

## RAPPORT FINAL

# ÉVALUATION DES PARAMÈTRES OPTIMAUX DE LAVAGE ET DÉVELOPPEMENT D'UN INDICATEUR EN TEMPS RÉEL AFIN D'ASSURER LA BIOSÉCURITÉ ET RÉDUIRE À LA SOURCE LE VOLUME D'EAUX USÉES EN PRODUCTION PORCINE

**Auteur ou responsable scientifique : STÉPHANE GODBOUT, ing., agr., Ph. D.**

Collaborateurs ou co-auteurs : Erika Yukari NAKANISHI, Joahnn H. PALACIOS, Patrick BRASSARD et Sébastien TURCOTTE

Rapport présenté à : Équipe du Programme Innov'Action agroalimentaire

Date : 28 juin 2023

Projet IRDA # : 400122

L'IRDA a été constitué en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques de la Faune et des Parcs (MELCCFP) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations (MEIE).

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement est une corporation de recherche à but non lucratif qui travaille à chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

### Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable.

### Notre vision

L'IRDA est reconnu à l'échelle canadienne comme un chef de file en recherche, développement et transfert en agroenvironnement. L'IRDA se démarque par son approche intégrée et par le dynamisme de ses partenariats qui lui permettent d'anticiper les problèmes et de proposer des solutions novatrices répondant aux besoins des agriculteurs et de la société.

### Pour en savoir plus

[www.irda.qc.ca](http://www.irda.qc.ca)

## PARTENAIRES

 PARTENARIAT  
CANADIEN pour  
l'AGRICULTURE

Canada Québec 

  
Centre de développement  
du porc du Québec inc.

  
Les Éleveurs  
de porcs du Québec



 UNIVERSITÉ  
LAVAL

# **Évaluation des paramètres optimaux de lavage et développement d'un indicateur en temps réel afin d'assurer la biosécurité et réduire à la source le volume d'eaux usées en production porcine**

Rapport final

Présenté à :

## **Équipe du Programme Innov'Action agroalimentaire**

Direction d'appui à la science, à l'innovation et aux programmes

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ)

## **LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :**

Godbout, S., E.Y. Nakanishi, J.H. Palacios, P. Brassard et S. Turcotte. 2023. Évaluation des paramètres optimaux de lavage et développement d'un indicateur en temps réel afin d'assurer la biosécurité et réduire à la source le volume d'eaux usées en production porcine. Rapport final. IRDA et partenaires. 97 pages. © Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

## ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Stéphane Godbout, ing., agr., Ph. D., IRDA
- Chargé de projet : Joahnn Palacios, ing., M. Sc. IRDA

## ÉQUIPE DE RÉDACTION DU RAPPORT

- Stéphane Godbout, ing., agr., Ph.D., IRDA
- Erika Yukari Nakanishi, Ph. D., IRDA
- Joahnn Palacios, ing., M. Sc., IRDA
- Patrick Brassard, ing., Ph.D., IRDA
- Sébastien Turcotte, agr., CDPQ

## COLLABORATEURS

- Sébastien Fournel, ing. Ph. D, Université Laval
- Richard Hogue, Ph.D., IRDA
- Raphaël Bertinotti, ÉPQ
- Yves Garceau, agr., ÉPQ
- Marie-Aude Ricard, ing., CDPQ
- Catherine Lussier, Ph. D., ÉPQ

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Stéphane Godbout, ing., agr., Ph. D.

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, poste 600

Courriel : [stephane.godbout@irda.qc.ca](mailto:stephane.godbout@irda.qc.ca)

## REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme Innov'Action agroalimentaire, en vertu du Partenariat canadien pour l'agriculture, entente conclue entre les Gouvernements du Canada et du Québec. Des remerciements s'adressent également à l'IRDA et ses partenaires le Centre du Développement du Porc du Québec, les Éleveurs de Porcs du Québec, la Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Université Laval et le programme MITACS qui ont fourni une contribution importante dans le cadre de cette étude. Les auteurs remercient également les différents éleveurs et intervenant participants au projet, notamment Frédérick Beaupré de RP2R. Les auteurs reconnaissent également l'appui technique et professionnel fourni par le personnel de recherche de l'IRDA, notamment Dan Zegan, Cédric Morin, Jérémie Tremblay-Gravel, Béatrice Dupont-Fortin, David Matte, Mariette Sauvageau et Gaetan Girard.

