évacuer les pathogènes de son système respiratoire est grandement affectée, causant de la toux, une augmentation de la fréquence respiratoire, une irritation de la muqueuse respiratoire et une augmentation des pneumonies. Des changements de comportements (nervosité, morsures de queues, d'oreilles, de flancs) sont également observés (ÉPIDALIS, 2019).

Jones *et al.* (1996) ont réalisé un test de préférence auprès de porcelets sevrés. Ils ont exposé un groupe de porcelets à des environnements contenant de l'ammoniac (20 ou 40 ppm) et à des environnements contenant de l'air frais (0 ou 10 ppm). Alors qu'ils avaient le choix entre les différents environnements, les porcelets ont passé 80 % de leur temps dans les environnements ayant une concentration égale ou inférieure à 10 ppm d'ammoniac. De plus, malgré une faible proportion de temps passé dans les environnements à 20 et à 40 ppm d'ammoniac, la courte durée des visites dans ces environnements permet de constater une aversion de la part des porcelets. Ainsi, une préférence claire pour un environnement d'élevage avec une faible concentration d'ammoniac peut ainsi être notée.

Des tests par rapport aux effets à long terme d'une exposition à une concentration élevée d'ammoniac ont également été réalisés. Jones *et al.* (2001) ont trouvé que l'exposition prolongée (environ 3,5 semaines) à une concentration de 40 ppm réduisait la perception olfactive chez la moitié des porcelets. Cela serait entre autres causé par des changements au niveau du rythme de la respiration, affectant le volume d'air acheminé jusqu'aux récepteurs olfactifs, par une occupation des récepteurs olfactifs par l'ammoniac au détriment des autres composés odorants ainsi que par une suppression de l'intensité des autres odeurs perçue par les porcelets. Rodriguez *et al.* (2020) ont trouvé que la concentration en NH₃ est liée au cycle nyctéméral, soit en effectuant une variation journalière sinusoïdale. Dans le cadre de l'étude, la concentration maximale est survenue durant la nuit, tandis que les concentrations minimales ont été mesurées

durant le jour. De plus, les auteurs ont trouvé que la concentration en ammoniac est liée à la température de consigne de l'élevage tandis que l'humidité relative est corrélée de manière inverse avec l'ammoniac, notamment expliqué par l'augmentation de la ventilation. Il est ainsi nécessaire d'optimiser les systèmes de gestion de l'ambiance durant la phase de post-sevrage dans le but de limiter les répercussions sur les performances des porcelets.

3.4.2 Dioxyde de carbone (CO₂)

La concentration en CO₂ dans les porcheries est notamment influencée par le type de bâtiment, la saison, le contrôle de la ventilation, le dimensionnement des conduites de ventilation ainsi que la hauteur de plafond (Banhazi *et al.*, 2011). Selon Smith et Crabtree (2005), une cible typique pour l'ajustement du débit minimal de ventilation est de 3 000 ppm de concentration de CO₂, alors que la limite supérieure à ne pas dépasser est de 5 000 ppm. Ils expliquent également que des niveaux élevés de CO₂ dans les salles d'élevage réduisent l'appétit des porcs, ce qui peut affecter les performances de croissance des animaux.

La concentration en CO₂ est plus faible dans les bâtiments en été qu'en hiver. L'utilisation d'un système automatisé de ventilation peut également permettre de diminuer la teneur en dioxyde de carbone dans l'air ambiant en optimisant les changements d'air (Banhazi *et al.*, 2011).

La pouponnière est le type d'élevage où les besoins en chauffage sont les plus élevés dans le domaine porcin. Ceci s'explique par le fait que les besoins thermiques des porcelets sont très élevés, notamment au moment du sevrage. Dans la presque totalité des élevages québécois, le chauffage des salles est effectué par la combustion de propane, soit par des fournaies à air pulsé ou par des éleveuses radiantes dans les plus vieux élevages. Ces systèmes de chauffage rejettent des produits de combustion tels que du CO₂ et de la vapeur d'eau directement dans les salles d'élevage, nécessitant une ventilation supplémentaire pour les évacuer, et donc du chauffage additionnel pour conserver de bonnes conditions dans la salle d'élevage (CCP, 2005). Une alternative est d'utiliser des fournaies munies d'une chambre de combustion qui est reliée à une conduite d'évacuation permettant de rejeter les gaz de combustion directement à l'extérieur (CPVQ-CPAQ, 1998).

3.4.3 Sulfure d'hydrogène (H₂S)

La concentration optimale en H₂S doit être < 5 ppm (Lemay, 2007). Ce gaz se retrouve dans les bâtiments d'élevage seulement lors de certaines opérations, comme les vidanges des pré-fosses. Durant ces courtes périodes, le taux de H₂S peut atteindre 200 ppm. Cela peut indisposer les animaux et le personnel de la porcherie. À partir de 1 000 ppm, ce gaz peut entraîner la mort (Massabie, 2006).

3.4.4 Les poussières

Selon Massabie (2006), les poussières retrouvées en élevage porcin sont dues aux aliments, aux fèces desséchées ainsi qu'aux desquamations de l'épiderme des animaux. Celles-ci fournissent un support pour les bactéries et les virus. Les différentes poussières peuvent se rendre à divers niveaux du système respiratoire selon leur taille. Par exemple, les particules ayant un diamètre inférieur à 5 µm atteignent le système respiratoire inférieur comme les bronches. Les poussières peuvent ainsi avoir des effets importants sur les maladies porcines (Wathes, 2001).

4 Émissions de gaz à effet de serre (GES)

Au Québec, en 2017, les émissions de GES attribuables à l'agriculture étaient estimées à 7,72 Mt CO₂ équ., représentant 9,8 % des émissions de la province. Ces émissions provenaient principalement de la gestion des sols agricoles (31,0 %), de la fermentation entérique (37,3 %) et de la gestion des fumiers (26,6 %) (MELCC, 2019). Quant aux émissions de la production porcine au Québec, celles-ci représentent près de 18 % des émissions totales de l'industrie de l'élevage, la gestion du lisier étant responsable d'une grande part des émissions (Dennehy *et al.*, 2017).

Une étude menée par le Groupe Ageco sur les émissions de CO₂ équ., pour l'année 2015 au Québec, établit une production de 4,22 kg CO₂ équ. par kg de carcasse de porc, dont 2,35 kg CO₂ équ. sont dus à la production et à la transformation des grains destinés à l'alimentation des porcs (Imbeault-Tétreault et Charron-Doucet, 2018). Ces résultats sont dans le même ordre de grandeur que ceux rapportés par Philippe et Nicks (2015), estimant que, globalement, l'émission de gaz à effet de serre était d'environ 4,87 kg CO₂ équ. par kg de carcasse.

Le stade de post-sevrage est responsable d'environ 10 % des émissions totales de GES en production porcine. Les émissions sont d'environ 0,86 kg CO₂ équ. par animal par jour. Plus spécifiquement pour le dioxyde de carbone, les porcelets sevrés sont parmi les plus grands émetteurs (0,69 kg CO₂/porcelet /jour) en raison de leur consommation alimentaire à volonté et du statut intensif de production. De plus, les émissions de GES dans les porcheries présentent un patron journalier en lien avec les taux de ventilation, la température et l'activité des animaux (Philippe et Nicks, 2015).

En plus des émissions par les animaux, les besoins thermiques élevés des porcelets contribuent à augmenter la production de GES et les besoins énergétiques via l'utilisation de systèmes de chauffage. Les émissions de gaz à effet de serre sont directement reliées à la température et au chauffage (Philippe et Nicks, 2015). Selon les Chambres d'agriculture de Bretagne (2010), la pouponnière est le stade physiologique ayant les plus grands besoins énergétiques (36 %). Pour la pouponnière spécifiquement, 79 % de l'énergie utilisée pour ce stade physiologique est nécessaire pour le chauffage et 15 % pour la ventilation. Cependant, il y a de fortes variabilités liées au climat.

5 Stratégies d'optimisation du confort des porcelets

La température élevée nécessaire pour les porcelets sevrés peut engendrer des coûts de chauffage élevés. Différentes stratégies peuvent ainsi être mises en place afin de réduire l'utilisation du chauffage, notamment la création d'un microenvironnement, la diminution du chauffage durant la nuit, les échangeurs de chaleur ainsi que les fournaies au propane avec rejets à l'extérieur. Ces différentes stratégies permettent à la fois de diminuer les besoins de chauffage pour le bâtiment, et de limiter la production de polluants atmosphériques tels que les gaz. Les échangeurs d'air récupérateurs de chaleur ainsi que les fournaies au propane avec rejet des gaz de combustion à l'extérieur du bâtiment sont déjà commercialisés et ont été éprouvés dans le domaine avicole.

5.1 Microenvironnements

Parmi les stratégies utilisées, il est possible de retrouver la création d'un microenvironnement dans la pouponnière. Le microenvironnement est un logement à température plus élevée que la température globale du bâtiment. Ceci peut être retrouvé en offrant une niche aux porcelets sevrés ou en utilisant des lampes infrarouges par exemple. Ces différents équipements permettent de réduire les courants d'air sur les porcelets, tout en conservant la chaleur produite par les animaux (Le Dividich et Herpin, 1994).

5.2 Réduction du chauffage la nuit

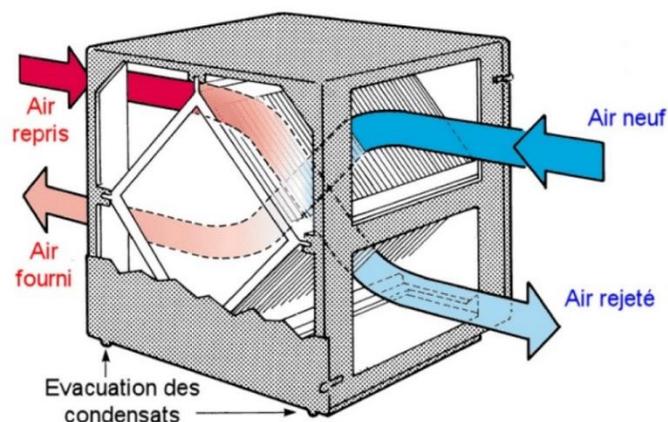
Il est aussi possible de diminuer l'utilisation du chauffage durant la nuit. En effet, les porcelets possèdent une variation métabolique circadienne qui est plus faible durant la nuit comparativement au jour. La température critique inférieure des porcelets sevrés est donc inférieure durant la nuit comparativement au jour (van der Hel *et al.*, 1986).

Johnston *et al.* (2013) ont testé l'effet d'une diminution nocturne de la température ambiante sur les porcelets sevrés. Les auteurs avaient pour objectif de réduire la température durant la nuit afin de limiter la quantité de chauffage requise auprès des porcelets sevrés, notamment dans le but de limiter les coûts qui y sont associés ainsi que les effets environnementaux. Comparativement à la salle témoin, la température ambiante de la salle traitement était réduite de 8,3 °C de 19h00 à 7h00 à partir du 5^e jour suivant le sevrage jusqu'au départ en engraissement. La ventilation n'a pas été influencée, seulement le chauffage a été modifié dans le but de garder les différentes consignes. Aucun effet significatif n'a été noté sur le poids final des porcelets, sur le gain moyen quotidien, sur la consommation alimentaire quotidienne ou sur le ratio de consommation alimentaire. Cependant, cette stratégie a permis de réduire significativement la consommation de carburant pour le chauffage de 30 % ainsi que d'électricité de 20 %. Ainsi, la diminution de la température ambiante nocturne peut permettre des économies importantes au niveau des ressources, sans répercussion négative sur les porcelets.

5.3 Échangeurs de chaleur

La technologie des échangeurs d'air récupérateurs de chaleur n'est pas nouvelle dans les porcheries. Elle a connu une certaine popularité dans les années 1990-2000 et les avantages des échangeurs de chaleur sont bien documentés. Ils permettent une réduction des besoins de chauffage et préchauffage de l'air entrant, réduisant les fluctuations de température et les risques de courants d'air froid sur les animaux (CPVQ-CPAQ, 1998). Cependant, avec les anciens modèles, cette technologie était mal adaptée à l'environnement porcin (air contenant beaucoup de poussières, d'humidité et d'ammoniac), ainsi son efficacité était moindre (encrassement, système non lavable) et beaucoup de problématiques étaient rencontrées (bris, système qui gèle, pas de mode dégivrage). En raison de ces faits, les anciens modèles d'échangeurs de chaleur ne sont pratiquement plus utilisés aujourd'hui. Cependant, de nouveaux produits adaptés à la réalité agricole sont maintenant disponibles sur le marché et les problématiques des premières générations ont été résolues.

L'échangeur d'air récupérateur de chaleur de la compagnie ESA permet de réduire les coûts énergétiques en récupérant la chaleur de l'air vicié évacué du bâtiment pour préchauffer l'air frais provenant de l'extérieur. Ce système est de plus en plus utilisé dans la volaille, mais très peu connu dans le porc. L'échangeur de chaleur air-air est un caisson dans lequel se croisent deux réseaux de canalisations indépendantes et non communicantes (Figure 2). Le transfert des calories se fait par conduction : l'air chaud vicié extrait du bâtiment et l'air frais extérieur traversent l'échangeur en flux croisé. Un échange d'énergie s'opère alors entre les deux réseaux de canalisations permettant un réchauffement de l'air entrant sans contact avec l'air vicié sortant de la porcherie. Ainsi, au moment où l'air entre dans le bâtiment, il est déjà préchauffé d'environ 50 % par rapport à sa température initiale, causant une diminution des besoins en chauffage pour les animaux. Cette technologie prévient également les courants d'air froid continus sur les porcelets, améliorant ainsi le confort et le bien-être des animaux. Aucune étude n'a cependant été réalisée sur l'efficacité de ce système dans les pouponnières porcines.



(Source : https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/VIP/VIP06_Heat_Recovery.fr.pdf)

Figure 2. Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur air-air.

5.4 Fournaies avec rejet des gaz de combustion à l'extérieur

À ce jour, la majorité des systèmes de chauffage au propane rejettent leurs gaz de combustion dans les salles d'élevage. En pratique, ce n'est pas forcément la totalité de l'air ambiant de la salle qui est renouvelé en même temps, ce qui entraîne une augmentation de la concentration de CO₂ dans la salle d'élevage. Des niveaux élevés de CO₂ ne sont pas souhaitables pour les porcelets.

L'utilisation de fournaies au propane avec rejet des gaz de combustion à l'extérieur du bâtiment devrait permettre d'obtenir une meilleure qualité d'air, car aucun gaz de combustion du système de chauffage n'est envoyé dans la salle avec les animaux. Une concentration plus faible de CO₂ pourrait permettre de diminuer le débit de ventilation et conséquemment, de réduire la quantité de chaleur évacuée par le système de ventilation, ce qui entraînerait une réduction de la consommation de propane. Ce type d'équipement apporte des avantages agronomiques, en lien avec une meilleure qualité de l'air et des besoins de chauffage optimaux, des avantages environnementaux liés à la diminution de la consommation de combustibles, ainsi que des avantages économiques en lien avec l'optimisation du chauffage et de la ventilation pour les animaux.

6 Matériel et méthodes

6.1 Traitements

Dans le cadre du projet trois traitements ont été comparés :

- Traitement **témoin** :
 - Contrôle automatique de l'environnement du bâtiment et chauffage au propane;
 - Rejet des gaz de combustion à l'intérieur de la salle d'élevage (fournaises conventionnelles).
- Traitement **sans rejet de combustion** :
 - Contrôle automatique de l'environnement du bâtiment et chauffage au propane;
 - Rejet des gaz de combustion à l'extérieur de la salle d'élevage.
- Traitement **échangeur** :
 - Contrôle automatique de l'environnement du bâtiment;
 - Utilisation d'un échangeur de chaleur air/air en comblant le déficit thermique avec un système de chauffage au propane.
 - Rejet des gaz de combustion à l'intérieur de la salle d'élevage.

6.1.1 Traitement témoin

Une fournaise conventionnelle au propane était utilisée pour le traitement témoin (rejet de gaz de combustion directement dans la salle d'élevage). Dans les salles témoins, un seul ventilateur d'extraction (Avantis - pouponnière AGR3 : 16 pouces de diamètre; Groupe Robitaille – pouponnière 227D : 12 pouces de diamètre) était en fonction afin d'extraire l'air vicié du bâtiment.

Pour ce qui est de l'ouverture des entrées d'air modulaires, une ouverture d'environ ¼ pouce permettait à l'air frais d'entrer dans la salle. Cet air frais provenait du comble et avait les mêmes caractéristiques que l'air extérieur (température et humidité relative).

Pour maintenir la température de la salle à la température désirée, une fournaise au propane à air pulsé (LB White, Figure 3) de 50 000 à 100 000 BTU (30 kW) était utilisée. Cette fournaise était située au centre des salles, du côté des murs extérieurs et propulsait l'air chaud sur un déflecteur en "Y".



Figure 3. Fournaise au propane LB White de 50 000 à 100 000 BTU (30 kW).

6.1.2 Traitement sans rejet de combustion

Le traitement sans rejet de combustion consistait à utiliser un système de chauffage au propane dont le rejet des gaz de combustion se faisait à l'extérieur de la salle d'élevage (Figure 4).



a)



b)

Figure 4. Fournaise au propane avec rejet des gaz de combustion à l'extérieur du bâtiment (Modine HDS) (a) et cheminée d'évacuation des gaz à l'extérieur du bâtiment (b).

Dans ce type de système de chauffage, la chambre de combustion est séparée de l'apport d'air frais. Ainsi, l'air ambiant n'est pas mélangé aux gaz de combustion ayant déjà été chauffés. Les rejets de combustion sont expulsés à l'extérieur de la salle d'élevage via une conduite menant à l'extérieur du bâtiment. De plus, le compartiment scellé de la fournaise permet de protéger la valve des gaz de combustion, le contrôle d'ignition, le conduit ainsi que les brûleurs de l'environnement immédiat (Modine, 2023). Dépendamment des modèles et des fabricants, l'air entrant dans le système peut provenir de la salle d'élevage ou de l'extérieur.

6.1.3 Traitement échangeur de chaleur

Le traitement récupérateur de chaleur consistait à utiliser un échangeur de chaleur air-air. Le déficit thermique était comblé par un système de chauffage au propane dont les rejets étaient effectués directement dans la salle d'élevage (LB White de 50 000 à 100 000 BTU). L'échangeur de chaleur air-air (Figure 5) est conçu de façon à récupérer l'air chaud évincé du bâtiment afin de préchauffer l'air entrant dans la salle. Il peut être utilisé en mode échangeur, dans le but de préchauffer l'air entrant dans le bâtiment, mais également en mode extraction, comme un ventilateur conventionnel. Il sert à la fois d'entrée et de sortie d'air. De plus, il possède ses propres sondes de température (quatre sondes).

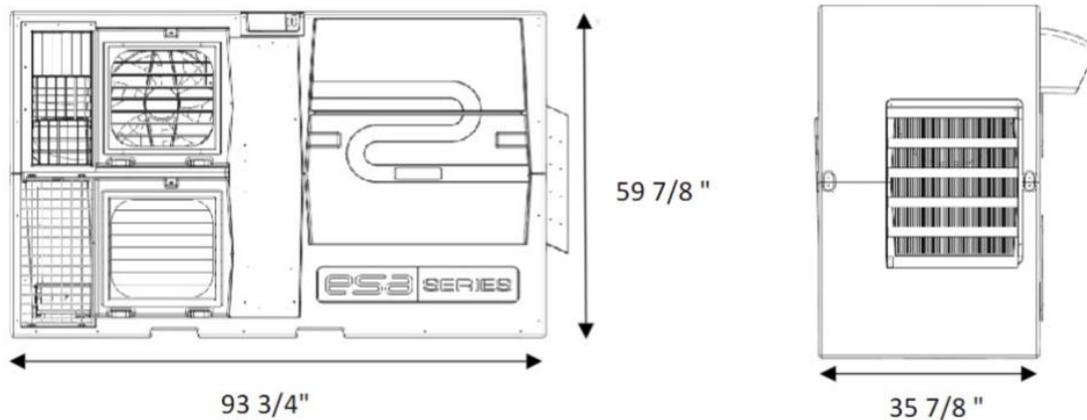


Figure 5. Dessin technique de l'échangeur de chaleur air-air ESA-3000 (Source : Énergie Solutions Air, S.d. (a)).

L'ESA-3000 (une version prototype a été utilisée dans le cadre du projet) est encastré directement dans le mur de la ferme (Figure 6). L'échangeur de chaleur air-air permet la gestion complète de la ventilation dans la salle d'élevage. Il sert à lui seul d'entrée d'air frais préchauffé et d'extraction de l'air vicié. Les ventilateurs muraux ont ainsi été arrêtés, tout comme les entrées d'air modulaires qui ont été fermées. Le modèle ESA-3000 peut être manœuvré à distance via une plateforme connectée. Le modèle d'échangeur air-air ESA-3000 possède une plage d'opération de 300 à 3000 CFM (Énergie Solutions Air, S.d. (a)).