## RÉSUMÉ

---

Au Québec, l'industrie porcine est le deuxième secteur agroalimentaire en importance. Cependant, l'intensification de la production rend plus probables les problèmes sanitaires, qui peuvent causer des problèmes économiques aux producteurs et réduire le bien-être animal. Le lavage et la désinfection des bâtiments d'élevage jouent un rôle primordial pour maintenir un statut sanitaire élevé, qui permet de contrôler les maladies, d'éviter les épidémies et de ralentir la dégradation de la santé des bâtiments. De plus, les pressions environnementales exigent une production plus durable, ce qui rend la réduction de la quantité d'eau utilisée très importante.

Dans ce contexte, ce projet vise à optimiser les paramètres des opérations de lavage pour assurer de bonnes conditions sanitaires en minimisant la quantité d'eau utilisée dans les bâtiments porcins. L'hypothèse principale avancée est que l'optimisation des méthodes de lavage permettra non seulement d'améliorer l'hygiène du bâtiment, mais également de réduire de manière significative la consommation d'eau nécessaire pour les opérations de nettoyage.

Tout d'abord, ce projet a permis d'étudier des stratégies pour évaluer rapidement l'efficacité de lavage et les niveaux de propreté des matériaux. Deux méthodes ont été identifiées comme étant à la fois simples et prometteuses pour servir d'indicateurs de propreté : la méthode de bioluminescence de l'adénosine triphosphate (ATP) et la méthode de réaction enzymatique utilisant le Biofinder. La méthode ATP permet de détecter la contamination bactérienne et non bactérienne présents sur une surface, tandis que la méthode Biofinder utilise des enzymes pour détecter la présence de biofilms.

Ensuite, l'optimisation des paramètres des opérations de lavage a été étudié dans le but de garantir des conditions sanitaires optimales, c'est-à-dire réduire la présence de bactéries et de résidus organiques en minimisant la consommation d'eau. Pour ce faire, trois paramètres de lavage (température de l'eau, pression d'impact et vitesse), deux types de buse (buse rotative et buse à jet plat) et six types de matériaux (béton coulé sur place, béton vibré pressé, acier inoxydable, fonte, PVC et HDPE) ont été évalués en utilisant une station de lavage automatisée. Les résultats ont montré que l'augmentation de la température de l'eau et de la pression d'impact du jet d'eau sur la surface, ainsi que la réduction de la vitesse de passage, ont un impact significatif sur l'efficacité du nettoyage. Les paramètres optimaux pour la buse rotative correspondent à : une température de l'eau comprise entre 35 et 37 °C, une pression d'impact de 20 MPa et une vitesse de 0,5 à 0,55 m/s. En revanche, pour la buse à jet plat, les paramètres optimaux sont : une température de l'eau comprise entre 40 et 45 °C, une pression d'impact de 0,6 MPa et une vitesse de 0,3 m/s.

De plus, une étape d'évaluation à l'échelle commerciale a été réalisée pour évaluer les méthodes sélectionnées en termes de propreté en utilisant des indicateurs, de consommation d'eau et de temps de lavage. Les résultats ont montré que le lavage à l'eau chaude a significativement réduit la consommation d'eau et le temps nécessaire pour la phase de lavage de 31% et 24%, respectivement, par rapport au lavage à l'eau froide. Les indicateurs ont été adaptés pour l'utilisation en ferme. Pour la méthode Biofinder, le lavage était considéré satisfaisant lorsque l'échelle visuelle était notée 1, tandis que les échelles 2 et 3 étaient jugées inadéquates. Pour la méthode utilisant

l'ATP, un niveau de propreté inférieur à 1500 RLU (unités de lumière relatives) a été déterminé comme étant acceptable pour un bâtiment porcin. En outre, le lavage à l'eau chaude a montré un niveau plus faible de micro-organismes, avec des valeurs d'ATP et un niveau de réaction du Biofinder plus bas que celles obtenues avec le lavage à l'eau froide.

Comme l'usure peut altérer la rugosité de la surface et ainsi avoir un impact sur l'efficacité du processus de nettoyage, une étude a été menée pour évaluer l'effet de l'usure sur l'efficacité de nettoyage de matériaux neufs et usés. Les résultats ont montré une augmentation linéaire de la valeur d'ATP pour les matériaux usés par rapport aux matériaux neufs, en particulier pour ceux utilisés comme plancher tels que la fonte, le béton coulé sur place et le béton vibré pressé, surtout lorsqu'ils sont nettoyés à l'eau froide.

De plus, ces résultats suggèrent que l'utilisation d'eau chaude pour le lavage peut offrir des avantages significatifs en termes d'efficacité de nettoyage concernant les matériaux âgés.

Donc, il est crucial de mettre en place des pratiques rigoureuses de nettoyage, afin de réduire e/ou éliminer les biofilms et les bactéries de la surface des bâtiment porcins. Pour obtenir un niveau de propreté adéquat pour l'ensemble des matériaux neufs et usés tout en réduisant la consommation d'eau. Le cadre de ce projet fournit de recommandations pour optimiser les procédures de lavage. Cela implique l'utilisation d'une buse rotative, d'une température supérieure à 35 °C et d'une pression d'impact supérieure à 20 MPa (par exemple, une pression de la laveuse de 2600 psi à une distance de 30 cm), ainsi que l'application de savon après le lavage à haute pression.

Enfin, en raison de la réduction des coûts en salaires, des économies annuelles de 824,90 \$ ont été estimées pour une ferme naisseur-finisser type (2000 places à l'engraissement, 278 truies et 2043 porcelets) lorsque le lavage est fait à l'eau chaude, ce qui est équivalent à une économie de 0,18 \$/m<sup>2</sup> de bâtiment lavé. Ces économies sont obtenues malgré l'achat de carburant nécessaire pour alimenter le chauffe-eau. D'autre part, l'utilisation de carburant fossile pour chauffer l'eau contribue à augmenter les émissions de gaz à effet de serre (GES) du scénario de lavage à l'eau chaude de 3 981 kg CO<sub>2</sub>e annuellement comparativement au scénario de lavage à l'eau froide, malgré la réduction du volume de lisier à épandre.

# TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction.....	1
1.1	Aspects sanitaires des bâtiments .....	1
1.2	L'eau en production porcine .....	4
1.3	Problématique.....	5
2	Hypothèses et objectifs de l'étude.....	6
2.1	Hypothèses de l'étude.....	6
2.2	Objectif principal .....	6
2.3	Objectifs spécifiques.....	6
2.4	Plan du rapport.....	6
3	Étape 1 – Détermination des matériaux et les méthodes de lavage .....	7
3.1	Introduction.....	7
3.2	Méthodologie .....	7
3.2.1	Revue de littérature.....	7
3.2.2	Enquête.....	8
3.3	Résultats et discussion .....	8
3.3.1	Sélection des paramètres de lavage.....	8
3.3.2	Sélection des matériaux .....	9
3.4	Synthèse .....	10
4	Étape 2 - Développement d'un indicateur visuel simple et efficace pour connaître rapidement le degré de salubrité.....	11
4.1	Introduction.....	11
4.2	Méthodologie .....	11
4.2.1	Matériel .....	11
4.2.2	Méthodes pour l'analyse de l'efficacité de lavage .....	13
4.3	Résultats et discussion .....	17
4.3.1	Caractérisation des matériaux et du lisier.....	17
4.3.2	Méthodes pour l'analyse en temps réel.....	20
4.3.3	Considérations générales .....	30
4.4	Synthèse .....	31

5	Étape 3 – Impact des paramètres de lavage et du type de matériau sur le niveau de propreté.....	32
5.1	Introduction.....	32
5.2	Méthodologie.....	32
5.2.1	Station de lavage automatisés expérimentale.....	32
5.2.2	Paramètres de lavage.....	33
5.2.3	Protocole de souillage.....	34
5.2.4	Analyse d’eau de lavage.....	34
5.2.5	Détermination des paramètres optimaux de lavage.....	34
5.2.6	Validation des paramètres optimaux.....	36
5.2.7	Analyse statistique.....	37
5.3	Résultats et discussion.....	38
5.3.1	Analyse d’eau de lavage.....	38
5.3.2	Détermination des paramètres optimaux de lavage.....	38
5.3.3	Validation des paramètres optimaux.....	42
5.4	Synthèse.....	47
6	Étape 4 – Validation et adaptation de la méthode à la ferme.....	49
6.1	Introduction.....	49
6.2	Méthodologie.....	49
6.2.1	Description des fermes.....	49
6.2.2	Paramètres et protocoles de lavage.....	50
6.2.3	Analyse de l’efficacité de lavage.....	51
6.2.4	Analyse statistique.....	52
6.3	Résultats et discussion.....	52
6.3.1	Évaluation de la consommation d’eau.....	52
6.3.2	Évaluation du temps de lavage.....	53
6.3.3	Adaptation des méthodes à la ferme.....	55
6.3.4	Évaluation de l’efficacité de lavage.....	56
6.4	Synthèse.....	58
7	Étape 5 – Comparaison de l’effet du lavage des Matériaux neufs et usés.....	60
7.1	Introduction.....	60
7.2	Méthodologie.....	60