Figure 6. Vue extérieure (a) et intérieure (b) de l'échangeur de chaleur air-air ESA-3000.

L'ESA-3000 est doté d'un système automatique de nettoyage, permettant de limiter les interventions nécessaires de la part des ouvriers agricoles. De plus, ce système est équipé d'un système de dégivrage automatique lors des grands froids en saison hivernale (Énergie Solutions Air, S.d. (b)).

6.2 Description du dispositif expérimental

Les essais ont eu lieu sur deux sites de pouponnière, plus précisément dans deux bâtiments représentatifs de la filière porcine québécoise en ce qui a trait au nombre de places, au système de ventilation et de chauffage, aux équipements en place et à la conduite d'élevage (Avantis - pouponnière AGR3 et Groupe Robitaille - pouponnière 227D).

Les deux bâtiments (Avantis - pouponnière AGR3 et Groupe Robitaille - pouponnière 227D) ont une gestion d'élevage en tout plein-tout vide (TPTV) : tous les porcelets arrivent en même temps dans la pouponnière (poids d'entrée : 6-7 kg) et y séjournent pendant sept semaines avant d'être envoyés en engraissement (poids de sortie : 25-30 kg). Au total, ce sont 14 lots, soit 7 par pouponnière, qui ont été suivis d'août 2021 à avril 2023. La durée d'élevage de chaque lot est de 49 jours et l'intervalle entre deux lots (entre deux entrées de porcelets) est de 56 jours. Il y a donc une période de 7 jours entre chaque lot durant laquelle les bâtiments sont vides; temps nécessaire pour procéder au lavage, à la désinfection et au séchage des salles avant l'arrivée du lot subséquent.

Puisque l'objectif principal du projet était d'évaluer des technologies qui pourraient permettre de réduire les GES produits par le système de chauffage au propane dans les bâtiments de pouponnière porcine, les essais ont eu lieu lors des saisons froides. À ce moment, le système de ventilation fonctionne à un débit d'air minimum pour évacuer l'air vicié et les gaz de la salle, les changements d'air sont donc minimaux.

6.2.1 Description des bâtiments d'élevage et des traitements

Le premier élevage où se sont déroulés les essais est la pouponnière #3 du site AGR. Cet élevage appartient au Regroupement Porcin Avantis Olymel (RPAO s.e.c.), et il est opéré par Avantis Coopérative. Ce site, situé dans un boisé à Saint-Bernard en Beauce, comporte quatre bâtiments de pouponnière de 1 760 places chacun. Chaque bâtiment est constitué de quatre salles d'élevage de 440 places, dont les planchers sont faits de plastique (Figure 7). Les essais ont eu lieu de décembre 2021 à mars 2023.



Figure 7. Salle d'élevage de la pouponnière AGR3 d'Avantis Coopérative.

Parmi les quatre salles disponibles dans la pouponnière #3 du site AGR, les salles 1 et 2 ont été équipées à la fois avec des échangeurs d'air récupérateurs de chaleur et des fournaies au propane avec cheminée d'évacuation des gaz (Figure 8). Ceci a permis d'interchanger les traitements de ces salles d'un lot à l'autre. Les deux autres salles servaient de salle témoin; la ventilation et le chauffage réalisés de manière conventionnelle, soit via l'entrée de l'air extérieur par les entrées d'air modulaires au plafond, l'utilisation du système de chauffage actuel au propane rejetant les gaz de combustion dans la salle et l'extraction de l'air vicié par les ventilateurs muraux.

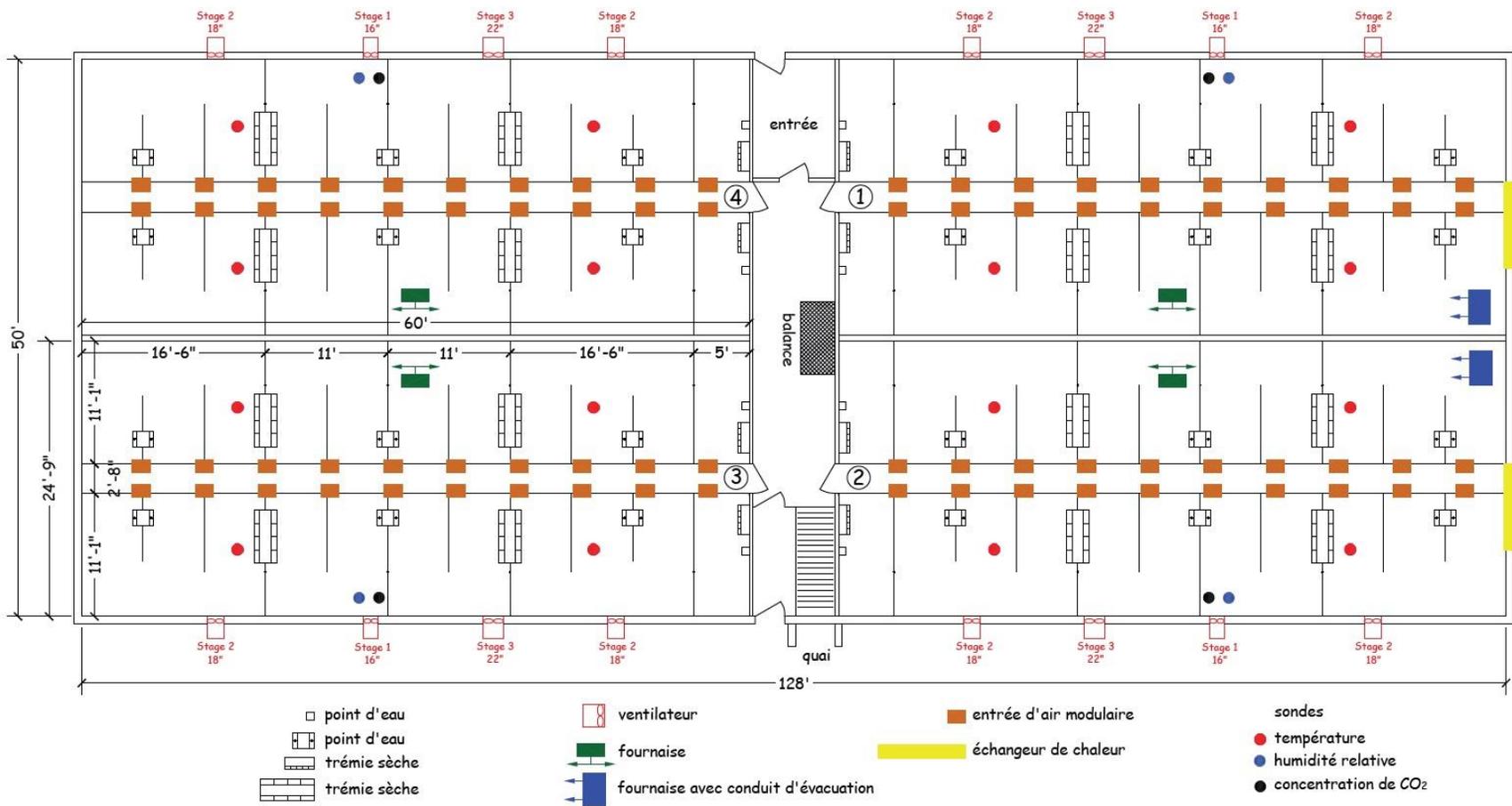


Figure 8. Plan de plancher de la pouponnière AGR3 d'Avantis Coopérative.

Le second site appartient au Groupe Robitaille, soit la pouponnière 227D, située à Mont-St-Grégoire. Ce site comporte quatre bâtiments de pouponnière de 2 000 places chacun. Chaque bâtiment est constitué de quatre salles d'élevage de 500 places (Figure 9). Les planchers des parcs étaient en plastique.



Figure 9. Salle d'élevage de la pouponnière 227D du Groupe Robitaille.

Sur le site du Groupe Robitaille, c'est plutôt dans les salles 3 et 4 de la pouponnière 227D que les échangeurs d'air récupérateurs de chaleur (salle 4) et les fournaies au propane avec cheminée d'évacuation des gaz (salle 3) ont été installés (Figure 10). Les salles 1 et 2 étaient les salles témoins. Sur ce site de pouponnière, les salles des différents traitements étaient fixes durant la totalité de l'expérimentation.

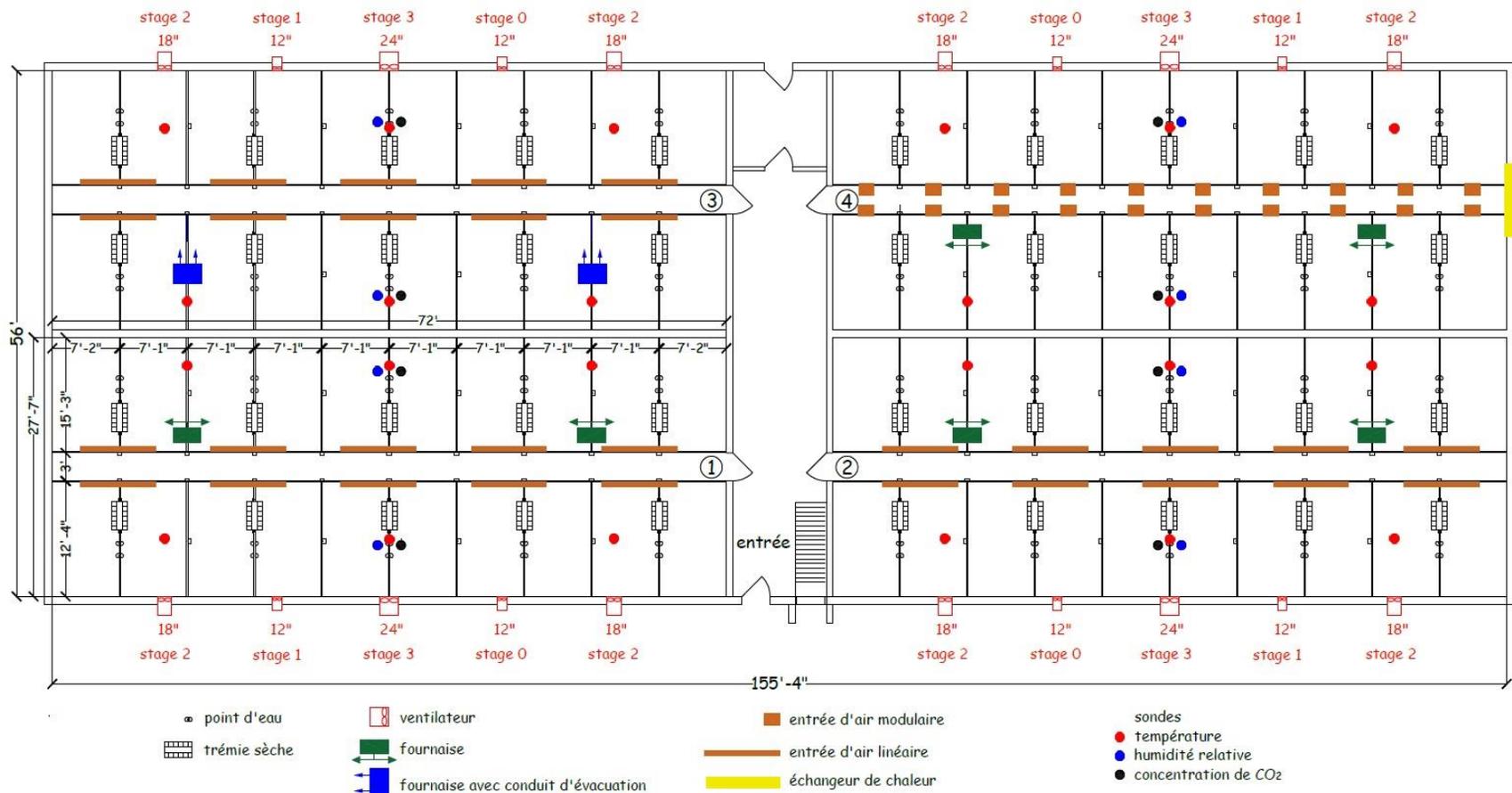
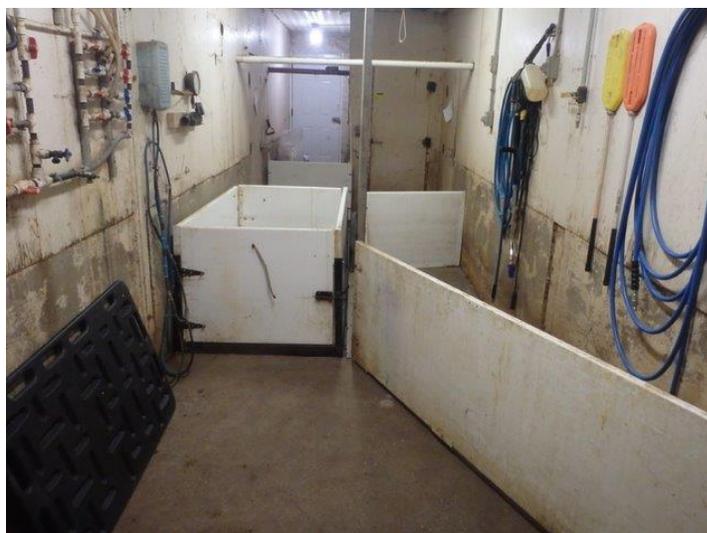


Figure 10. Plan de plancher de la pouponnière 227D du Groupe Robitaille.

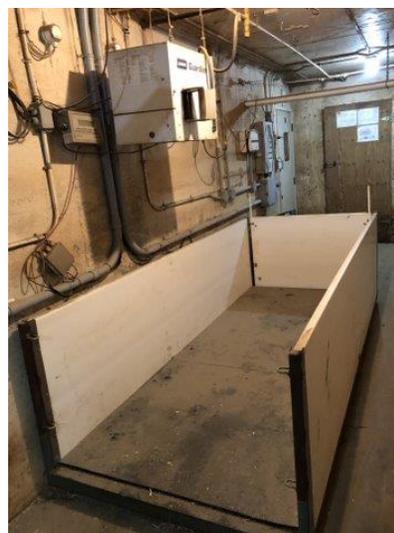
6.2.2 Pesée et alimentation des porcelets

Dans les deux bâtiments de pouponnière (Avantis - pouponnière AGR3 et Groupe Robitaille - pouponnière 227D), une pesée des porcelets ainsi qu'un allotement étaient effectués à leur entrée (Figure 11) dans le but de répartir des porcelets de gabarit et de poids semblables dans chacune des salles. Une pesée des porcelets avait également lieu à la fin du lot, plus précisément la journée précédant leur départ.

Les ouvriers notaient quotidiennement tout événement qui avait lieu à la ferme dans un journal de bord (manque de moulée ou d'eau, comportements anormaux, agressions, bris, impressions par rapport aux conditions d'ambiance, etc.). Lorsqu'il y avait de la mortalité ou de l'euthanasie, la provenance du porcelet, son poids (pesé sur la balance) ainsi que la cause possible de la mortalité étaient notés.



a)



b)

Figure 11. Balance de plancher utilisée dans la pouponnière #3 du site AGR d'Avantis Coopérative (a) et dans la pouponnière 227D du Groupe Robitaille (b).

Dans les deux pouponnières, les porcelets étaient alimentés à volonté via des trémies sèches (Figure 12). Comme chaque salle avait son propre silo et sa propre ligne de distribution d'aliment, il a été possible de connaître la consommation réelle d'aliment dans chacune des salles de chacun des bâtiments. Pour ce faire, la moulée restante à la fin du lot de chaque silo était aspirée et pesée, de même que la moulée restante dans les trémies à la suite du départ des porcelets. Pour connaître la consommation réelle d'aliment d'une salle, il suffisait d'additionner les quantités de moulée livrées dans le silo dédié à la salle et de soustraire la moulée aspirée ainsi que celle restante dans les trémies.

$$\text{Moulée consommée} = \text{moulée livrée} - \text{moulée restante}$$



a)



b)

Figure 12. Trémies sèches installées dans chacun des parcs de la pouponnière #3 du site AGR d'Avantis Coopérative (a) et de la pouponnière 227D de Groupe Robitaille (b).

L'eau était distribuée via des systèmes de suces situées dans des auges chez Avantis - pouponnière AGR3 et des bols (à couvercle et urinoir) chez Groupe Robitaille - pouponnière 227D (Figure 13).



a)



b)

Figure 13. Points d'eau dans la pouponnière #3 du site AGR d'Avantis Coopérative (a) et dans la pouponnière 227D du Groupe Robitaille (b).

Ainsi, l'analyse des données de poids des animaux (entrée, mortalités, sortie), ainsi que la mesure de la quantité d'aliment ont permis de connaître les performances zootechniques des animaux selon le traitement (gain de poids technique, efficacité alimentaire et mortalité).

6.3 Système de contrôle des conditions d’ambiance et de la ventilation

6.3.1 Équipements et consigne

Le système de contrôle automatique Maximus a été utilisé dans tous les traitements et la même stratégie de ventilation, permettant de répondre aux besoins des porcelets sevrés, a été adoptée pour chacune des salles. Le système de ventilation en place avant le démarrage du projet était similaire entre les deux pouponnières, soit un système de ventilation mécanique : des ventilateurs d’extraction évacuent l’air vicié du bâtiment. L’entrée d’air frais se faisait par le plafond via des entrées d’air modulaires et le chauffage était assuré par des fournaies au propane à air pulsé. Les équipements de chauffage ont été adaptés pour répondre aux besoins des différents traitements.

La même stratégie de contrôle de la température a été utilisée dans chacune des salles. L’évolution des consignes de température dans la salle et des températures de départ et d’arrêt du chauffage en fonction de l’âge des porcelets sont présentées au Tableau 1. La ventilation était paramétrée en fonction de la température de consigne. Cependant, une compensation, soit une augmentation du débit minimum de ventilation, en humidité relative et en dioxyde de carbone a aussi été paramétrée. Pour l’humidité relative, une augmentation du débit de 1,5 % de la consigne était réalisée pour toute augmentation de l’humidité relative entre 67 et 77 %. Pour le CO₂, une augmentation du débit de 2 % était effectuée lorsque la concentration dépassait 4 500 ppm.

Tableau 1. Évolution des consignes de température pour un lot d’élevage en période froide en fonction de l’âge des porcelets

Jours d’élevage	Âge des porcelets (jours)	Consigne de température (°F)	Départ chauffage (°F)	Arrêt chauffage (°F)
0	21	87	85	85,5
4	25	86	84	84,5
7	28	84	82	82,5
14	35	81	79	79,5
21	42	79	77	77,5
28	49	76	74	74,5
35	56	74	72	72,5
42	63	72	70	70,5
49	70	70	68	68,5

De plus, les différentiels et les écarts de ventilation étaient paramétrés de manière identique pour chacune des salles, et ce, peu importe le traitement. Des ajustements plus spécifiques à chacun des traitements ont été apportés au contrôle de ventilation pour être en mesure de faire varier la ventilation (entrée d'air, échangeur de chaleur, ventilation, chauffage) en fonction des particularités de chacun des traitements.

6.3.2 Instrumentation

Afin de monitorer les conditions d'ambiance, ainsi que la consommation d'eau et de propane, différents instruments de mesure ont été installés dans les deux bâtiments de pouponnière et raccordés au contrôle de ventilation Maximus (Figure 14). Ce système monitoré la température, l'humidité relative, la concentration de CO₂, la pression statique, la consommation d'eau et de propane. Le contrôle peut également faire varier les différentes composantes du système de ventilation (entrée d'air, ventilateurs, chauffage, recirculation).



Figure 14. Contrôleur Maximus permettant de contrôler et de monitorer les conditions d'ambiance.

Dans chacune des salles du projet, les capteurs suivants ont été connectés au contrôle de ventilation Maximus (Figure 15) :

- 4 sondes de température, dont l'une monitorait la température de l'air entrant dans la salle (Maximus);
- 1 sonde d'humidité relative (Dol Sensors, DOL 104 Sensor);
- 1 sonde de CO₂ (Dol Sensors, DOL 19 CO2 Sensor);
- 1 sonde de pression statique (Dwyer®, Series MS Magnesense® Differential Pressure Transmitter);
- 1 compteur d'eau (Carlson Meter, VDP® Meter);
- 1 compteur de propane (EKM Metering inc., EKM-PGM-075).

L'humidité relative à l'extérieur a également été mesurée.

Température



Humidité relative



Dioxyde de carbone (CO₂)



Pression



Compteurs d'eau



Compteur de propane



Figure 15. Instrumentation utilisée dans chacune des salles d'élevage.

De plus, les échangeurs de chaleur ESA-3000 utilisés dans le cadre du projet disposent de quatre sondes de température intrinsèques : température de l'air intérieur, température de l'air expulsé à la suite du transfert d'énergie, température de l'air extérieur, température de l'air envoyé dans la salle à la suite de l'apport d'énergie.

6.3.3 Vitesse de l'air

Des mesures de vitesse d'air ont été effectuées dans chacun des enclos afin de s'assurer qu'il n'y avait pas de courants d'air indésirables envoyés sur les porcelets. Les relevés de vitesse de l'air ont également permis de s'assurer que la circulation de l'air était relativement uniforme pour tous les parcs de la salle.

Des mesures de vitesse d'air à la hauteur des animaux ont également été effectuées durant le projet afin de valider la distribution de l'air dans les salles. Ces mesures ont été réalisées à deux positions dans chacun des parcs des salles à l'étude à la hauteur des animaux, afin d'obtenir les distributions spatiales des vitesses d'air et ainsi mieux comprendre le modèle de distribution de l'air dans les salles selon les saisons, le taux de ventilation et selon la stratégie de ventilation utilisée.

6.4 Laboratoire MESANGES

Du 10 janvier au 7 mars 2023, une campagne intensive de mesures en continu des émissions à la sortie des ventilateurs de chacun des traitements a été effectuée pendant un lot complet chez Avantis - pouponnière AGR3, en collaboration avec l'IRDA. L'IRDA possède un laboratoire mobile de mesure de la qualité de l'air (Laboratoire MESANGES; Figure 16), lequel loge l'ensemble des équipements nécessaires pour analyser l'air sortant du bâtiment. Ce laboratoire mobile permet de réaliser un bilan complet des émissions pour chaque traitement (mesures en continu du débit de ventilation, du CO₂, du CH₄, du NH₃ ainsi que de la température et l'humidité).

Afin de mesurer la concentration des émissions de gaz à la sortie du bâtiment, des tubes permettant de capter l'air ont été installés à divers endroits du bâtiment:

- 1- À l'intérieur du bâtiment devant chaque ventilateur en fonction.
- 2- À la sortie des cheminées des fournaies qui expulsent les gaz de combustion à l'extérieur.
- 3- Vis-à-vis des entrées d'air (pour comparer la qualité de l'air sortant à celui de l'air entrant dans le bâtiment).



Figure 16. Laboratoire mobile MESANGES de l'IRDA, installé près de la pouponnière #3 du site AGR d'Avantis Coopérative pour la mesure en continu des émissions à la sortie des ventilateurs.

Les tubes acheminant l'air du bâtiment à l'unité mobile étaient passés dans un conduit chauffé afin d'éviter toute condensation due aux variations de températures extérieures. Ces tubes ont ensuite été reliés à l'intérieur de l'unité mobile à une valve multi-positions permettant d'analyser plusieurs points de mesure avec un seul équipement d'analyse. Cette valve permutait ses positions toutes les 15 minutes et enregistrait les données dans un acquiiseur de données (CR10, Campbell Scientific, Logan, USA) installé à l'intérieur de l'unité mobile.

Dans l'unité mobile, la quantification de CO_2 et CH_4 a été réalisée à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse (GC 6890N, Agilent, USA) équipé d'un détecteur à ionisation de flamme (FID) ainsi que d'une pré-colonne Poropak Q et d'une colonne Paropak Q (40 °C). La calibration pour le CO_2 et le CH_4 a été réalisée avec un gaz standard à des concentrations de 2 ppmv et 1 500 ppmv respectivement. Le NH_3 a été analysé par spectroscopie non dispersive dans l'infrarouge, lequel a été calibré avec un gaz standard à 20 ppmv (NDIR, Seimens, modele Ultramat 6E, Munich).

6.4.1 Mesure du débit

Pour la mesure du taux de ventilation, une calibration à priori a été réalisée (Figure 17). Avant l'entrée des porcelets, le taux de ventilation des salles a donc été mesuré à l'aide d'une approche utilisant un conduit standardisé à différents taux. Une courbe de calibration a été créée, permettant d'évaluer le taux de ventilation en fonction du pourcentage de fonctionnement des moteurs des ventilateurs.



Figure 17. Montage utilisé pour la calibration standardisée des ventilateurs.

L'unité mobile possède un point d'accès Wi-Fi permettant de vérifier, à distance, le bon fonctionnement des équipements ainsi que de suivre les données enregistrées durant les 7 semaines du lot. Quelques visites ont été effectuées afin de vérifier le bon fonctionnement du système d'acquisition de données et de corriger les problèmes au besoin (entretiens, équipements, calibrations, etc.).

6.4.2 Calcul des émissions des gaz évacués de chacune des salles de pouponnière

Les émissions de NH_3 , CO_2 , CH_4 et N_2O ont été calculées en multipliant leurs différentes concentrations par le débit massique d'air de ventilation. Elles ont été par la suite divisées par la masse totale des porcs dans la salle afin de considérer la variation du poids (ou nombre de porcs) entre les salles (équation 1) :

$$E_{\text{gaz}} = \frac{\Delta C_{\text{gaz}} * \dot{Q}_{\text{gaz}}}{m_{\text{porcs}}} \quad (1)$$

Où E_{gaz} représente les émissions du gaz ($\text{mg}_{\text{gaz}}/\text{min}\cdot\text{kg}_{\text{porc}}$);

ΔC_{gaz} est la différence en concentration (ppm_v) du gaz dans l'air à la sortie de la chambre (C_{out}) avec celle à l'entrée de la chambre (C_{in});

\dot{Q}_{gaz} signifie le débit massique du gaz dans l'air de ventilation, soit le débit d'air rentrant dans la chambre ($\text{kg}_{\text{gaz}}/\text{min}$);

m_{porc} est la masse totale des porcs dans la chambre (kg_{porc}).

Le débit massique du gaz (\dot{Q}_{gaz}) est calculé à partir du débit d'air rentrant dans la chambre (Q_{air} , m³/min) et de la densité du gaz (ρ_{gaz}) (équation 2) :

$$\dot{Q}_{gaz} = Q_{air} * \rho_{gaz} = Q_{air} * \frac{M_{gaz}}{M_{air}} * \rho_{air} \quad (2)$$

Où M_{gaz} représente la masse molaire (g/mol) du gaz;
 M_{air} représente la masse molaire (g/mol) de l'air;
 ρ_{air} est la densité de l'air (kg/m³_{air}).

Comme cette dernière est en fonction de la pression et de la température, elle est déterminée selon l'équation 3 (ASAE, 2003) :

$$\rho_{air} = \frac{P_{atm} - P_v}{287 T} \quad (3)$$

Où P_{atm} représente la pression atmosphérique (fixée à 101 325 Pa);
 P_v représente la pression de vapeur (Pa; équation 5);
 T exprime la température (K).

En combinant les équations 1 à 3, il est possible d'obtenir l'équation 4:

$$E_{gaz} = \frac{(C_{out} - C_{in}) * Q_{air} * \frac{m_{gaz}}{m_{air}} * \frac{P_{atm} - P_v}{287 T}}{m_{porc}} \quad (4)$$

Dans les équations 3 et 4, la pression de vapeur (P_v) est calculée grâce à l'équation 5 :

$$P_v = \frac{HR * P_{sat}}{100} \quad (5)$$

Où HR est l'humidité relative;
 P_{sat} est la pression de saturation (Pa; équation 6).

La pression de saturation est obtenue à partir de l'équation 6 (ASAE, 1995) :

$$P_{sat} = R * e^{\left(\frac{A + B * T + C * T^2 + D * T^3 + E * T^4}{F * T - G * T^2} \right)} \quad (6)$$

Où T signifie la température (K, entre 273,16 et 533,16 K);
 R, A, B, C, D, E, F et G sont des constantes.

6.5 Analyses

Les différentes mesures prises au cours de l'étude concernant les conditions d'ambiance, la qualité de l'air, la consommation de propane, la consommation d'eau et la consommation énergétique ont permis d'évaluer l'effet de l'utilisation des échangeurs d'air récupérateurs de chaleur ainsi que des fournaies au propane rejetant les gaz de combustion à l'extérieur comparativement à l'utilisation conventionnelle des fournaies au propane en pouponnière.

Le bilan d'émissions des gaz effectué par l'IRDA (laboratoire MESANGES) chez Avantis - pouponnière AGR3 a permis de connaître exactement le bilan des émissions en GES et ainsi chiffrer les diminutions selon l'utilisation de chaque technologie. Une validation globale des émissions de gaz de combustion (CO₂) a été faite en fonction de la quantité de propane utilisée.

Les effets des conditions d'ambiance sur la conversion alimentaire des porcelets, permettant d'optimiser l'utilisation des aliments, ont également été considérés dans le bilan environnemental. Cependant, les améliorations potentielles des performances en pouponnière n'ont pas été transposées en engraissement, c'est-à-dire que l'optimisation des gains en post-sevrage n'a pas été considérée pour la suite de l'élevage.

6.5.1 Retrait des données

Il a malheureusement été nécessaire de rejeter certaines données des pouponnières AGR3 et 227D. Pour la pouponnière AGR3 du groupe Avantis, des problèmes de balance ont été rencontrés durant le premier lot (2021-10-28 au 2021-12-15). La pesée finale des porcelets n'a ainsi pas pu être réalisée. Les données de ce lot ont donc été rejetées. Pour la pouponnière 227D du Groupe Robitaille, les données de performances zootechniques et de conditions d'ambiance n'ont pas pu être valorisées dans l'analyse. La présence de vents importants et la configuration de la salle ont eu des effets marqués sur le débit de ventilation minimum, alors que cela n'était pas escompté en début de projet.

Perturbations du système de ventilation

Il existe un fort lien entre les vents extérieurs et le système de ventilation de la ferme. En effets, les forts vents influencent le fonctionnement de la stratégie de ventilation en réduisant ou en augmentant les débits de ventilation. La pouponnière 227D du Groupe Robitaille est située au milieu de champs et se trouve ainsi fortement exposée aux vents. Lors des mesures des débits de ventilation des ventilateurs (test de variabilité spatiale), de forts vents ont pu être observés par moment, faisant varier de manière importante des débits d'air dans la ferme (jusqu'à 35 %). Lors des tests de débit, le vent augmentait ou diminuait les débits de ventilation. Ainsi, lorsque les débits des chambres 3 et 4 (côtés face aux vents dominants) étaient diminués par la pression du vent, les débits des chambres 1 et 2 (côté opposé aux vents) étaient au contraire augmentés.

Configuration de la salle et contraintes rencontrées avec le système de récupération de chaleur

La configuration de la salle a eu un effet plus marqué qu'escompté sur le fonctionnement des équipements. En raison de la longueur des salles de la pouponnière 227D du Groupe Robitaille, l'air du système de récupération de chaleur (ESA-3000) ne se rendait pas jusqu'à l'autre extrémité de la salle. Ainsi, il fut nécessaire d'utiliser un ventilateur mural en plus du système de l'échangeur de chaleur, causant des débits de ventilation trop élevés et une augmentation des besoins de chauffage.

6.5.2 Analyses statistiques

L'impact des trois traitements a pu être comparé sur 6 lots dans la pouponnière Avantis - AGR3, sur les variables de performances zootechniques et les consommations énergétiques. Pour les performances zootechniques, les variables ciblées étaient le gain moyen quotidien (GMQ), la conversion alimentaire (CA) et le taux de mortalité. Le poids moyen à l'entrée a aussi été analysé afin de confirmer qu'aucun traitement n'était avantagé au départ. Les autres analyses ont porté sur le débit de ventilation, les quantités totales de propane et d'électricité consommées.

Pour toutes les variables, l'effet traitement était le seul effet fixe et l'effet lot était retenu comme effet aléatoire. Pour le taux de mortalité, un modèle linéaire mixte généralisé de type logistique a été utilisé. Pour les autres variables, un modèle linéaire mixte a été utilisé, avec transformation racine carrée pour la CA, puisque la distribution était trop asymétrique et ne respectait pas le postulat de normalité.

Les analyses ont été réalisées avec le logiciel R version 4.2.2 (R Core Team, 2022). Les bibliothèques lme4 (Bates *et al.*, 2015) et emmeans (Lenth, 2023) ont été utilisées pour les estimations des paramètres des modèles linéaires mixtes et pour les comparaisons multiples entre les trois traitements, respectivement.

7 Résultats et discussion

7.1 Effets agronomiques de l'utilisation des technologies étudiées

Pour chacun des traitements les performances zootechniques des porcelets ainsi que la consommation d'eau sont présentées (Tableau 2).

Tableau 2. Performances zootechniques et consommation d'eau selon le traitement

	Témoin	Sans rejet	Échangeur	Seuil observé ¹
Nombre de porcelets				
Nb moyen de porcelets entrés	408	409	407	-
Nb moyen de porcelets sortis	394	395	399	-
Mortalités				
Nb moyen de pertes/ lot	13,3	13,3	9,3	-
Mortalité (%)	3,3 ^a	3,3 ^a	2,3 ^b	T vs E : $p = 0,053$ SR vs E : $p = 0,099$
Poids				
Poids moyen à l'entrée (kg)	6,19	6,24	6,16	NS
Poids moyen à la sortie (kg)	29,35	29,78	30,21	-
Gain de poids moyen (kg)	23,16	23,54	24,05	-
GMQ moyen technique (g/j)	465	473	485	NS
GMQ vivant (g/j)	479	487	498	NS
Consommation alimentaire				
CA technique	1,485	1,429	1,476	NS
CA économique	1,500	1,443	1,487	NS
Consommation d'eau (L/porc/j)				
	2,78	2,90	3,33	-

¹ Les lettres a et b indiquent une différence significative ($p < 0,10$); NS : non significatif ($p > 0,10$).

La même stratégie de ventilation a été adoptée pour chacun des traitements, où le débit de ventilation variait en fonction des niveaux d'humidité et de CO₂ produits par les porcelets ainsi que par le système de chauffage. Il est ainsi normal que les performances zootechniques et la consommation d'eau soient semblables entre les traitements. En effet, aucune différence significative au niveau du GMQ, de l'efficacité alimentaire (CA) ainsi que de la consommation d'eau n'a été observée. Cependant, la mortalité pour les traitements témoin (3,3 %) et sans rejet (3,3 %) est significativement plus élevée que pour le traitement échangeur (2,3 %). Cette différence n'était pas attendue dans les résultats. La diminution de mortalité de l'échangeur pourrait être liée aux conditions d'ambiance qui sont améliorées, mais ne semble pas justifier en totalité cette différence significative.

7.2 Effets sur les débits de ventilation

Les graphiques suivants présentent le débit d'air moyen dans la salle d'élevage par lot selon le traitement. Plus précisément, la Figure 18 présente le débit moyen de ventilation (CFM/porc) par lot en fonction de la température extérieure. Le débit de ventilation dans la salle est fortement lié à la température extérieure, indiquant un effet de saisonnalité. Le traitement échangeur d'air permet un débit d'air moyen significativement plus élevé comparativement au témoin et au traitement sans rejet ($p < 0,001$). En moyenne, le débit du traitement échangeur était 76,8 % plus élevé que le témoin, tandis que celui sans rejet était 12,9 % plus faible que le témoin.

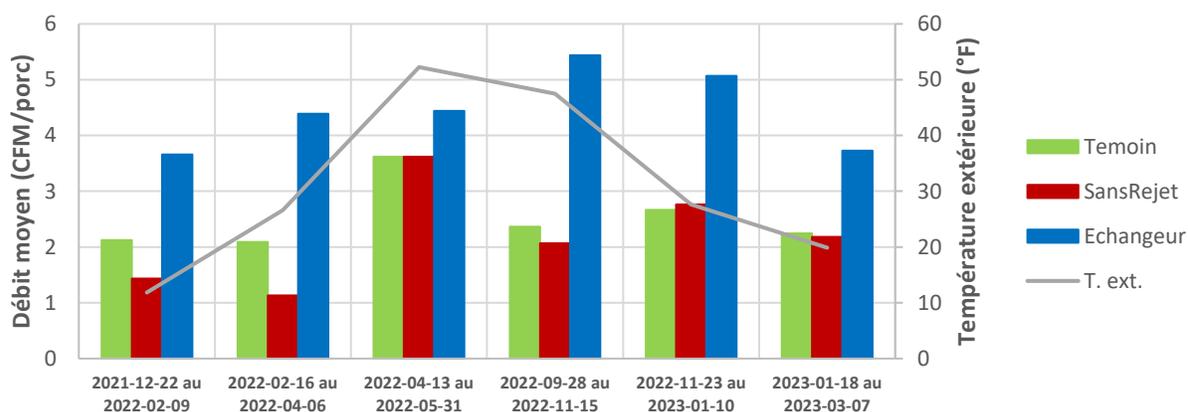


Figure 18. Débit moyen (CFM/porc) par lot selon le traitement comparativement à la température extérieure (°F). Les données du témoin représentent la valeur moyenne des salles 3 et 4.

Le débit de ventilation est également fortement lié au jour d'élevage, augmentant graduellement avec l'âge des animaux (Figure 19). Il est cependant intéressant de constater que les débits deviennent très élevés en fin de lot pour le traitement échangeur.

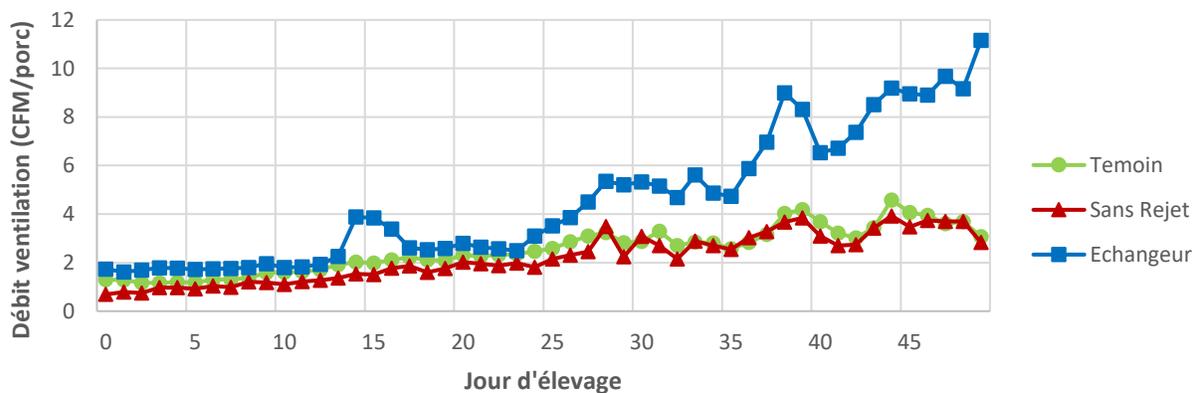


Figure 19. Débit moyen (CFM/porc) dans la salle d'élevage selon le jour d'élevage pour les différents traitements. Les données du témoin représentent la valeur moyenne des salles 3 et 4.

7.3 Effets sur la consommation énergétique

Les effets des différents traitements ont été évalués en ce qui concerne les consommations de propane et d'électricité.

7.3.1 Propane

La consommation de propane dans chacune des salles d'élevage d'Avantis - pouponnière AGR3 a été mesurée. La Figure 20 présente la consommation moyenne de propane par salle d'élevage par lot pour les différents traitements. L'utilisation de la fournaise avec rejets à l'extérieur a permis de réduire significativement (réduction moyenne de 34,16 %; $p = 0,064$) la consommation de propane par lot comparativement à la fournaise conventionnelle (témoin). Pour ce qui est de l'échangeur de chaleur air-air, il a réduit significativement l'utilisation de propane comparativement au témoin (réduction de 52,96 %; $p = 0,004$). L'échangeur de chaleur ESA-3000 fonctionne à l'électricité, mais un chauffage d'appoint au propane, de type LB White, a dû être utilisé pour combler le déficit thermique, expliquant la consommation de propane pour ce traitement.

La variation entre le témoin et le traitement sans rejet peut s'expliquer par le fait que, dans le traitement sans rejet, le besoin de renouvellement de l'air pour expulser les gaz est plus faible, car les gaz de combustion du système de chauffage au propane sont relâchés à l'extérieur plutôt que dans la salle d'élevage. Pour ce qui est du traitement échangeur, les besoins en chauffage au propane sont moindres, car l'air entrant dans la salle est préchauffé par le système. Ainsi, moins d'énergie fossile est nécessaire pour maintenir la température désirée.