7.2.1	Design expérimental.....	60
7.2.2	Analyse statistique.....	61
7.3	Résultats .....	61
7.3.1	L'efficacité de nettoyage de matériaux neufs et usés lavés à l'eau chaude .....	61
7.3.2	L'efficacité de nettoyage de matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide .....	64
7.4	Synthèse .....	66
8	Étape 6 - Analyses environnementale et économique.....	68
8.1	Introduction.....	68
8.2	Méthodologie.....	68
8.2.1	Description des scénarios.....	68
8.2.2	Évaluation des impacts environnementaux et économiques .....	69
8.3	Résultats et discussion .....	69
8.3.1	Volume d'eau et temps économisé.....	69
8.3.2	Émissions de GES.....	70
8.3.3	Analyse économique .....	74
8.4	Synthèse .....	74
9	Conclusions.....	76
	Références.....	78
	Annexe A – Tableaux d'identification de la pression d'impact .....	83
	Annexe B – Analyse d'optimisation par la méthode Box-Behnken.....	85

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Type de matériaux retrouvées dans les bâtiments d'élevage porcin.....	9
Tableau 2.	Description des matériaux.....	12
Tableau 3.	Caractérisation de la rugosité.....	17
Tableau 4.	Caractérisation du lisier.....	19
Tableau 5.	Décomptage de bactéries selon les dilutions de lisier en log CFU/ml .....	20
Tableau 6.	Les avantages et désavantages pour chacun des méthodes.....	30
Tableau 7.	Description des paramètres de lavage .....	34
Tableau 8.	Intervalles de chaque paramètre en fonction de matériaux lavée avec la buse rotative obtenu de l'analyse Box-Behnken en utilisant les valeurs d'ATP établies. ....	42
Tableau 9.	Intervalles de chaque paramètre en fonction de matériaux lavée avec la buse plate obtenu de l'analyse Box-Behnken en utilisant les valeurs d'ATP établies. ....	42
Tableau 10.	Valeurs moyennes en RLU et écart-type pour l'analyse d'ATP sur les plaques en béton coulé sur place (BCP) lavées avec la buse rotative.....	43
Tableau 11.	Valeurs moyennes en RLU et écart-type pour l'analyse d'ATP sur les plaques en béton coulé sur place (BCP) lavées avec la buse plate .....	43
Tableau 12.	Valeurs moyennes en RLU et écart-type pour l'analyse d'ATP sur les plaques en béton vibré pressé (BVP) lavées avec la buse rotative et plate.....	44
Tableau 13.	Caractéristiques du bâtiment et du troupeau d'élevage de chaque ferme .....	49
Tableau 14.	Description des laveuse commerciales utilisées selon le fabricant .....	50
Tableau 15.	Description des paramètres de lavage utilisés dans chacune des fermes .....	50
Tableau 16.	Description de l'échelle de cotes utilisée pour grader le niveau de réaction du Biofinder .....	52
Tableau 17.	Valeurs moyennes et écarts-types de la consommation d'eau en litres par mètre carré lavé.....	52
Tableau 18.	Valeurs moyenne et écart-type de temps de lavage en minute par m <sup>2</sup> .....	53
Tableau 19.	Valeurs moyennes et écart-types en RLU pour l'analyse de l'ATP effectuée une heure après le lavage de différentes surfaces dans les bâtiments porcins.....	57
Tableau 20.	Valeurs moyennes et écart-types en RLU pour l'analyse de l'ATP effectuée 24 heure après le lavage de différentes surfaces dans les bâtiments porcins .....	57
Tableau 21.	Valeurs de corrélation de Pearson entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau chaude .....	63
Tableau 22.	Valeurs de corrélation de Pearson entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide .....	65
Tableau 23.	Résumé indiquant la situation ou il y a un impact de l'usure sur la propreté du matériau.....	66
Tableau 24.	Ferme type.....	68
Tableau 25.	Réduction du volume d'eau et du temps de lavage (ferme type).....	70