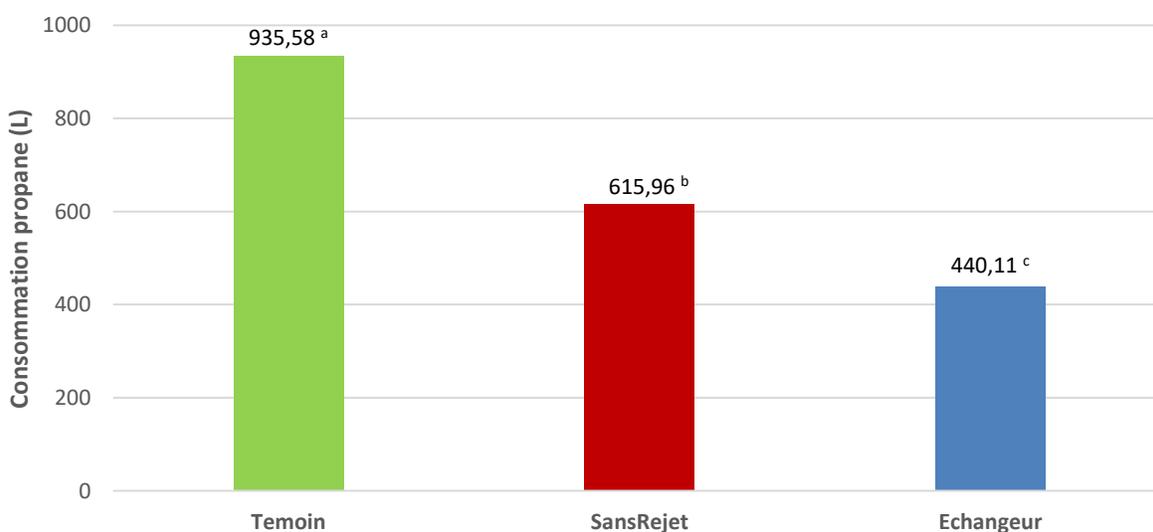


Figure 20. Consommation moyenne de propane (L) par traitement. Les données du témoin représentent la valeur moyenne des salles 3 et 4. Des lettres différentes indiquent une différence significative ($p < 0,10$).

La consommation de propane a varié de façon marquée entre les lots (Figure 21). La consommation de propane a été significativement réduite dans les lots du 2022-04-13 au 2022-05-31, ainsi que du 2022-09-28 au 2022-11-15 comparativement aux autres lots. Contrairement aux autres lots qui ont été réalisés principalement à la fin de l'automne ou en hiver, ces lots ont eu lieu à la fin du printemps (2022-04-13 au 2022-05-31) ou au début de l'automne (2022-09-28 au 2022-11-15). La saisonnalité peut ainsi expliquer cette différence marquée entre les lots, notamment observé par la température extérieure plus élevée. Pour tous les lots, la consommation de propane a été plus élevée dans le cas du témoin, tandis qu'elle a majoritairement été plus élevée avec la fournaise sans rejet qu'avec l'échangeur.

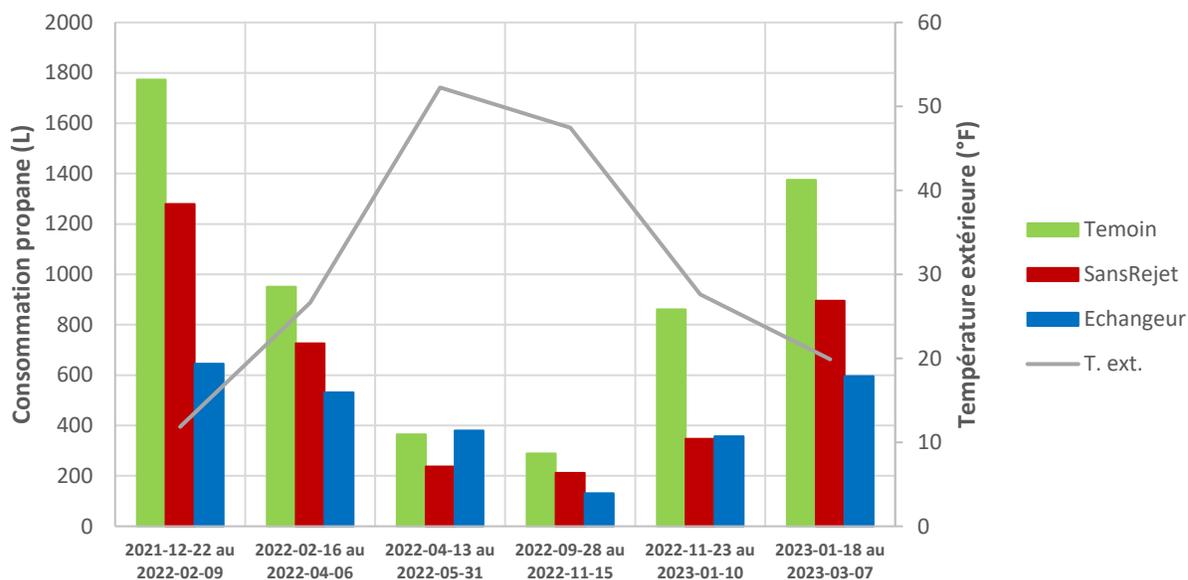


Figure 21. Consommation totale de propane (L) par lot par traitement. Les données du témoin représentent la valeur moyenne des salles 3 et 4 dans un lot.

La consommation de propane est également influencée par la température de consigne et le poids des animaux. Au début de l'élevage, les températures de consigne sont très élevées pour maintenir les porcelets dans leur zone de neutralité thermique, engendrant des consommations de propane plus importantes (Figure 22). Avec la croissance des animaux, plus les besoins thermiques des porcelets diminuent, moins grande est la consommation de propane. Il est également possible de voir que, dans les traitements témoin et sans rejet, les consommations de propane sont presque inexistantes à partir du 42^e jour d'élevage, tandis que pour le traitement échangeur, c'est plutôt à partir du 32^e jour d'élevage que la consommation de propane est pratiquement nulle. Le préchauffage de l'air par le système d'échangeur d'air est donc suffisant pour répondre aux besoins thermiques des porcelets.

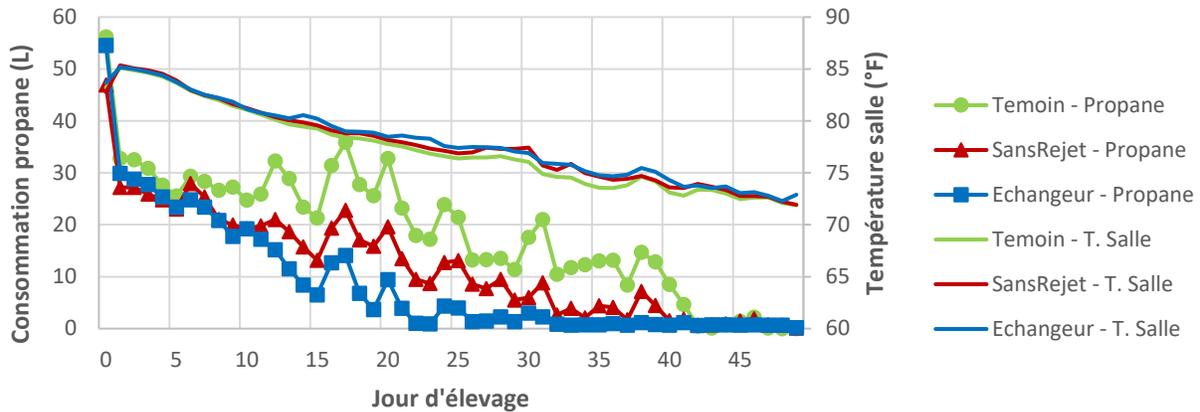


Figure 22. Consommation moyenne de propane (L) et température ambiante de la salle (°F) par salle par jour d'élevage selon les différents traitements. Les données du témoin représentent la valeur moyenne des salles 3 et 4 dans un lot.

7.3.2 Électricité

La consommation électrique liée à la ventilation a été évaluée pour les différents traitements. La consommation d'électricité du traitement témoin et du traitement sans rejet correspondent à l'utilisation d'énergie par les ventilateurs muraux. Pour le traitement échangeur de chaleur, la consommation électrique est celle des deux ventilateurs qui servaient au fonctionnement de l'échangeur. Tel qu'attendu, la consommation électrique est supérieure pour le traitement échangeur de chaleur, soit 321 % plus élevée que le témoin. La consommation électrique pour le traitement sans rejet est très similaire au témoin, avec une diminution de 4 % (Figure 23). La consommation électrique du traitement échangeur est significativement supérieure comparativement aux traitements témoin et sans rejet ($p < 0,001$).

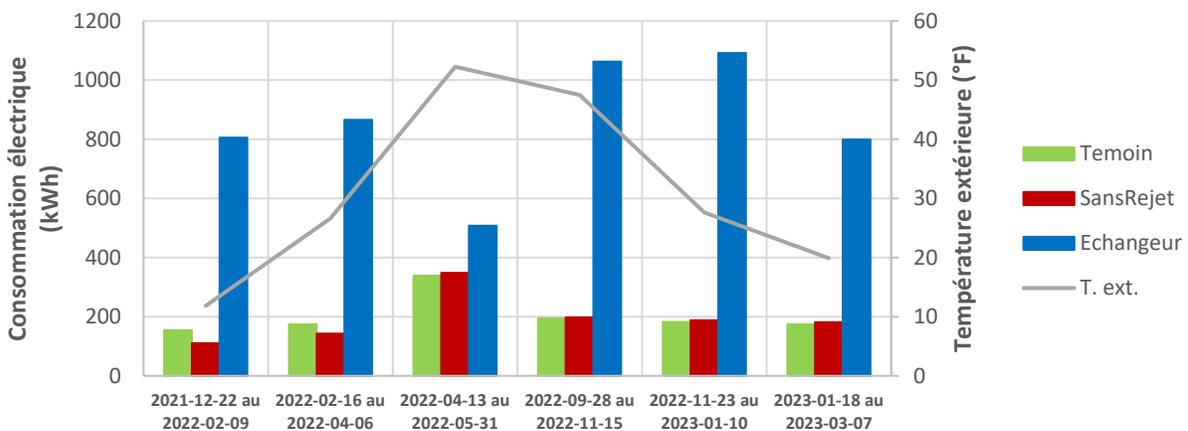


Figure 23. Consommation électrique totale (kWh) par lot par traitement. Les données du témoin représentent la valeur moyenne des salles 3 et 4 dans un lot.

La consommation moyenne d'électricité (kWh) par jour d'élevage ainsi que la température ambiante dans la salle d'élevage (°F), selon les différents traitements, sont présentées à la Figure 24.

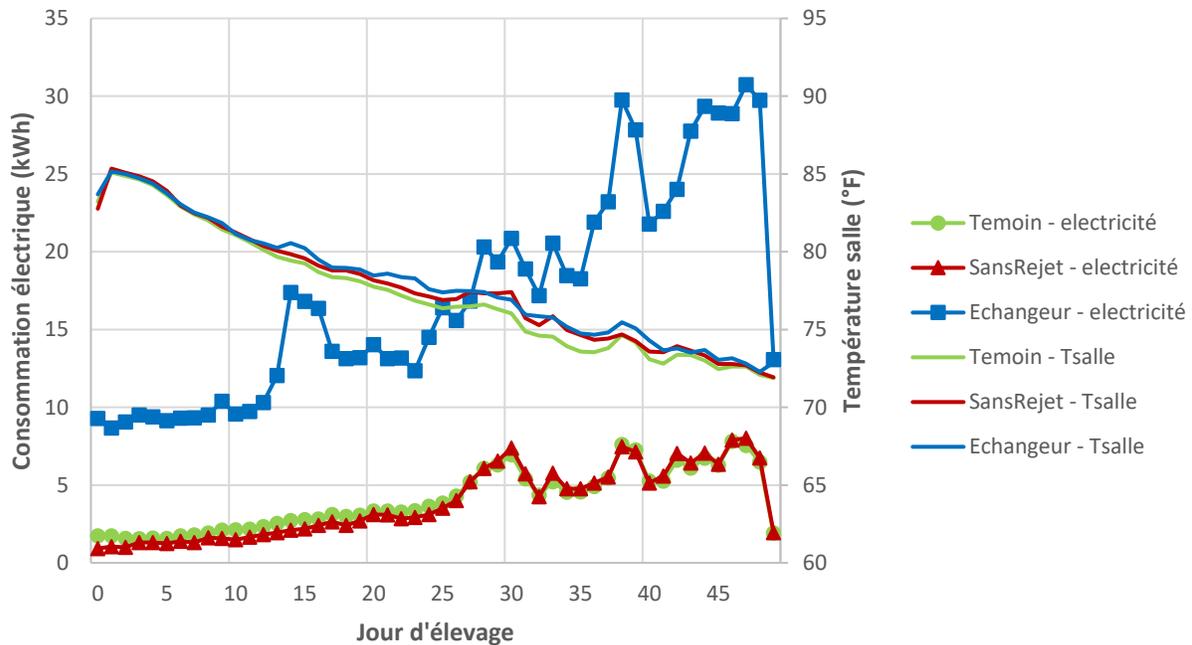


Figure 24. Consommation moyenne d'électricité (kWh) et température ambiante de la salle (°F) par jour d'élevage selon les différents traitements. Les données du témoin représentent la valeur moyenne des salles 3 et 4 dans un lot.

La consommation électrique des traitements témoin et sans rejet est très similaire tout au long de la durée de l'élevage. Cependant, celle du traitement sans rejet est légèrement inférieure durant les 27 premiers jours d'élevage. Pour ce qui est du traitement échangeur, dès l'arrivée des porcelets la consommation électrique fût 3 fois supérieure à celle des autres traitements et ce ratio demeura relativement stable pour l'ensemble des périodes d'élevage. Ceci s'explique par le principe de fonctionnement du système, soit que l'échangeur de chaleur fonctionne avec deux ventilateurs : un premier servant à pousser l'air frais préchauffé dans la salle d'élevage et un second pour en extraire l'air vicié. Ces ventilateurs fonctionnent à plus haut régime que le ventilateur mural des traitements témoin et sans rejet. Aussi, plus d'énergie électrique est nécessaire pour le fonctionnement des ventilateurs de l'échangeur, car la perte de charge, ou la force nécessaire pour faire passer l'air au travers de la canalisation de l'échangeur, est plus grande que pour un ventilateur mural, où très peu de restriction est rencontrée.

De plus, la consommation électrique de tous les traitements augmente durant l'élevage. En effet, plus les porcelets grossissent, plus leur besoin thermique diminue (diminution de la consigne de température) et plus ils dégagent de chaleur, d'humidité et de CO₂. Les besoins en ventilation sont donc plus grands, causant une augmentation des débits de ventilation.

La consommation moyenne d'énergie (propane (L) et électricité (kWh)) par salle par jour d'élevage selon les différents traitements est présentée à la Figure 25.

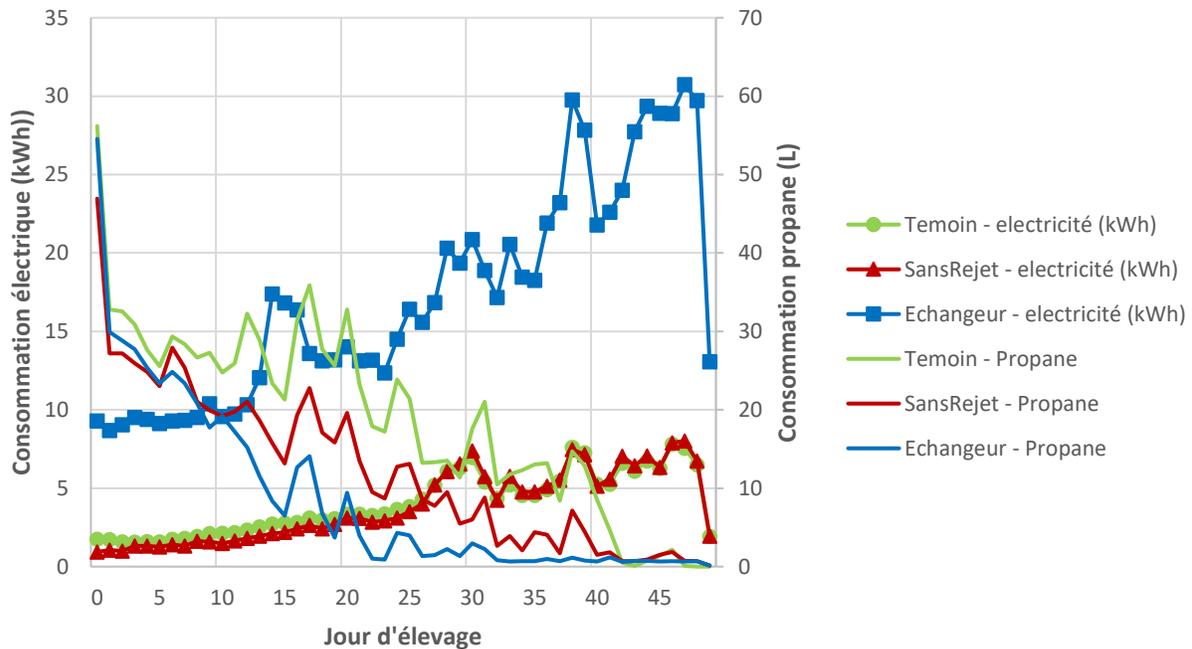


Figure 25. Consommation moyenne de propane (L) et d'électricité (kWh) par salle par jour d'élevage selon les différents traitements. Les données du témoin représentent la valeur moyenne des salles 3 et 4 dans un lot.

Tel que mentionné précédemment, la diminution des besoins thermiques des porcelets lors de leur croissance cause une diminution des besoins en chauffage. Les besoins en ventilation, qui fonctionne à l'électricité, augmentent avec la croissance des animaux. Le traitement échangeur est ainsi celui avec la plus faible consommation de propane et la plus grande consommation électrique.

7.4 Effets sur les conditions d'ambiance

Les différents traitements ont eu des effets sur les conditions d'ambiance pour les porcelets sevrés. La température ambiante, l'humidité relative, la concentration en dioxyde de carbone ainsi que le débit d'air dans les salles d'élevage ont été analysés.

7.4.1 Température ambiante

La température ambiante dans la salle d'élevage a été très similaire entre les différents traitements (Tableau 3). Ces résultats concordent avec la consigne de température voulue, qui était identique dans tous les traitements.

Tableau 3. Température ambiante moyenne (°F) dans les salles d'élevage par lot selon le traitement

Date entrée	Date sortie	Temp. extérieure (°F)	Temp. entretoit (°F)	Température salle (°F)		
				Témoin ¹	Sans rejet	Échangeur
2021-12-22	2022-02-09	11,8	14,4	76,3	76,6	77,3
2022-02-16	2022-04-06	26,6	27,6	77,2	77,4	78,2
2022-04-13	2022-05-31	52,3	53,4	79,0	79,3	79,2
2022-09-28	2022-11-15	47,5	48,0	78,0	78,1	78,2
2022-11-23	2023-01-10	27,6	28,8	77,5	78,5	78,1
2023-01-18	2023-03-07	19,9	21,3	76,6	77,3	77,5
Moyenne		30,9	32,2	77,4	77,9	78,1

¹ Témoin : représente la valeur moyenne des salles 3 et 4 dans un lot.

La Figure 26 présente l'écart de température entre la salle et la température de consigne (°F) pour les différents traitements selon le jour d'élevage. Les lots ont été regroupés afin de déterminer une valeur moyenne par jour d'élevage. L'écart de température de la salle et de la consigne est similaire pour tous les traitements.