Tableau 26.	Consommation de carburant et émissions de GES des procédés de lavage pour la ferme type sur une base annuelle.....	71
Tableau 27.	Volumes annuels de lisier produit (m <sup>3</sup> ) – Scénario de référence (ferme type).....	72
Tableau 28.	Volumes annuels de lisier produit (m <sup>3</sup> ) – Scénario alternatif (ferme type) .....	72
Tableau 29.	Consommation de carburant et émissions de GES de l'épandage sur une base annuelle pour la ferme type .....	73
Tableau 30.	Consommation de carburant et émissions de GES totales pour le lavage et pour l'épandage de lisier sur la ferme type sur une base annuelle.....	73
Tableau 31.	Coûts (CAD\$) associés aux procédés de lavage et d'épandage pour la ferme type.....	74

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Modèle schématique des phases et des facteurs impliqués dans la formation de biofilms (Nakanishi et al., 2021).....	3
Figure 2.	Réponses des producteurs selon les méthodes de lavage.....	8
Figure 3.	Images des plaques des matériaux utilisés .....	13
Figure 4.	Application de 1 ml de lisier sur la plaque couvrant une aire de 100 cm <sup>2</sup> .....	14
Figure 5.	Réaction Biofinder.....	15
Figure 6.	Plaques salies avec lisier de porc dilué pour le test avec Biofinder .....	15
Figure 7.	Souillage des plaques en béton coulé sur place pour le test de Crystal violet. La lettre A indique la zone où le ruban a été utilisé. ....	16
Figure 8.	Représentations en 3D des surfaces des matériaux .....	18
Figure 9.	Différents profils de rugosité avec la même valeur moyenne de rugosité (Santos & Júlio, 2013)..	19
Figure 10.	Lecture d'ATP sur l'écouvillon et les plaques du lisier en différentes dilutions.....	21
Figure 11.	Réaction du Biofinder sur le béton coulé sur place au lisier en différentes dilutions .....	22
Figure 12.	Réaction du Biofinder sur le béton vibré-pressé au lisier en différentes dilutions.....	23
Figure 13.	Réaction du Biofinder sur l'acier inoxydable au lisier en différentes dilutions.....	24
Figure 14.	Réaction du Biofinder sur le PVC au lisier en différentes dilutions.....	25
Figure 15.	Réaction du Biofinder sur le HDPE au lisier en différentes dilutions .....	26
Figure 16.	Réaction du Biofinder sur la grille en fonte au lisier en différentes dilutions.....	27
Figure 17.	Test d'application du biofinder à la ferme avant et après le processus de lavage .....	27
Figure 18.	La présence de bulles dans le coin (droit) et la structure d'assemblage (gauche) après application de Biofinder .....	28
Figure 19.	Accumulation des bulles dans la partie en bas du matériel.....	28
Figure 20.	Coloration de la biomasse par Crystal Violet .....	29
Figure 21.	Test Alamar blue dans le tube .....	29
Figure 22.	Test Alamar blue dans la boîte de Pétri .....	30
Figure 23.	Station de lavage automatisée; a) laveuse commerciale de pression, b) photo de la boîte-station de lavage, c) illustration schématique de la boîte-station de lavage, d) connexion de la buse au guindage de déplacement, e) illustration schématique de la table de support où l'échantillon du matériau à laver est déposé avec le réglage de la hauteur. ....	33
Figure 24.	Division de la plaque pour les analyses à l'aide d'une grille métallique .....	35
Figure 25.	Nombre de passages de la buse rotative et de la buse plate dans un même endroit durant les expériences de lavage du volet d'optimisation par Box-Behnken* .....	39