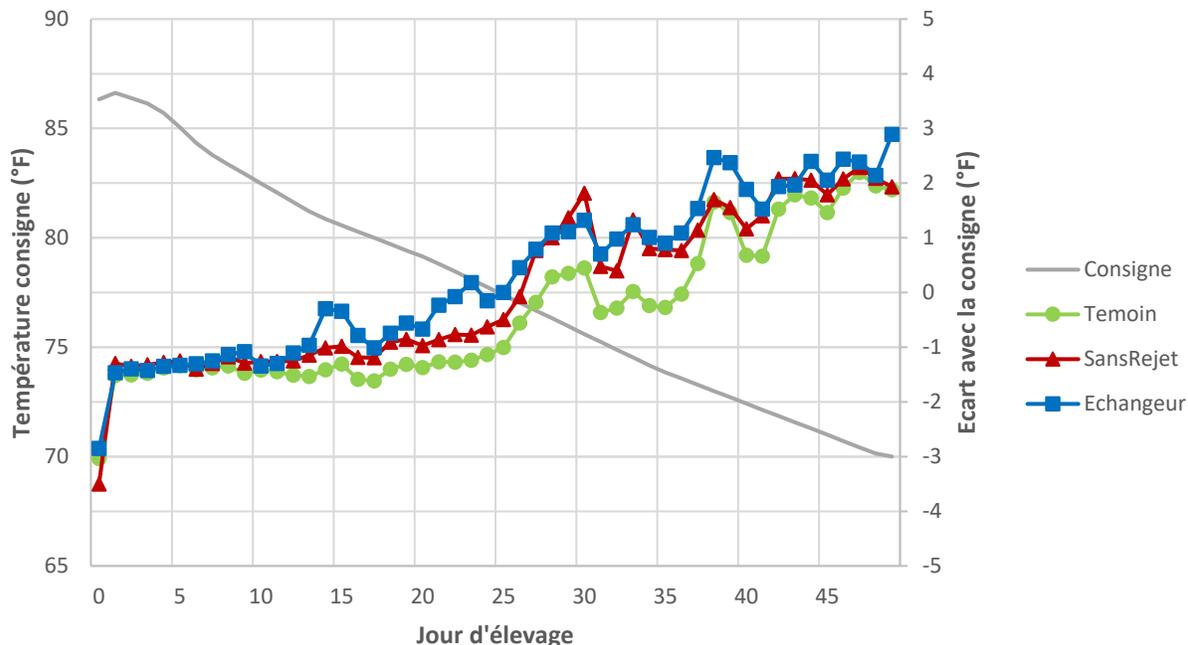


Figure 26. Écart de température entre la salle (°F) et la température de consigne (°F) pour les différents traitements selon le jour d'élevage. Les données du témoin représentent la valeur moyenne des salles 3 et 4 dans un lot.

Il semble toutefois que la consigne soit plus difficile à maintenir dans le premier mois, l'écart entre la température de consigne et la température réelle étant négatif. Ceci est causé par l'ajustement de la consigne de chauffage. En effet, le chauffage démarre lorsque la température de la salle est de 2 °F sous la température de consigne demandée, et il fonctionne jusqu'à ce que la température atteigne 1,5 °F sous la consigne. C'est pour cette raison que les écarts de température avec la consigne oscillent entre -1 et -2 °F les deux premières semaines d'élevage.

Au courant du premier mois d'élevage, le traitement témoin présente généralement un écart plus élevé avec la consigne que les traitements sans rejet et échangeur de chaleur. Ceci s'explique par le fait que le chauffage du traitement témoin fonctionne plus souvent que pour les autres traitements. En effet, ceux-ci ont soit un apport de chaleur autre que le système de chauffage (échangeur), soit un débit de ventilation plus faible (sans rejet) qui permet de conserver les mêmes conditions d'ambiance (concentration de CO₂ et HR).

Dans le deuxième mois d'élevage, les écarts de température avec la consigne deviennent positifs et varient entre 0 et 2,5 °F, ce qui correspond à la plage de variation normale du ventilateur (différentiel), où la vitesse du ventilateur varie entre sa vitesse minimum et sa vitesse maximale.

7.4.2 Humidité relative (HR)

Pour la durée totale d'élevage du lot, le taux d'humidité relative dans les salles était similaire entre les différents traitements (Tableau 4). L'humidité relative dans la salle du traitement échangeur de chaleur était légèrement inférieure comparée au traitement témoin, tandis que l'humidité relative dans la salle ayant la fournaise sans rejet était supérieure à celle du témoin. Le taux d'humidité relative s'est principalement maintenu dans l'intervalle voulu pour les porcelets sevrés, soit de 60 % à 70 % d'humidité relative (Chenard, 2001).

Tableau 4. Humidité relative (%) dans la salle d'élevage par lot selon le traitement

Date entrée	Date sortie	Temp. extérieure (°F)	HR entretoit (%)	HR salle (%)		
				Témoin ¹	Sans rejet	Échangeur
2021-12-22	2022-02-09	11,8	66,49	61,18	61,89	62,19
2022-02-16	2022-04-06	26,6	66,52	64,27	63,91	58,53
2022-04-13	2022-05-31	52,3	57,94	64,22	64,07	58,81
2022-09-28	2022-11-15	47,5	68,64	65,13	69,68	66,39
2022-11-23	2023-01-10	27,6	73,41	70,44	74,26	68,47
2023-01-18	2023-03-07	19,9	67,60	69,42	71,17	66,05
Moyenne		30,9	66,77	65,76	67,47	63,39

¹ Témoin : représente la valeur moyenne des salles 3 et 4 dans un lot.

La Figure 27 présente le taux d'humidité relative dans la salle d'élevage selon le jour d'élevage pour les différents traitements, ainsi que le débit de ventilation. Les valeurs moyennes des lots ont été utilisées. Il est possible de constater que l'humidité relative varie selon le jour d'élevage, et ce, pour les trois traitements. Bien que l'humidité relative soit similaire entre les traitements, de manière générale, son taux est plus élevé dans le traitement sans rejet, suivi du traitement témoin, puis du traitement échangeur de chaleur.

En hiver, l'air extérieur contient habituellement moins d'humidité relative que l'air dans les salles d'élevage. Donc plus les débits de ventilation sont élevés, plus l'air intérieur est renouvelé par de l'air extérieur qui est moins chargé en humidité, ayant pour effet de diminuer l'HR de la salle. Il existe donc une relation inverse entre l'humidité relative et les débits de ventilation. Il est possible de voir cette relation sur la Figure 27 où le taux d'humidité relative le plus élevé est retrouvé avec le traitement sans rejet (débit le plus faible), tandis que le taux le plus faible est trouvé avec le traitement échangeur (débit le plus élevé).

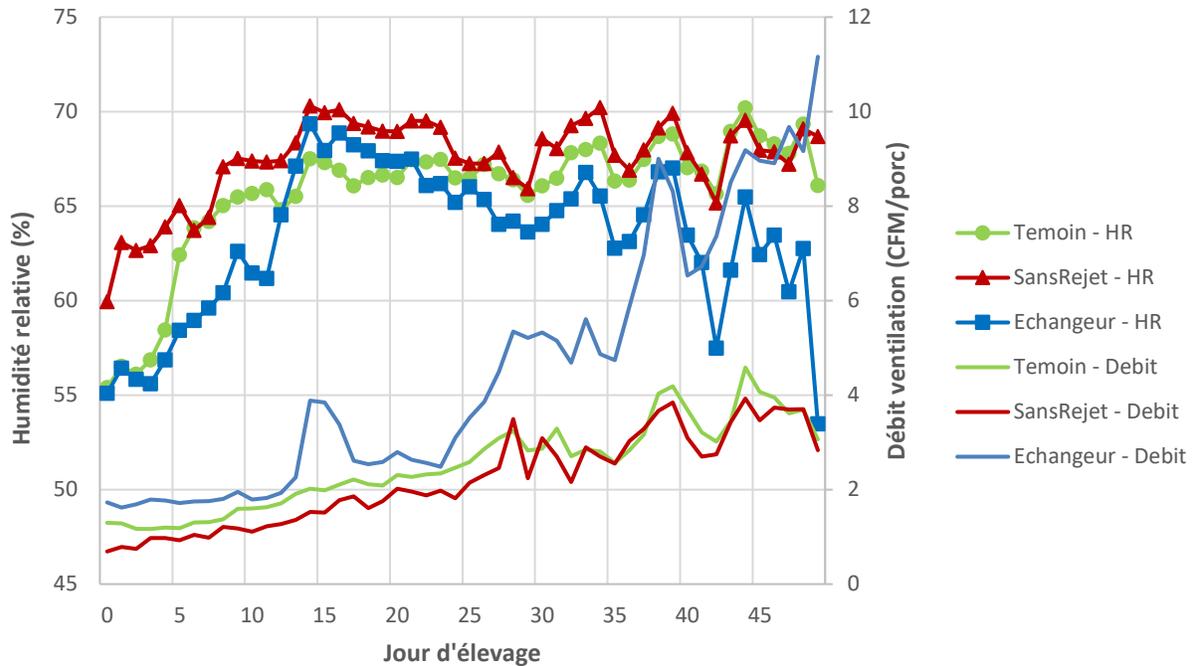


Figure 27. Humidité relative (%) dans la salle d'élevage selon le jour d'élevage et débit de ventilation (CFM/porc) pour les différents traitements. Les données du témoin représentent la valeur moyenne des salles 3 et 4 dans un lot.

La Figure 28 représente la consommation de propane horaire (L) lors d'une journée froide (minimum de -26 °C, le 15 janvier 2022) en relation avec l'HR (%) de la salle selon le traitement. Dans cet exemple, les porcelets sont au 24^e jour d'élevage. Pour cet exemple de journée froide, le traitement témoin est celui ayant eu la plus grande consommation de propane, variant entre 2,25 et 3,75 L/h. En considérant qu'un litre de propane équivaut à 23 700 BTU (Bodden, 2020), la consommation de propane pour le chauffage permettait de produire entre 53 325 et 88 875 BTU. Ceci indique donc que le chauffage à intensité variable (50 000 - 100 000 BTU) de la salle témoin fonctionnait pratiquement en continu, mais pas toujours à pleine capacité.

La consommation de propane lors du traitement sans rejet variait entre 1,25 et 2,25 L/h, tandis que celle du traitement échangeur oscillait entre 0 et 1,25 L/h. Pour ce dernier, la chaleur récupérée par l'échangeur a permis de se passer de chauffage pendant quelques heures et la consommation, pour cette journée précise très froide, était de 72 % inférieure au traitement témoin.

Il est également possible de constater que l'HR est en relation inverse à la consommation de propane, c'est-à-dire que plus la consommation de propane est élevée, plus l'HR de l'air ambiant est faible. Donc l'eau dégagée par la combustion du propane n'a pas d'influence sur l'HR des salles. Le dégagement de chaleur semble avoir un effet plus grand (augmentation de la capacité de l'air à contenir de l'eau) que le dégagement de l'eau lors de la combustion.

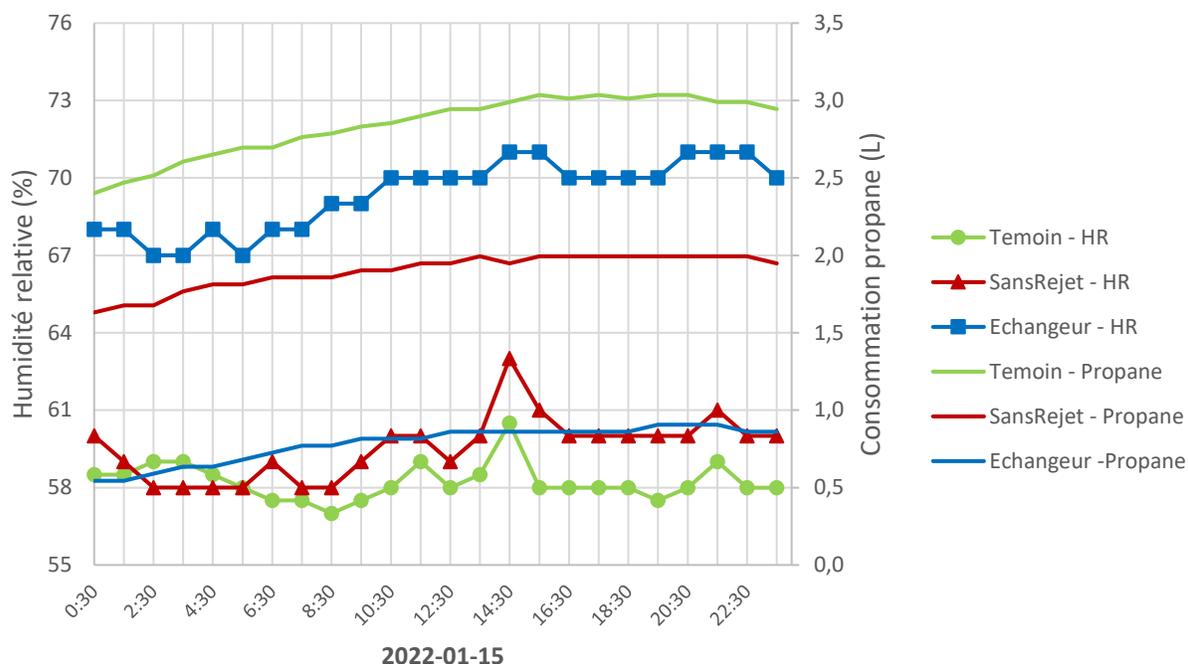


Figure 28. Consommation de propane (L) horaire lors d’une journée froide (15 janvier 2022) en relation avec l’humidité relative (%) de la salle selon le traitement. Les données du témoin représentent la valeur moyenne des salles 3 et 4.

7.4.3 Dioxyde de carbone (CO₂)

La teneur en dioxyde de carbone dans la salle d’élevage des porcelets a été mesurée pour les trois traitements (Tableau 5). Selon Smith et Crabtree (2005), une cible typique pour l’ajustement du débit minimal de ventilation est de 3000 ppm de concentration de CO₂, alors que la limite supérieure à ne pas dépasser est de 5000 ppm. Les concentrations moyennes en CO₂ sont relativement similaires entre les différents traitements (témoin : 3323 ppm; sans rejet : 3224 ppm; échangeur : 3075 ppm). Bien que les résultats soient similaires, tel qu’attendu, la concentration moyenne la plus élevée est retrouvée avec le traitement témoin, notamment expliqué par une utilisation de propane plus élevée.

Tableau 5. Concentration en dioxyde de carbone (CO₂; ppm) dans la salle d'élevage par lot selon le traitement

Date entrée	Date sortie	CO ₂ salle		
		Témoins ¹	Sans rejet	Échangeur
2021-12-22	2022-02-09	3962	3598	3740
2022-02-16	2022-04-06	3618	3220	3316
2022-04-13	2022-05-31	2387	2531	2120
2022-09-28	2022-11-15	2517	2384	2550
2022-11-23	2023-01-10	3651	4030	3031
2023-01-18	2023-03-07	3785	3574	3673
Moyenne		3323	3224	3075

¹ Témoin : représente la valeur moyenne des salles 3 et 4 dans un lot.

La concentration en dioxyde de carbone dans la salle d'élevage est directement liée à la température extérieure (saisonnalité) qui a un lien direct avec le débit de ventilation et le fonctionnement des systèmes de chauffage (Figure 29). Lors des températures extérieures plus chaudes, la concentration en CO₂ dans la salle d'élevage est réduite. Ce résultat peut être lié à la diminution de l'utilisation du chauffage en période chaude (où la production de CO₂ est liée à l'utilisation des systèmes de chauffage) ainsi qu'à l'augmentation du débit de ventilation.

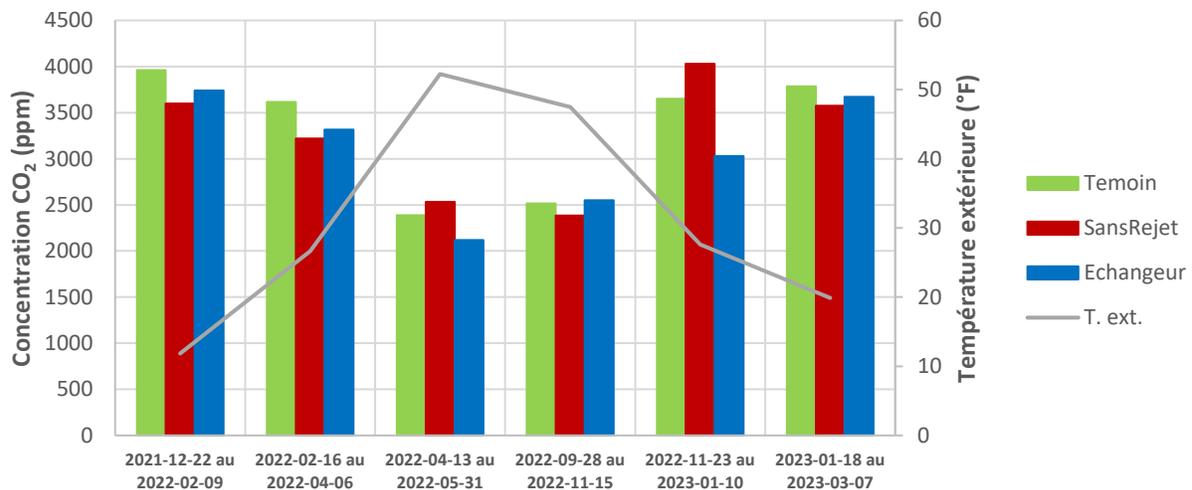


Figure 29. Concentration en CO₂ (ppm) par lot selon le traitement comparativement à la température extérieure (°F). Les données du témoin représentent la valeur moyenne des salles 3 et 4 dans un lot.

Le Tableau 6 présente le pourcentage de temps où la concentration en CO₂ se trouve dans l'intervalle donné pour chaque traitement, ainsi que la température moyenne dans la salle d'élevage et le jour d'élevage moyen à ce moment. Les valeurs moyennes horaires ont été regroupées pour chaque lot. La concentration en dioxyde de carbone est supérieure à 3000 ppm pour 71,19 %, 64,95 % et 51,96 % du temps pour les traitements témoin, sans rejet et échangeur, respectivement. Selon Smith et Crabtree (2005), la limite supérieure à ne pas dépasser pour la concentration en CO₂ est de 5000 ppm pour ne pas observer de diminution de performance zootechnique significative. Cependant, la concentration en dioxyde de carbone a été supérieure à 5000 ppm durant 0,13 % du temps pour le traitement témoin, 1,86 % du temps pour le traitement sans rejet et 2,70 % pour le traitement échangeur. Ces épisodes sont observés ponctuellement au courant des lots, notamment lors d'un problème avec le fonctionnement du ventilateur de la salle 1 (traitement sans rejet), et d'épisodes de dégivrage (traitement échangeur : fonctionnement à débit réduit). Le traitement échangeur peut donc permettre une meilleure qualité de l'air de manière globale, car en récupérant de l'énergie, il peut travailler à débit de ventilation plus important sur le premier palier de ventilation plutôt qu'en débit minimum, sans avoir besoin du système de chauffage.

Tableau 6. Pourcentage de temps pour chaque traitement dont la concentration en CO₂ se trouve dans l'intervalle, ainsi que température moyenne dans la salle d'élevage et le nombre moyen de jour d'élevage à ce moment

Conc. CO ₂ (ppm) ²	Témoin ¹			Sans-Rejet			Échangeur		
	% temps	T salle moy (°F)	Jour moy	% temps	T salle moy (°F)	Jour moy	% temps	T salle moy (°F)	Jour moy
1-1000 ³	1,3	81,2	33,8	1,3	80,9	27,4	0,9	81,4	29,1
1001-2000	7,8	76,7	35,5	7,9	77,0	34,1	11,9	76,3	35,9
2001-3000	18,3	76,7	28,2	24,5	77,7	25,6	33,8	77,4	27,5
3001-4000	44,6	76,4	25,8	44,9	78,4	20,9	31,6	79,1	19,4
4001-5000	26,5	79,7	14,6	18,2	77,0	24,8	17,6	78,8	18,7
5001 et +	0,1	83,0	0,0	1,9	78,0	30,2	2,7	79,0	17,1

¹ Témoin : représente la valeur moyenne des salles 3 et 4 dans un lot.

² Les valeurs de 0 ppm ont été exclues. Elles correspondent à des erreurs de la part de la sonde, pour 1,24 %, 1,25 % et 1,28 % des valeurs pour les traitements témoin, sans rejet et échangeur, respectivement.

³ La concentration moyenne en CO₂ de l'air extérieur est d'environ 300 à 400 ppm (CCNSE, 2010). L'intervalle 1 - 400 ppm représente 0,03 %, 0,03 % et 0,01 % des valeurs pour les traitements témoin, sans rejet et échangeur, respectivement.

Il semble y avoir un lien entre la concentration en CO₂ dans la salle et le nombre de jours d'élevage. La Figure 30 présente la concentration en CO₂ ainsi que le débit de ventilation dans les salles d'élevage selon le jour d'élevage pour les différents traitements. Les valeurs moyennes des lots ont été utilisées. Il est possible de constater que la concentration de CO₂ varie selon le jour d'élevage, et ce, pour les trois traitements. De manière générale, la concentration de CO₂ est plus élevée en début d'élevage, lorsque les débits de ventilation sont les plus faibles et diminuent en cours d'élevage lorsque le débit augmente. Ainsi, l'augmentation de la concentration en CO₂ pourrait être liée à une demande réduite des débits de ventilation dans la salle. Le traitement témoin est celui où les concentrations en CO₂ sont les plus élevées en début d'élevage, avec des moyennes oscillant autour de 4000 ppm la première semaine comparativement à moins de 3500 ppm pour les autres traitements. De manière globale, le traitement échangeur est celui ayant les plus faibles concentrations en CO₂ dès la 3^e semaine d'élevage jusqu'à la fin du lot.

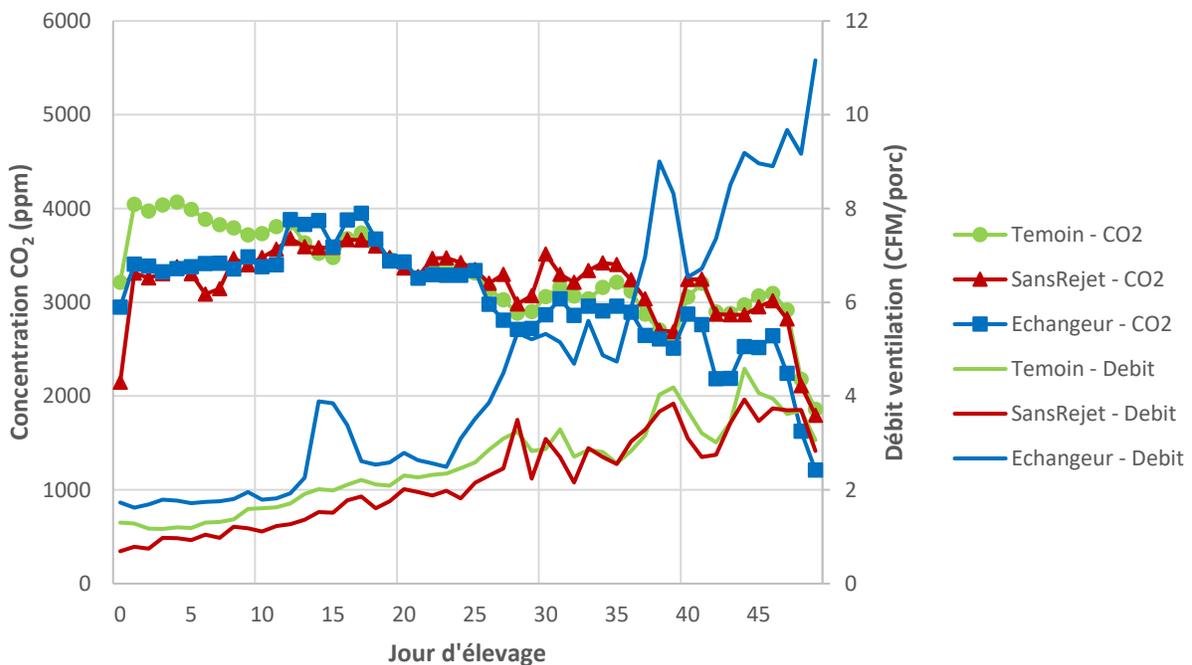


Figure 30. Concentration en CO₂ (ppm) et débit de ventilation dans la salle d'élevage (CFM/porc) selon le jour d'élevage pour les différents traitements. Les données du témoin représentent la valeur moyenne des salles 3 et 4 dans un lot.

7.5 Performances environnementales

La section qui suit présente les analyses environnementales effectuées grâce aux données récoltées avec le laboratoire MESANGES (IRDA) sur le dernier lot réalisé chez Avantis – pouponnière AGR3 (2023-01-18 au 2023-03-07). Seules les données des quatre premières semaines d'élevage ont été analysées (2023-01-18 au 2023-02-14). Après cette période, une incertitude sur la validité de la mesure des débits a fait en sorte qu'une analyse des résultats environnementaux n'a pu être réalisée.

Les animaux ont été allotés dans le but que le nombre d'animaux et la masse corporelle (somme du poids de tous les animaux) soient similaires dans toutes les salles. Le poids moyen durant la période d'acquisition des données a varié de façon non significative de 16,4 à 17,1 kg. Le Tableau 7 présente les informations sur les données zootechniques durant la période spécifique d'analyse par le laboratoire. Aucune différence importante n'a été remarquée dans la consommation d'eau et d'aliment entre les salles. Toutefois, la consommation alimentaire pour le traitement échangeur démontre une tendance à être plus élevée que la consommation notée pour les traitements sans rejet et au témoin.

Tableau 7. Inventaire, poids moyen des porcelets ainsi que la consommation moyenne d'aliment et d'eau dans chacune des salles de la pouponnière Avantis - AGR3.

Salle	Traitement	Nombre de porcelets dans la salle	Poids moyen (kg)	Consommation moyenne	
				Aliment (kg/j)	Eau (l/j)
1	Sans rejet	419,5	16,6	330,6	1432,1
2	Échangeur	418,1	17,1	345,3	1630,9
3	Témoin	421,0	16,8	338,8	- ¹
4	Témoin	421,6	16,4	330,5	1424,2

¹ Valeur non disponible : problématique avec le compteur d'eau de la salle 3.

7.5.1 Concentration mesurée des différents gaz à la sortie des ventilateurs

La Figure 31 illustre l'évolution des concentrations en CO₂ au cours des semaines de mesures. Globalement, peu de variations sont notées entre les différents traitements. À titre de rappel, la majorité de la production du CO₂ provient du métabolisme de l'animal. Par conséquent, puisqu'il y a peu de différences dans la masse corporelle totale par chambre, il est normal de retrouver des similitudes dans les concentrations mesurées de CO₂.

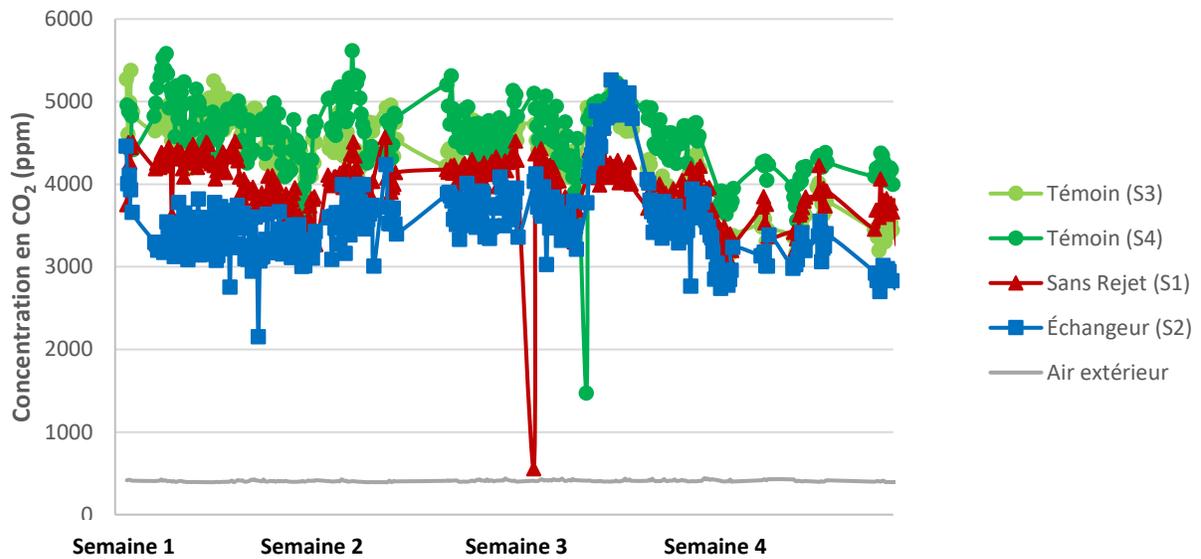


Figure 31. Concentration en CO₂ dans les différentes salles et dans l'air extérieur (ppm).

La concentration de méthane (CH₄) varie peu dans le temps pour les traitements sans rejet et le témoin (Figure 32). Le traitement sans rejet fait exception avec une concentration atteignant près de 240 ppm, soit près du double de celle enregistrée avec le traitement échangeur. Cette concentration mesurée avec le traitement sans rejet se résorbe tranquillement dans le temps pour atteindre le même niveau que les autres traitements dans la dernière semaine de mesure. Cette anomalie est difficile à expliquer, puisque les sources de méthane sont les mêmes, à l'exception des gaz de combustion. Cette contribution est toutefois (théoriquement) très faible.

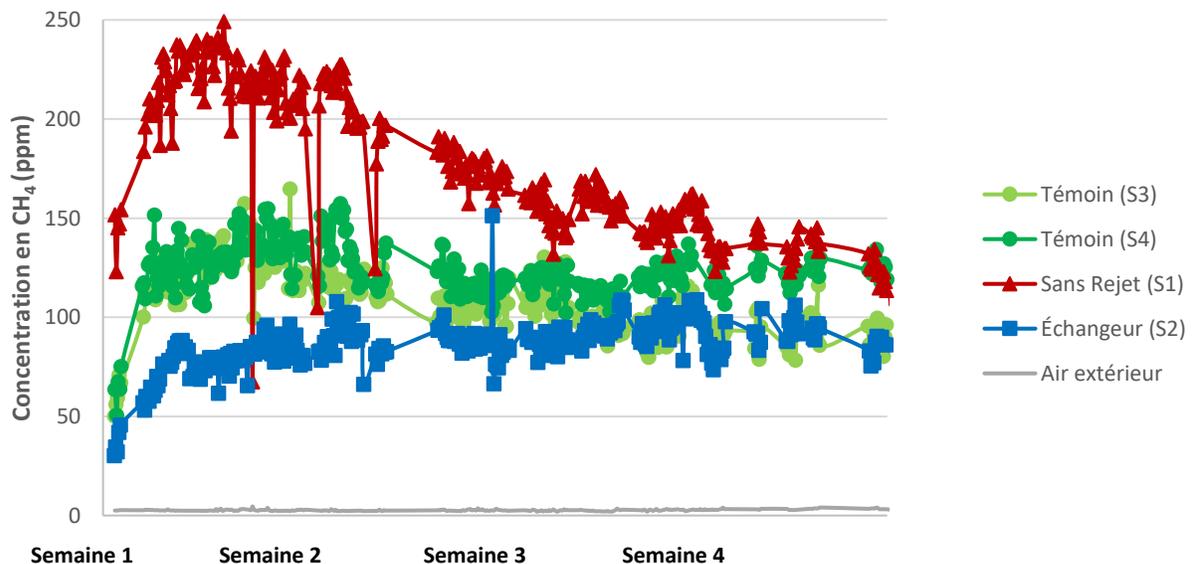


Figure 32. Concentration en CH₄ dans les différentes salles et dans l'air extérieur (ppm).

Les résultats démontrent que la concentration en N_2O diffère peu entre les traitements et est très faible. Par conséquent, il n'y a pas de conclusion à tirer pour ce gaz (Figure 33).

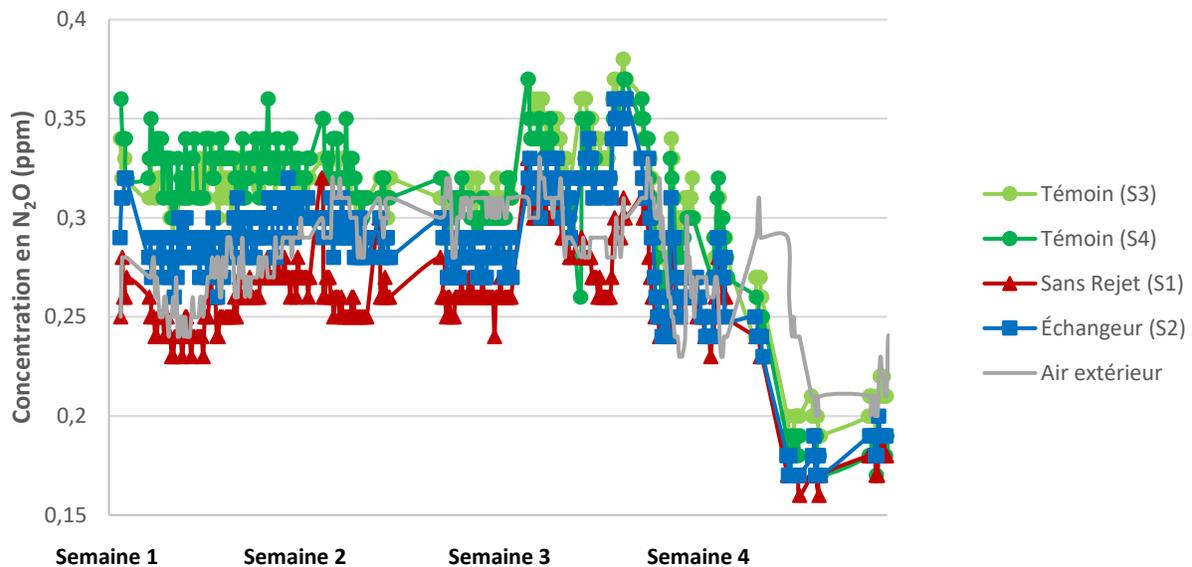


Figure 33. Concentration en N_2O dans les différentes salles et dans l'air extérieur (ppm).

Les concentrations en ammoniac (NH_3) sont similaires pour les traitements échangeur et témoin. Comme dans le cas du méthane, le traitement sans rejet se comporte différemment (Figure 34). En général, la présence d'ammoniac est liée à une humidité et à une température plus élevées des surfaces.

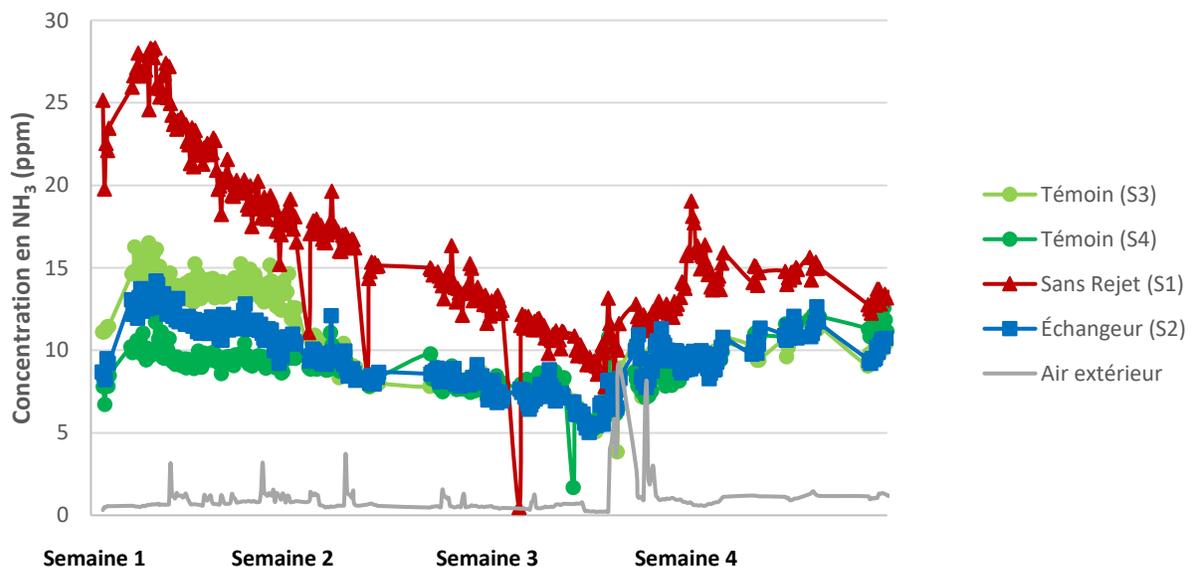


Figure 34. Concentration en NH_3 des différentes salles et de l'air extérieur (ppm).

7.5.2 Émissions des différents gaz dans chacune des salles

Les émissions de NH₃, CH₄ et N₂O sont présentées à l'Annexe 1 car aucune tendance ou différence n'est notable dans le temps. Pour les émissions de CO₂ par jour et par kg porc, celles-ci sont inférieures dans le traitement sans rejet. Cette réduction marquée du CO₂ pourrait en partie être attribuée au rejet des gaz de combustion à l'extérieur de la salle d'élevage plutôt qu'à l'intérieur. Les traitements échangeur et témoin ont un comportement similaire (Figure 35).

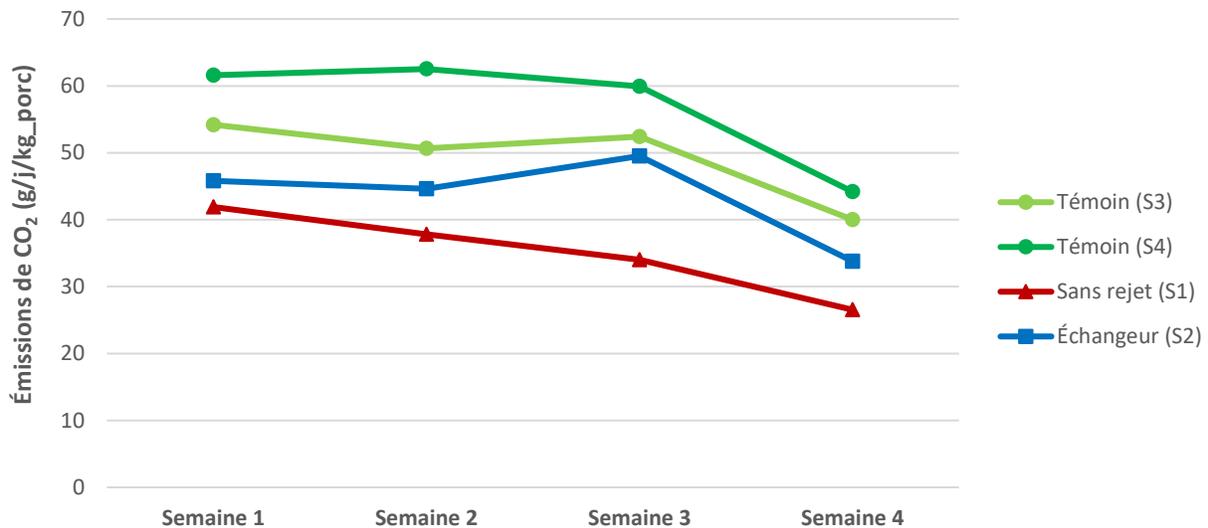


Figure 35. Émissions de CO₂ par jour par kg porc par traitement.

Comme mentionné, les émissions de CO₂ de la salle rejetant les gaz de combustion à l'extérieur (traitement sans rejet) sont inférieures aux traitements échangeur et témoin. Toutefois, d'un point de vue environnemental, cette réduction des émissions n'est pas un réel gain puisque du CO₂ est tout de même émis à l'extérieur. L'impact sur l'environnement pourrait être visualisé par les émissions en CO₂ équivalent regroupant l'ensemble des effets des trois principaux gaz, soit le CO₂, CH₄ et N₂O (Tableau 8).

Le Tableau 8 inclut les valeurs de CO₂ émis, corrigées pour le traitement sans rejet en utilisant les facteurs d'émissions suggérés par le rapport GES 1990-2020 (MELCC, 2022), soit de 1,515, 0,024 et 0,08 kg/kL pour le CO₂, le CH₄ et le N₂O respectivement. Le traitement sans rejet émet légèrement moins de CO₂ équivalent que les traitements échangeur et témoin. Dans les faits, seul le traitement échangeur permet une réduction des émissions de CO₂ équivalents.

Par conséquent, même si le volume de propane utilisé est inférieur dans le traitement sans rejet (797 litres) comparativement au traitement témoin (salle 3 : 1 210 litres; salle 4 : 865 litres), globalement, seul le traitement échangeur (568 litres) permet un gain environnemental.

Tableau 8. Émissions moyennes totales des différents gaz.

Salle	Traitement	Moyenne totale (g/j/kg_porc)				
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NH ₃	kg CO ₂ équivalent
1	Sans rejet	35,08	0,62	0,0002	0,06	0,085
2	Échangeur	43,44	0,43	0,0003	0,05	0,078
3	Témoin	49,32	0,49	0,0004	0,05	0,088
4	Témoin	57,06	0,60	0,0005	0,04	0,105

7.5.3 Conclusion sur les émissions

Le rejet de gaz de combustion directement à l'extérieur (traitement sans rejet) a permis une diminution d'environ 25 % du débit de ventilation (615 CFM) par rapport aux traitements échangeur (892 CFM) et témoin (salle 3 : 1031 CFM; salle 4 : 833 CFM).

Selon les consommations moyennes de propane dans les salles, l'échangeur d'air récupérateur de chaleur a montré la plus faible consommation de propane (568 litres) par rapport aux traitements sans rejet (796,18 L) et témoin (salle 3 : 1210 L; salle 4 : 854,7 L). La récupération de la chaleur de l'air qui sort du bâtiment afin de préchauffer l'air de l'extérieur engendre ainsi une réduction des coûts énergétiques avec une moindre consommation d'énergie. Selon les résultats de CO₂ équivalents reportés dans le Tableau 8, l'échangeur de chaleur suggère le meilleur traitement pour avoir une diminution des GES.

Il pourrait être intéressant de combiner l'utilisation de ces deux technologies dans la même salle d'élevage. Ceci permettrait possiblement une plus grande économie de propane et d'améliorer les conditions d'ambiance de la salle d'élevage. Des travaux en ce sens pourraient être réalisés.