Figure 26.	Enregistrement de la réaction du Biofinder sur les plaques en béton coulé sur place (BCP) lavées avec la buse rotative. ....	44
Figure 27.	Enregistrement de la réaction du Biofinder sur les plaques en béton coulé sur place (BCP) lavées avec la buse plate .....	45
Figure 28.	Enregistrement de la réaction du Biofinder sur les plaques en béton vibré pressé (BVP) lavées avec la buse rotative.....	45
Figure 29.	Suivi de la réaction du Biofinder sur le béton vibré pressé (BVP) lavé avec la buse plate. ....	46
Figure 30.	Suivi de la réaction du Biofinder sur les plaques souillées.....	46
Figure 31.	Comptage d' <i>E. coli</i> et coliformes totaux sur les plaques en log CFU/100 cm <sup>2</sup> selon les facteurs : savonnage avant ou après le lavage (S-AVANT et S-APRÈS) et passage de la buse (1 et 2 fois).....	47
Figure 32.	Consommation d'eau (L/m <sup>2</sup> ) en utilisant l'eau chaude et froide .....	53
Figure 33.	Temps de lavage (min/m <sup>2</sup> ) selon les différents protocoles de lavage utilisé.....	54
Figure 34.	Illustration de l'évaluation d'une réponse du Biofinder .....	55
Figure 35.	Fiche représentative des analyses de Biofinder, d'ATP et de comptage sur plaques en laboratoire .....	56
Figure 36.	Niveau moyen de réaction de l'analyse visuelle du Biofinder pour chaque matériau lavé à l'eau chaude et l'eau froide .....	58
Figure 37.	Comparaison de l'analyse d'ATP effectuée à 1 heure et à 24 heures entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau chaude .....	62
Figure 38.	Analyse de régression de l'analyse d'ATP effectuée à 24 heures entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide .....	63
Figure 39.	Analyse de régression de l'analyse d'ATP effectuée à 24 heures entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide .....	63
Figure 40.	Comparaison de l'analyse d'ATP effectuée à 1 heure et à 24 heures entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide .....	64
Figure 41.	Analyse de régression de l'analyse d'ATP effectuée à 1 heure entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide .....	65
Figure 42.	Analyse de régression de l'analyse d'ATP effectuée à 24 heures entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide .....	66

# 1 INTRODUCTION

## 1.1 ASPECTS SANITAIRES DES BÂTIMENTS

Au fil du temps, l'industrie porcine a subi de grandes transformations : le nombre de fermes porcines a diminué tandis que le nombre de porcs a augmenté, ce qui témoigne d'une intensification de la production. Plus précisément, au Canada, entre 1981 et 2021, le nombre de fermes est passé de 55 770 à 7 600, soit une réduction de 86,5 %, tandis que le nombre de porcs a augmenté de 9,88 millions à 14,02 millions, soit une augmentation de 41,9 % (Brisson, 2014 ; Statistique Canada, 2021a, 2021b). L'intensification de la production et l'augmentation du nombre d'animaux par bâtiment rendent plus probable la contamination des troupeaux et la propagation de maladies. Cette combinaison est l'une des principales raisons conduisant à des pertes massives d'individus lorsqu'un troupeau est atteint par une maladie. De plus, lorsqu'une telle situation se produit, les conséquences économiques peuvent être désastreuses, car elle entraîne également une croissance moindre des animaux, ainsi que des coûts plus élevés liés au traitement et à la gestion des animaux malades (Les Éleveurs de porcs du Québec, 2011 ; Nantel-Fortier et al., 2019).

Le lavage et la désinfection des bâtiments d'élevage jouent un rôle primordial pour maintenir un statut sanitaire élevé, ce qui permet de contrôler les maladies, d'éviter les épidémies et de ralentir la dégradation de la santé des bâtiments (De Foy, 2005). Les Éleveurs de porcs du Québec ont publié le Guide de lavage, désinfection et séchage des porcheries (Les Éleveurs de porcs du Québec, 2011) pour aider les producteurs et productrices de porcs à mettre en place des pratiques reconnues pour maintenir un bon statut sanitaire dans leurs élevages. Selon ce guide, le processus de lavage est divisé en deux étapes :

- Étape 1 : élimination des déjections. Cette étape comprend : a) la préparation des salles, comme le vidage des dalots, le raclage, le dégagement des surfaces pour faciliter le lavage, le vidage du système d'alimentation ; b) le trempage des surfaces, c'est-à-dire l'arrosage des déjections pour humidifier toutes les surfaces, ainsi que le grattage, si nécessaire, du surplus des déjection ramollies par le trempage ; et c) le rinçage à haute pression.
- Étape 2 : lavage avec un détergent dégraissant. Cette étape comprend : a) l'application d'un détergent dégraissant sur toutes les surfaces (laisser agir de 20 à 30 minutes ou selon les recommandations du fabricant) ; b) le rinçage du détergent dégraissant avec un jet d'eau à haute pression ; et c) le rinçage final avec un jet d'eau à basse pression.

En respect aux aspects sanitaires, la propriété de rugosité est importante dans le choix des matériaux dans les porcheries, principalement pour les planchers. En fait, la rugosité est une mesure des fines irrégularités d'une surface qui varie selon les caractéristiques des matières premières et les paramètres de production adoptés (Tabarsa et al., 2011). Les sols rugueux sont plus abrasifs et augmentent le risque de blessure chez les animaux. Les matériaux à forte porosité ou rugosité peuvent également retenir l'humidité et les déjections, ce qui facilitera par la suite la croissance des bactéries et rendra le nettoyage plus difficile (MWPS-8, 1983). Les matériaux à surface lisse peuvent également causer des blessures car ils peuvent être glissants (Gorman et Turnbull, 2003;

MWPS-8, 1983). Cependant, les surfaces lisses s'égouttent et sèchent plus rapidement, ce qui facilite le nettoyage et la désinfection.

Le relief de la surface joue un rôle important dans la fixation des bactéries, car la porosité, les rainures et les irrégularités offrent une protection contre les forces d'élimination, telles que le processus de nettoyage, et offrent une plus grande surface disponible pour la colonisation des bactéries (Brajkovic et al., 2014). Les bactéries peuvent s'établir plus facilement dans ces endroits où elles sont à l'abri (Gharechahi et al., 2012). De plus, les propriétés physiques des matériaux tels que certains plastiques et métaux, tels que l'énergie libre de surface (c-à-d, l'interaction entre les forces de cohésion et les forces d'adhérence qui détermine si le mouillage se produit ou non), influencent et favorisent la fixation des bactéries lorsque la rugosité de surface est lisse (Brajkovic et al., 2014).

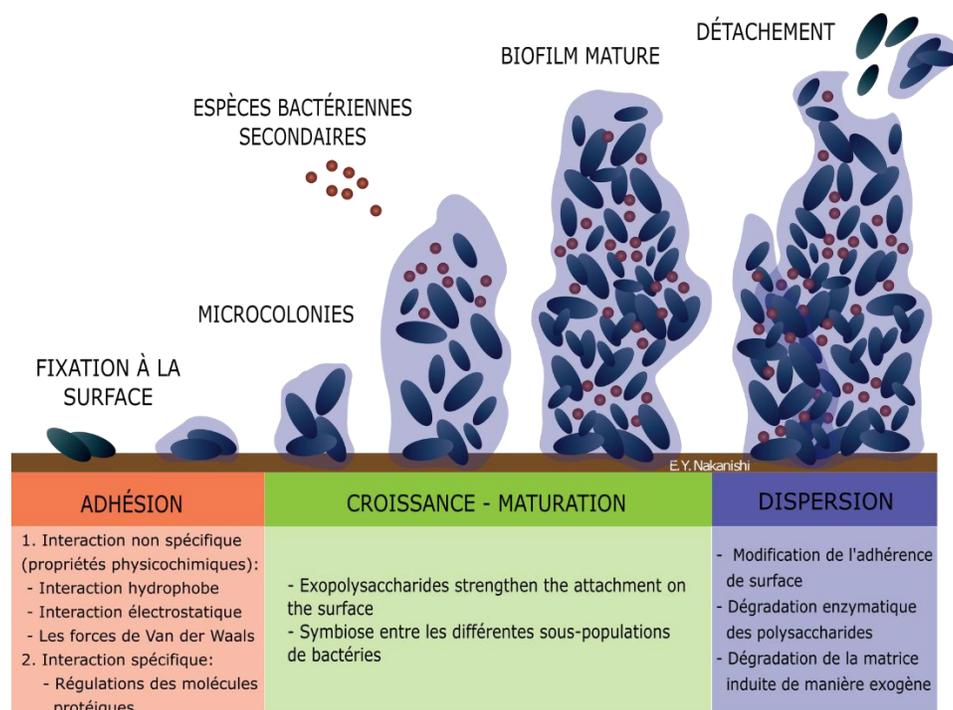
Les bactéries ont la capacité de résister et de se fixer sur les surfaces grâce à la formation d'une structure complexe et résiliente, appelée biofilm (De Foy, 2005). Les biofilms matures sont connus pour leur grande résistance aux agents désinfectants et assainissants, ainsi que pour leur tolérance aux antibiotiques, contrairement aux bactéries en suspension (Chen et al., 2021; Li et al., 2020). Cette formation rend difficile l'obtention de surfaces complètement exemptes de bactéries après le lavage. La présence de biofilm ou de résidus de lisier après le lavage constitue des indicateurs pour évaluer l'efficacité du processus de lavage.