8 Analyse technico-économique

Une analyse a été réalisée dans le but de déterminer l'impact technico-économique de l'utilisation de la fournaise sans rejet et de l'échangeur de chaleur en production porcine, et d'évaluer également leur intervalle de retour sur investissement. L'analyse technico-économique de l'utilisation de ces technologies a été effectuée en considérant les performances zootechniques des animaux dans chacun des traitements en comparaison avec le traitement témoin (fournaise au propane conventionnelle), ainsi que les coûts d'acquisition, d'installation et d'opération des technologies.

Les données utilisées proviennent du présent rapport, plus précisément des résultats des différentes technologies appliquées aux salles d'élevage d'Avantis - pouponnière AGR3. Certains résultats statistiquement non significatifs ont été utilisés, car la différence de performance peut avoir un impact économique.

Les prémisses suivantes ont été posées afin d'effectuer l'analyse :

- Transition de l'utilisation d'une fournaise au propane conventionnelle vers la nouvelle technologie testée
- Nombre de places par salle : 440 places/salle
 - 440 porcelets entrés par salle par lot
- Taux de mortalité (témoin) : 3,3 %
- Nombre de porcelets produits par lot (témoin) : 425 porcelets vendus/lot/salle
- Nombre de lots :
 - Nombre de lots total annuellement en pouponnière : 6,5 lots /an
 - Nombre de lots annuels pouvant utiliser les technologies : 4 lots/an
- Poids moyen des porcelets :
 - À l'entrée (témoin) : 6,19 kg
 - À la vente (témoin) : 29,35 kg
- Prix de vente du porcelet :
 - Basé sur le prix de 69,08 \$/porcelet vendu pour un porcelet de 25,5 kg (données compilées à partir de la publication "Valeur des stocks" 2018-2023)
 - Formule de prix du porcelet : $\frac{1}{2}$ prix du porc + 1,30 \$/kg
 - $69,08 \$ = 35,93 \$ + (25,5 \text{ kg} \times 1,30 \$/\text{kg})$

8.1 Fournaise rejetant les gaz de combustion à l'extérieur du bâtiment

Le coût d'achat et d'installation d'une fournaise au propane rejetant les gaz de combustion à l'extérieur du bâtiment est de 2 620 \$ par salle. Ce montant inclut la fournaise, la cheminée ainsi que la main d'œuvre pour l'installation. Ce coût est environ trois fois plus élevé que la fournaise conventionnelle (900 \$), soit une dépense supplémentaire de 1 720 \$/salle pour l'équipement.

8.1.1 Impact sur la consommation d'énergie

8.1.1.1 Consommation de propane

L'utilisation des fournaises au propane avec rejet des gaz de combustion à l'extérieur du bâtiment (traitement sans rejet) entraîne une réduction moyenne de 319,62 litres de propane par salle d'élevage par lot, soit une baisse de 34,16 % comparativement au système de chauffage au

propane conventionnel (traitement témoin). Avec un prix moyen de 0,60 \$/litre¹ de propane (CRAAQ, 2023), le traitement sans rejet occasionne une baisse du coût d'énergie liée au propane de l'ordre de 192 \$ par salle d'élevage par lot, soit environ 0,44 \$ par place porcelet par salle. En considérant que le chauffage est principalement utilisé sur les lots d'automne, d'hiver et de printemps, soit un total de 4 lots/an, la baisse de la consommation de propane pour le traitement sans rejet s'élève à 767 \$/an/salle.

8.1.1.2 Consommation d'électricité

La consommation moyenne d'électricité pour le traitement sans rejet se chiffre à 195 kWh, soit une diminution d'environ 8 kWh (- 4 %) par lot par salle par rapport au témoin. Sur la base du taux de tarification D d'Hydro Québec (clientèles résidentielle et agricole), lequel s'établit à 6,509 centimes/kWh (Hydro Québec, 2023), l'économie d'électricité par lot en lien avec le traitement sans rejet est de 0,52 \$/lot/salle. Pour un total de 4 lots/an en pouponnière utilisant cette technologie, il s'agit d'une mince économie de 2,08 \$/an.

8.1.2 Impact sur les performances zootechniques

Un taux similaire de mortalité des porcelets a été noté entre les traitements sans rejet et témoin. Aucun gain économique n'est ainsi espéré via une différence du taux de mortalité avec cette technologie. Le nombre de porcs produits par lot par salle est ainsi similaire par traitement, soit 425 porcelets vendus/lot/salle.

Cependant, bien que cette différence ne soit pas statistiquement significative, une légère amélioration du GMQ peut être notée grâce à l'utilisation de la fournaise avec rejets à l'extérieur du bâtiment. Le traitement sans rejet a ainsi permis de générer un gain d'environ 0,56 \$/porcelet vendu en considérant l'augmentation moyenne du poids des porcelets à la sortie de pouponnière de 0,43 kg/porcelet (1,30 \$/kg supplémentaire). En considérant une vente de 425 porcelets par salle par lot, il est ainsi possible de chiffrer ce gain à 238 \$/lot/salle.

Une amélioration de la conversion alimentaire de 0,057 a été observée pour le traitement sans rejet comparativement au traitement témoin. Cette amélioration a permis une économie de moulée de 1,34 kg/porcelet/lot. En considérant un prix de moulée moyen de 608,07 \$/tonne (prix moyen 2018-2022 de l'aliment en pouponnière selon le modèle ASRA 2017 de la FADQ), une économie de 0,82 \$/porcelet vendu a été générée. Pour une vente de 425 porcelets par salle par lot, il est ainsi possible de chiffrer l'économie de moulée à 348,50 \$/lot/salle.

¹ Ce prix moyen 2018-2022 publié par le CRAAQ n'inclut pas les taxes applicables.

8.1.3 Coût d'entretien de la fournaise sans rejet

L'entretien de la fournaise sans rejet est simple et nécessite peu de temps de main d'œuvre. En effet, la chambre de combustion du propane est fermée pour que les gaz de combustion puissent être évacués vers l'extérieur, protégeant ainsi plusieurs pièces. Un lavage/dépoussiérage est recommandé lorsqu'il y a de la poussière accumulée sur la chambre de combustion et sur la cheminée. Pour cet entretien, un temps de 15 minutes par lot à un taux horaire de 25 \$ pour les 4 lots d'utilisation annuelle a été considéré, soit un coût de 25 \$/an/salle. Comme la fournaise conventionnelle ne nécessite pratiquement aucun entretien annuel, il est possible de transposer directement cette dépense supplémentaire par rapport au traitement témoin.

8.1.4 Retour sur investissement de l'utilisation de la fournaise au propane rejetant les gaz de combustion

Le retour sur investissement du système sans rejet a été estimé en considérant :

- **Consommation d'énergie :**
 - Réduction liée à la consommation du propane : $192 \text{ \$/lot/salle} \times 4 \text{ lots/an} = 768 \text{ \$/an}$
 - Réduction des coûts d'électricité: $0,52 \text{ \$/lot/salle} \times 4 \text{ lots/an} = 2,08 \text{ \$/an}$
- **Performances zootechniques :**
 - Revenu supplémentaire généré par l'amélioration du gain de poids : $238 \text{ \$/lot/salle} \times 4 \text{ lots/an} = 952 \text{ \$/an}$
 - Revenu supplémentaire généré par l'amélioration de la conversion alimentaire : $348,50 \text{ \$/lot/salle} \times 4 \text{ lots/an} = 1\,394 \text{ \$/an}$
- **Entretien :**
 - Coût supplémentaire lié à l'entretien : $6,25 \text{ \$/lot/salle} \times 4 \text{ lots/an} = 25 \text{ \$/an}$
- **Achat des équipements (investissements) :**
 - Coût de l'amortissement moyen tenant compte d'une durée de vie utile de 10 ans et du coût d'acquisition ainsi que d'installation de 2 620 \$/salle : 227 \$/an
 - Intérêts calculés suivant la méthode des annuités constantes avec un taux d'intérêt moyen de 4,5 % et un emprunt de 10 ans (Levallois, 2018) : 68 \$/an

Ainsi, le bénéfice net annuel estimé pour le traitement sans rejet comparativement au traitement témoin se chiffre à environ 2 796\$/an. Le retour sur investissement de l'utilisation de la fournaise sans rejet est ainsi de 0,94 an.

8.2 Échangeur d'air récupérateur de chaleur

Le coût d'achat et de l'installation d'un échangeur d'air récupérateur de chaleur est de 12 575 \$ par salle pour le modèle ESA-3000. Ce montant inclut l'équipement et l'installation. Ce coût est environ 14 fois plus élevé que la fournaise au propane conventionnelle (900 \$), correspondant à une dépense supplémentaire de 11 675 \$/salle pour l'équipement.

8.2.1 Impact sur la consommation d'énergie

8.2.1.1 Consommation de propane

Le système d'échangeur d'air récupérateur de chaleur a permis une réduction de 495,47 litres de propane par salle par lot par rapport au traitement témoin, soit une diminution de 52,96 %. Sur le plan monétaire, cela représente une économie de 297 \$ par salle d'élevage par lot, soit environ 0,68 \$ par place porcelet. Considérant un total de 4 lots/an, le montant lié à la baisse de la consommation de propane pour le système d'échangeur d'air s'élève à 1 188 \$/an.

8.2.1.2 Consommation d'électricité

La consommation moyenne d'électricité pour le traitement échangeur de chaleur se chiffre à 855 kWh/lot, soit une augmentation d'environ 652 kWh (+ 321 %) par rapport au témoin. Sur la base du taux de tarification D d'Hydro Québec (clientèles résidentielle et agricole), lequel s'établit à 6,509 centimes/kWh (Hydro Québec, 2023), le coût supplémentaire d'électricité par lot en lien avec le traitement échangeur s'élève à 42,4 \$/lot/salle. Pour un total de 4 lots/an en pouponnière utilisant cette technologie, cette dépense supplémentaire atteint ainsi 169,75 \$/an.

8.2.2 Impact sur les performances zootechniques

L'utilisation d'un échangeur de chaleur permet de réduire le taux de mortalité de 1 % par rapport au témoin, passant ainsi d'un taux de mortalité de 3,3 % vers un taux de mortalité de 2,3 %. Ceci se traduit par une augmentation du nombre de porcs vendus, soit 429 porcelets vendus/lot/salle. Ceci revient à un gain d'environ 300,80 \$/lot/salle en considérant une moyenne quinquennale 2018-2022 de 75,20 \$/porcelet pour un porcelet de 30,21 kg (données compilées à partir de la publication "Valeur des stocks" 2018-2023).

L'augmentation du poids à la sortie de 0,86 kg pour les porcelets du traitement échangeur rapporte ainsi un montant supplémentaire de 1,12 \$/porcelet vendu. En considérant une vente de 429 porcelets par salle par lot, il est ainsi possible de chiffrer ce gain à 480,48 \$/lot/salle. Pour un total de 4 lots/an utilisant cette technologie en pouponnière, ce revenu supplémentaire atteint ainsi 1921,92 \$/an.

L'amélioration de 0,013 de la conversion alimentaire pour la technologie échangeur a pour effet de réduire la quantité de la moulée consommée par porcelet. Avec un prix de moulée moyen de 608,07 \$/tonne pour les porcelets en pouponnière et une économie de moulée de 0,31 kg/porcelet, le système d'échangeur de chaleur air-air permet de réduire le coût de l'alimentation de 0,18 \$/porcelet vendu. En considérant une vente de 429 porcelets par salle par lot, il est ainsi possible de chiffrer l'économie de moulée à 77,22 \$/lot/salle ou 309\$ /an.

8.2.3 Coût d'entretien de l'échangeur d'air récupérateur de chaleur

L'entretien de l'échangeur de chaleur est simple. Un lavage entre chacun des lots est nécessaire pour éviter que le système ne s'encrasse et pour optimiser son efficacité énergétique. Un temps de 30 minutes par lot à un taux horaire de 25 \$ pour les 4 lots d'utilisation a été considéré, soit un coût annuel d'entretien de 50 \$/an. Comme la fournaise conventionnelle ne nécessite pratiquement aucun entretien annuel, il est possible de transposer directement cette dépense supplémentaire par rapport au traitement témoin.

8.2.4 Retour sur investissement de l'utilisation d'un échangeur d'air

Le retour sur investissement du système échangeur de chaleur a été estimé en considérant:

- **Consommation d'énergie :**
 - Réduction liée à la consommation du propane : 297 \$/lot/salle ou 1 188 \$/an
 - Augmentation des coûts d'électricité: 42,44 \$/lot/salle ou 169,75 \$/an
- **Performances zootechniques :**
 - Revenu supplémentaire généré par la diminution du taux de mortalité des porcelets : 300,80 \$/lot/salle ou 1203,20 \$/an
 - Revenu supplémentaire généré par l'amélioration du gain de poids : 480,48 \$/lot/salle ou 1921,92 \$/an
 - Revenu supplémentaire généré par l'amélioration de la conversion alimentaire : 77,22 \$/lot/salle ou 309 \$/an
- **Entretien :**
 - Coût supplémentaire lié à l'entretien : 12,50 \$/lot/salle ou 50 \$/an
- **Achat des équipements**
 - Coût de l'amortissement moyen tenant compte d'une durée de vie utile de 10 ans et du coût d'acquisition ainsi que d'installation de 12 575 \$/salle : 1 257,50 \$/an
 - Intérêts calculés suivant la méthode des annuités constantes avec un taux d'intérêt moyen de 4,5 % et une durée de l'emprunt de 10 ans (Levallois, 2018) : 170 \$/an

Ainsi, le bénéfice net estimé pour l'échangeur de chaleur se chiffre à environ 2 975 \$/an pour le traitement échangeur. Le retour sur investissement de l'utilisation de l'échangeur d'air récupérateur de chaleur est ainsi de 4,23 ans.

8.3 Résumé des impacts technico-économiques

Le Tableau 9 présente un résumé des coûts annuels pour la transition d'une fournaise conventionnelle (traitement témoin) vers une fournaise avec rejet de combustion à l'extérieur (traitement sans rejet) ou vers un échangeur de chaleur (traitement échangeur).

Tableau 9. Coûts annuels par salle pour la transition d'une fournaise conventionnelle au propane (témoin) vers une nouvelle technologie de conditionnement de l'air des porcelets

Poste budgétaire	Différence par rapport au témoin ¹	
	Sans rejet	Échangeur
Consommation d'énergie		
Propane	768,00 \$	1 188,00 \$
Électricité	2,08 \$	-169,75 \$
Performances zootechniques		
Mortalité	0,00 \$	1 203,20 \$
Gain de poids	952,00 \$	1 921,92 \$
Conversion alimentaire	1 394,00 \$	309,00 \$
Entretien	-25,00 \$	-50,00 \$
Amortissements et intérêts		
Amortissement des équipements (10 ans)	-227,00 \$	-1 257,50 \$
Coût d'intérêts annuel	-68,00 \$	-170,00 \$
Total : bénéfice net	2796,00\$	2975,00 \$
Investissements		
Coût d'achat et d'installation initial	2 620,00 \$	12 575,00 \$
Retour sur investissement	0,94 an	4,23 ans

¹ Les coûts représentent la différence par rapport au témoin (fournaise conventionnelle au propane). Un chiffre positif indique une retombée d'argent ou une diminution des coûts, tandis que les chiffres négatifs indiquent une dépense supplémentaire.

9 Observations sur les technologies

	Sans rejet	Échangeur
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Permet une diminution importante du coût de chauffage • Permet une économie de 34,16 % de propane • Permet des économies de 4 % d'électricité • Technologie simple d'utilisation : même principe de fonctionnement que les fournaies conventionnelles • Amélioration de la qualité de l'air lors des périodes nécessitant beaucoup de chauffage <ul style="list-style-type: none"> ○ Diminution de la concentration en CO₂ dans la salle d'élevage • Retour sur investissement en 0,94 an grâce à l'économie de propane et l'amélioration des performances zootechniques • Émission de CO₂ éq. plus faible que le témoin 	<ul style="list-style-type: none"> • Permet une diminution importante du coût de chauffage • Permet une économie de 52,96 % de propane • Permet une augmentation du débit de ventilation en hiver tout en diminuant les coûts de chauffage • Amélioration de la qualité de l'air <ul style="list-style-type: none"> ○ Diminution de la concentration en CO₂ et de l'HR • A permis une diminution du taux de mortalité des porcelets • Le préchauffage de l'air frais entrant dans la salle évite les courants d'air froid sur les animaux • Possibilité d'orienter l'air entrant grâce au déflecteur • Retour sur investissement en 4,23 ans grâce à l'économie de propane et l'amélioration des performances zootechniques et ce, même si la consommation électrique est plus élevée. • Émission de CO₂ éq. la plus faible de tous les traitements
Limitations	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un certain entretien (lavage) entre les lots • Nécessite une cheminée (toiture ou murale) <ul style="list-style-type: none"> ○ Doit être bien positionnée ou protégée pour éviter des bris en hiver lorsque les toitures se déchargent de la neige • Pour une durée de vie optimale dans un environnement porcin (poussières, humidité, ammoniac), choisir le modèle avec la chambre de combustion en acier inoxydable • Le gaz sortant de la fournaie est très acide, pouvant causer de la corrosion sur la cheminée et sur les structures du bâtiment (revêtements métalliques) 	<ul style="list-style-type: none"> • Plage de fonctionnement entre 300 et 3000 CFM • Peut être limitatif en fonction du nombre d'animaux de la salle • Nécessite un certain lavage entre les lots • Technologie pas nécessairement adaptée à toutes les configurations de salle <ul style="list-style-type: none"> ○ Dans le cas d'une salle faite sur la longueur, la diffusion et le mélange de l'air frais sont moins homogènes

10 Conclusion

Dans le cadre du projet, le contrôle de l'ambiance dans les salles d'élevage fut automatisé en configurant une courbe de débit minimal selon l'âge des porcelets et en utilisant des compensations du débit de ventilation selon les concentrations de CO₂ ainsi que d'humidité dans la salle d'élevage. La mise en place de ces stratégies a permis de maintenir des conditions similaires dans toutes les salles d'élevage pour chacun des traitements.

En ce qui a trait aux performances environnementales, le traitement utilisant les fournaies, dont les gaz de combustion sont rejetés à l'extérieur de la salle, utilise généralement un débit de ventilation moindre. Ceci permet de diminuer les besoins de chauffage et la consommation d'énergie fossile d'environ 30 %. Similairement, bien que les échangeurs de chaleur utilisés dans le cadre du projet étaient des prototypes, leur utilisation a permis de réduire d'environ 50 % la consommation de propane.

Lorsque la température de la salle dépassait la température de consigne, l'échangeur permettait de doubler les débits de ventilation par rapport aux autres traitements, car il récupère une partie de l'énergie de l'air sortant. L'augmentation de ces débits de ventilation n'a toutefois pas permis d'observer des diminutions aussi importantes qu'escomptées sur les mesures de concentration d'humidité et de CO₂ dans l'air ambiant des salles d'élevage pour les différents lots. Aussi, l'augmentation des émissions totales de CO₂ et d'autres GES n'était pas prévue dans le modèle théorique utilisé dans le cadre du projet. Toutefois, Phillippe et Nicks (2015) rapportent également que les émissions de ces gaz sont corrélées avec la température et les débits de ventilation.

Puisqu'aucun modèle n'est disponible pour prédire l'augmentation de la production de ces gaz attribuables à l'activité bactériologique selon la température et le débit de ventilation, l'analyse des émissions fut limitée aux situations des quatre premières semaines, où les débits de ventilation et les températures dans les salles d'élevage étaient comparables. De futurs travaux devront prendre en compte cette émission additionnelle, en plus d'optimiser la paramétrisation des contrôles afin de maintenir de bonnes performances de croissance, tout en réduisant les émissions de GES des salles d'élevage.

Pour ce qui est des performances technico-économiques des traitements comparés, bien que les écarts n'étaient pas statistiquement significatifs, de meilleures performances zootechniques furent observées avec l'utilisation d'un échangeur de chaleur et lorsque les gaz de combustion du système de chauffage étaient rejetés à l'extérieur de la salle d'élevage.

Selon les données obtenues dans le cadre de ce projet, il a été calculé qu'un échangeur de chaleur peut être rentabilisé en moins de 5 ans lorsqu'utilisé dans une pouponnière porcine. La période de retour sur investissement de la fournaise munie d'une cheminée d'évacuation des gaz de combustion est beaucoup plus courte, soit d'environ 1 an. Toutefois, l'utilisation d'un tel équipement serait préférable dans un plénum de préchauffage plutôt que directement dans les salles d'élevage, soit dans un environnement moins poussiéreux et corrosif. Il serait ainsi possible d'augmenter la durée de vie de l'appareil, qui n'a pas été éprouvé dans les bâtiments porcins.

Les performances agronomiques, environnementales et économiques des deux technologies testées sont très intéressantes et présentent plusieurs avantages pour les producteurs qui les mettront en place. À la lumière de ces résultats, il pourrait être opportun de tester ces deux technologies dans un autre type d'élevage où les besoins énergétiques sont importants, comme dans la section mise bas des maternités, ainsi que de tester la combinaison des deux technologies dans la même salle d'élevage.

Finalement, il serait aussi intéressant de mener des travaux supplémentaires dans le but de mieux comprendre ce qui se passe avec les émissions de gaz lorsque les débits de ventilation augmentent en fin d'élevage.

11 Références

- AHDB pork. 2016. Ventilating pig buildings. Providing optimum living conditions for pigs. Warwickshire: Agriculture and Horticulture Development Board, 93 p.
- ASAE, 2003. ASAE Standards - Standards Engineering Practices Data. 50th edition. St. Joseph, MI: ASAE. American Society of Agricultural Engineers.
- ASAE, 1995. ASAE Standards - Standards Engineering Practices Data. 43th edition. St. Joseph, MI: ASAE. American Society of Agricultural Engineers.
- Baker, J.E. 2004. Effective environmental temperature. Journal of Swine Health and Production, 12(3) : 140-143.
- Banhazi, T.M., Stott, P., Rutley, D., Blanes-Vidal, V. et W. Pitchford. 2011. Air exchanges and indoor carbon dioxide concentration in Australian pig buildings: Effect of housing and management factors. Biosystems engineering, 110 : 272-279.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B. et S. Walker. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. Journal of Statistical Software, 67(1) : 1-48.
- Bodden, J. 2020. Combien coûte l'utilisation d'un foyer au gaz? [En ligne]. <https://passionfeu.com/faq/combien-coute-lutilisation-dun-foyer-au-gaz/>
- Centre de collaboration nationale en santé environnementale (CCNSE). 2010. Le dioxyde de carbone dans l'air intérieur. [En ligne]. <https://ccnse.ca/documents/field-inquiry/le-dioxyde-de-carbone-dans-lair-interieur>
- Chambres d'agriculture Bretagne. 2010. « Vers la performance énergétique en élevages de porcs ». Journée départementale énergie, 19 octobre.
- Chenard, L. 2001. Le porc en hiver : comment le tempérer? 22^e colloque sur la production porcine : 116-136.
- Chêne vert. 2020. Coups de chaleur : comment limiter leur impact et éviter les pertes. "Après la pluie vient le beau temps". [En ligne]. <https://www.chenevert.vet/actualites/742-coups-de-chaleur-comment-limiter-leur-impact-et-eviter-les-pertes.html>
- Conseil canadien du Porc (CCP). 2005. Pratiques et technologies visant à atténuer les répercussions de la production porcine sur l'environnement. CCP, Ottawa.
- Conseil national pour les soins aux animaux d'élevage (CNSAE). 2014. Code de pratiques pour le soin et la manipulation des porcs. [En ligne]. http://www.nfacc.ca/pdfs/codes/porcs_code_de_pratiques.pdf

- CPVQ-CPAQ. 1998. La ventilation des porcheries et autres bâtiments d'élevages. Québec : Conseil des productions végétales du Québec, 174 p.
- CRAAQ. 2023. Énergie-Coûts des sources d'énergie, AGDEX 760/821.
- Dauncey, M.J. et D.L. Ingram. 1986. Acclimatization to warm or cold temperatures and the role of food intake. *Journal of Thermal Biology*, 11(2) : 89-93.
- Dennehy, C., Lawlor, P.G., Jiang, Y., Gardiner, G.E., Xie, S., Nghiem, L.D. et X. Zhan. 2017. Greenhouse gas emissions from different pig manure management techniques: a critical analysis. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(3) : 16 p.
- Donham, K., Haglind, P., Peterson, Y., Rylander, R. et L. Belin. 1989. Environmental and health studies of farm workers in Swedish swine confinement buildings. *British Journal of Industrial Medicine*, 46 : 31-37.
- ÉPIDALIS. 2019. Ventilation et toux en engraissement. [En ligne]. <https://www.epidalis.com/actualite/ventilation-et-toux-en-engraissement/>
- Énergie Solutions Air. S.d.(a). Esa series. Échangeur d'air. [En ligne]. <https://esaseries.com/wp-content/uploads/2020/05/esa-specifications-techniques-fr.pdf>
- Énergie Solutions Air. S.d.(b). Le futur de la ventilation agricole commence maintenant. Le futur de la ventilation agricole commence maintenant. [En ligne]. <https://esaseries.com/wp-content/uploads/2020/05/brochure-esa-3000.pdf>
- Faure, J., Lefaucheur, L., Kouba, M. et B. Lebret. 2012. Croissance du porc à une température d'élevage basse : effets sur les performances et la composition corporelle. *Journées de la Recherche Porcine*, 44 : 281-282.
- Forcada, F. et J.A. Abecia, J.A. 2019. How pigs influence indoor air properties in intensive farming: practical implications—a review. *Annals of Animal Science* 19 : 31-47.
- Hydro Québec. 2023. Le tarif de base pour la clientèle résidentielle et agricole. [En ligne]. <https://www.hydroquebec.com/residentiel/espace-clients/tarifs/tarif-d.html#:~:text=Le%20tarif%20D%20comporte%20deux,reste%20de%20l'%C3%A9nergie%20consomm%C3%A9e>
- IFIP. 2019. Ambiance : ventilation et chauffage. Fondamentaux sur l'ambiance. PorciSanté de l'IFIP. Fiche conseil "Bâtisanté" no 7.
- Imbeault-Tétreault, H. et F. Charron-Doucet. 2018. Réduction des gaz à effet de serre. Améliorer votre bilan carbone...et financier. *Porc Québec*, juin : 63-68.

- Johnston, L.J., Moeller, S. et M.C. Shannon. 2013. Effects of reduced nocturnal temperature on pig performance and energy consumption in swine nursery rooms. *Journal of animal science*, 91 : 3429-34354.
- Jones, J.B., Burgess, L.R., Webster, A.J.F. et C.M. Wathes. 1996. Behavioural responses of pigs to atmospheric ammonia in a chronic choice test. *Animal Science*, 63 : 437-445.
- Jones, J.B., Wathes, C.M., Persaud, K.C., White, R.P. et R.B. Jones. 2001 Acute and chronic exposure to ammonia and olfactory acuity for n-butanol in the pig. *Applied Animal Behaviour Science*, 71 : 13–28.
- Le Dividich, J. et P. Herpin. 1994. Effects of climatic conditions on the performance, metabolism and health status of weaned piglets: a review. *Livestock Production Science*, 38 : 79-90.
- Le Dividich, J. et D. Rinaldo. 1989. Effets de l'environnement thermique sur les performances du porc en croissance. *Journées de la recherche porcine*, 21 : 219-230.
- Le Dividich, J. 1981. Effects of environmental temperature on the growth rates of early-weaned piglets. *Livestock Production Science*, 8 : 75-86.
- Lee, C., Giles, L.R., Bryden, W.L., Downing, J.L., Owens, P.C., Kirby, A.C. et P.C. Wynn. 2005. Performance and endocrine responses of group housed weaner pigs exposed to the air quality of a commercial environment. *Livestock Production Science*, 93 : 255–262.
- Lemay, J. 2007. Maîtriser la ventilation dans vos élevages. Expo-Congrès du porc du Québec : 55-66.
- Lemoine, N., Bournazel, M., Brillouet, D. et D. Guillou. 2022. Conséquences d'une baisse temporaire de la température ambiante, une semaine après le passage à l'aliment 2ème âge, sur les performances et la santé des porcelets sevrés. *Journées de la Recherche Porcine*, 54 : 287-292.
- Lenth, R. 2023. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.8.4-1. [En ligne]. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- Levallois, R. 2018. Gestion de l'entreprise agricole. De la théorie à la pratique. 2^e édition. Université Laval, 408 p.
- Marcon, M., Massabie, P., Amand, G., Robin, P., Chevalier, D., Kergourlay, F., Nicolas, C. et A. Keita. 2017. Modélisation des flux d'énergie directe et indirecte pour les bâtiments des filières porcine et avicole. *Innovations Agronomiques*, 55 : 55-70.
- Massabie, P. 2006. Manuel de chauffage et de ventilation pour les bâtiments d'élevage porcin. Paris: IFIP, 54 p.

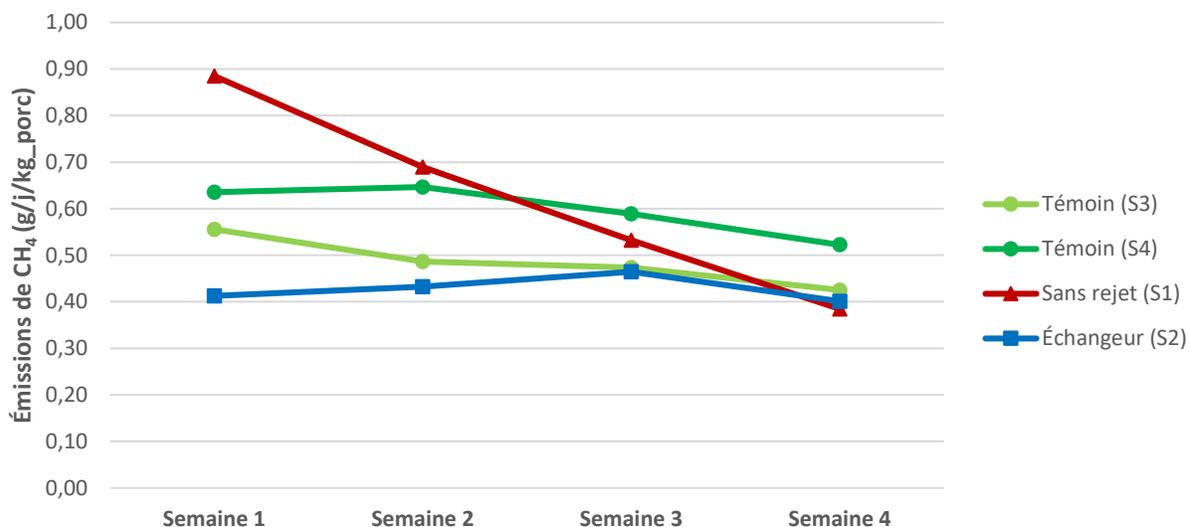
- Massabie, P., Granier, R. et A. Gasc. 2001. Effet de la vitesse d'air sur le comportement et les performances du porc charcutier en fonction de la température ambiante. Journées de la Recherche Porcine, 33 : 1-7.
- Michiels, A., Piepers, S., Ulens, T., Van Ransbeeck, N., Del Pozo Sacristan, R., Sierens, A., Haesebrouck, F., Demeyer, P. et D. Maes. 2015. Impact of particulate matter and ammonia on average daily weight gain, mortality and lung lesions in pigs. Preventive Veterinary Medicine, 121(1-2) : 99-107.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). 2022. GES-1990-2020. Méthodologies de calcul d'émissions, description des secteurs et facteurs d'émission. [En ligne]. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2019/inventaire1990-2019-annexes-calculs.pdf>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). 2019. Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2017 et leur évolution depuis 1990. [En ligne]. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2017/inventaire1990-2017.pdf>
- Modine. 2023. Hot Dawg® Garage Heater. [En ligne]. <https://www.modinehvac.com/products/unit-heaters/residential-hot-dawg-series/hot-dawg-separated-combustion-hds/#features>
- Myer, R. et R. Bucklin. 2009. Influence of Hot-Humid Environment on Growth Performance and Reproduction of Swine. [En ligne]. <https://www.thepigsite.com/articles/influence-of-hothumid-environment-on-growth-performance-and-reproduction-of-swine>
- Philippe, F.X. et B. Nicks. 2015. Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. Agriculture, Ecosystems and Environment, 199 : 10-25.
- Quiniou, N., Renaudeau, D., collin, A. et J. Noblet. 2000. Effets de l'exposition au chaud sur les caractéristiques de la prise alimentaire du porc à différents stades physiologiques. INRA Productions animales, 13(4) : 233-245.
- R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [En ligne]. <https://www.R-project.org/>
- Rodriguez, M.R., Losada, E., Besteiro, R., Arango, T., Velo, R., Ortega, J.A. et M.D. Fernandez. 2020. Evolution of NH3 Concentrations in Weaner Pig Buildings Based on Setpoint Temperature. Agronomy, 10 : 14 p.

- Schneberger, D., Cloonan, D., DeVasure, J.M., Bailey, K.L., Romberger, D.J. et T.A. Wyatt. 2015. Effect of elevated carbon dioxide on bronchial epithelial innate immune receptor response to organic dust from swine confinement barns. *International Immunopharmacology*, 27(1) : 76-84.
- Smith, J. et L. Eastwood. 2017. Comment éviter des pertes de production chez les porcs causées par le stress dû à la chaleur. MAAARO.
- Smith, P. et H. Crabtree. 2005. Pig environment problems. United Kingdom : Nottingham University Press, 166 p.
- Van der Hel, W., Duijghuisen, R. et M.W.A. Verstegen. 1986. The effect of ambient temperature and activity on the daily variation in heat production of growing pigs kept in groups. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 34 : 173-184.
- Wathes, C.M. 2001. Aerial Pollutants from Weaner Production. Dans: *The Weaner pig*, Cabi Publishing, Chap. 13, p. 259-271.
- Xiong, Y., Meng, Q.S., Gao, J., Tang, X.F. et H.F. Zhang. 2017. Effects of relative humidity on animal health and welfare. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(8) : 1653–1658.

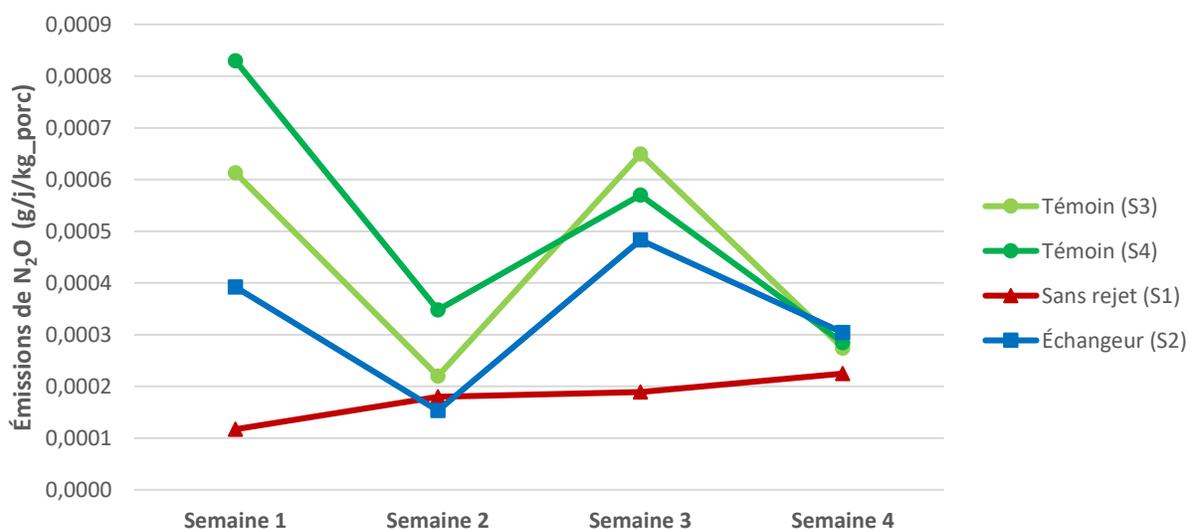
Annexe 1

Émissions des gaz des trois traitements par jour (kg/porc)

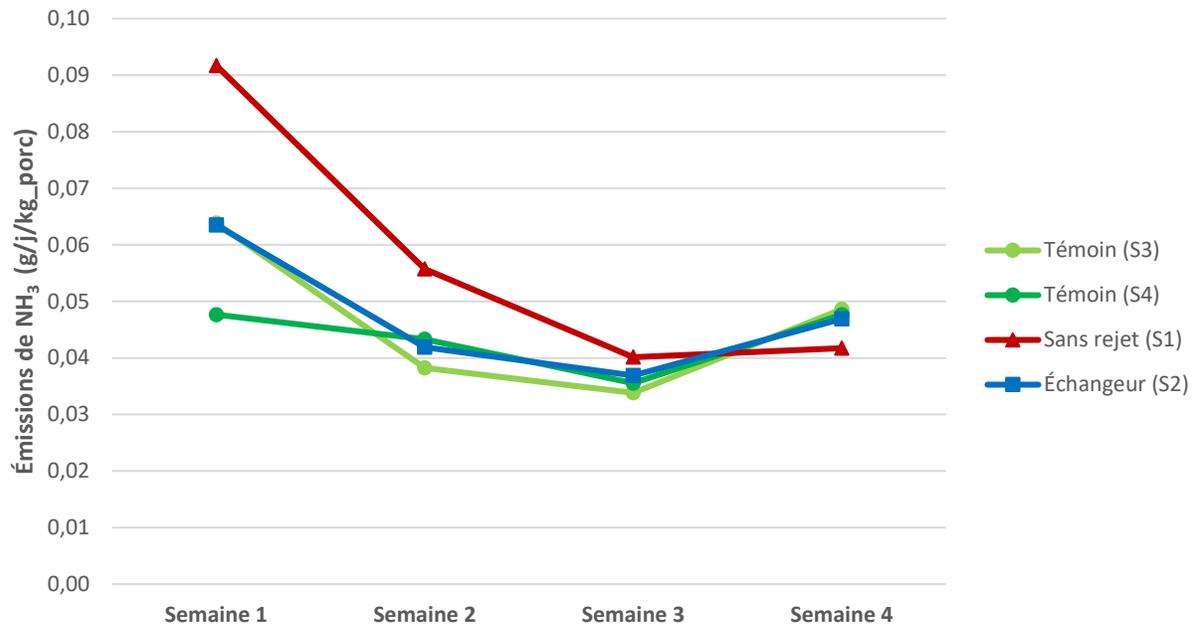
Émissions de CH₄ par jour par kg porc



Émissions de N₂O par jour par kg porc



Émissions de NH₃ par jour par kg porc



Annexe 2 : Attentes et indicateurs

Nombre d'entreprises touchées par les résultats du projet

Les émissions de GES des deux équipements testés sont plus faibles que les systèmes de chauffage actuellement utilisés dans les fermes porcines (fournaies conventionnelles au propane). De plus, les deux technologies permettent un retour sur investissement rapide. Compte tenu de ces deux faits, le taux de pénétration de ces équipements dans le marché porcin risque de s'accélérer une fois le contexte économique actuel difficile sera passé.

Au Québec, avec la restructuration actuelle, la filière porcine produira environ 6 000 000 de porcs annuellement. De ce nombre, environ 70 % des porcelets sont produits par les entreprises de grande taille ayant des bâtiments typiques, semblables à ceux où le projet a été réalisé. Dans ces organisations, environ 75 % des porcelets sont élevés dans des bâtiments de type pouponnière, tandis que les 25 % restants grandissent dans des bâtiments de type sevrage-vente. Il y a donc environ 485 000 places en pouponnière qui sont retrouvées dans les réseaux des entreprises de grande taille. En supposant des bâtiments typiques de 2 000 à 3 000 places, c'est entre 160 et 240 bâtiments de pouponnière qui pourraient être intéressés par les résultats du projet.

En ce qui concerne les producteurs indépendants, les élevages en sevrage-vente sont moins courants. Il est donc estimé qu'il y ait 275 000 places en pouponnière qui peuvent se retrouver dans un bâtiment distinct, dans une section d'un bâtiment ou tout simplement dans une salle de pouponnière. Les pouponnières peuvent avoir une gestion d'élevage en tout plein-tout vide ou en rotation. Les producteurs indépendants risquent également d'être très intéressés par les résultats de ce projet, surtout en raison du retour sur investissement rapide.

Les résultats de ce projet pourraient également intéresser un autre type d'élevage, comme les maternités. Cependant, il faudrait tester les deux technologies dans le contexte spécifique de ce type d'élevage, surtout dans les salles de mise bas, puisqu'elles sont très énergivores afin d'assurer le confort des porcelets naissants.

Finalement, il serait très intéressant de mener des travaux supplémentaires dans le but de mieux comprendre ce qui se passe avec les émissions de gaz lorsque les débits de ventilation augmentent en fin d'élevage, ainsi que de tester la combinaison des deux technologies dans la même salle d'élevage.



Centre de développement du porc du Québec inc.

Place de la Cité, tour Belle Cour

815 Rte Marie-Victorin

Lévis (Secteur Saint-Nicolas) G7A 3S6

 418 650-2440 ■  418 650-1626

cdpq@cdpq.ca ■ www.cdpq.ca

 @cdpqinc