La colonisation bactérienne sur une surface est un processus complexe qui dépend de l'interaction de trois facteurs principaux : (i) les caractéristiques de surface du matériau, telles que la rugosité spécifique, la porosité ou la topographie, la composition chimique et la mouillabilité ou l'énergie de surface (SFE) ; (ii) les propriétés bactériennes, tels que la charge de surface, l'énergie de surface, la forme et la taille, les appendices, les adhésines, etc., et (iii) les conditions environnementales, telles que les conditions d'écoulement autour de la surface (température, humidité, viscosité, hydrodynamique, pH, tension superficielle, force ionique et propriétés diélectriques) (Apedo et al., 2016; Boon & Wray, 1989; Brajkovic et al., 2014; Cheng et al., 2019; Katsikogianni & Missirlis, 2004; Mueller et al., 1992).

La Figure 1 montre un modèle schématique des phases et des facteurs conduisant à la formation de biofilms. Le processus de formation commence par l'attraction initiale des cellules bactériennes vers une surface biotique ou abiotique, suivie de l'attachement (Katsikogianni & Missirlis, 2004). L'attachement est rendu possible grâce à des interactions spécifiques entre les protéines des bactéries et la surface, ainsi qu'à des interactions non spécifiques dues aux propriétés physico-chimiques de la surface (Hathroubi, 2016). Ces interactions sont influencées par des forces telles que l'attraction de Van der Waals, la charge électrostatique de la surface, les interactions hydrophobes, la gravité, et la motion brownienne. Des gradients chimiques tels que la chimiotaxie et l'haptotaxie sont également impliqués dans ce processus (Brajkovic et al., 2014; Cheng et al., 2019; Katsikogianni & Missirlis, 2004; Busscher, 2008; Harimawan et al., 2011).

Une fois l'attachement réalisé, les bactéries se multiplient rapidement, formant des microcolonies qui produisent des exopolysaccharides renforçant l'attachement sur la surface (Harimawan et al., 2011; Gupta & Devi, 2020). Les

biofilms matures permettent le transport des nutriments, l'échange de signaux moléculaires et la communication entre les différentes sous-populations de bactéries (Harimawan et al., 2011).



**Figure 1. Modèle schématisé des phases et des facteurs impliqués dans la formation de biofilms (Nakanishi et al., 2021)**

La persistance du biofilm après le processus de lavage peut favoriser la survie de sous-populations bactériennes (Loza-Correa & Ramírez-Arcos, 2017). Ainsi des niveaux élevés de micro-organismes détectés sur les surfaces après le lavage et la désinfection peuvent être indicatifs de la présence d'un biofilm. Ainsi, une étude publiée en 2019 a considéré que des échantillons présentant des comptages supérieurs ou égaux à 2,00 log UFC/20 cm<sup>2</sup> après la désinfection provenaient potentiellement de surfaces supportant un biofilm (Maes et al., 2019).

De plus, tout résidu organique laissé sur les surfaces après le lavage peut constituer une niche favorable à la croissance rapide des micro-organismes (Jun et al., 2010). Il est donc important de bien nettoyer les surfaces et de vérifier l'absence de résidus organiques ou de micro-organismes persistants après la désinfection, afin de limiter le risque de contamination bactérienne.

Certains paramètres de lavage peuvent être optimisés pour augmenter l'efficacité de la suppression du biofilm. Par exemple, l'utilisation d'eau chaude dans une étude menée par Burfoot & Middleton (2009) a entraîné une réduction microbienne plus importante que l'utilisation d'eau froide sur des surfaces en acier inoxydable. Toutefois, lorsque de l'eau froide est utilisée, l'élimination microbienne peut être améliorée en augmentant le temps de nettoyage. Dans le cas de surfaces en matériaux à base de ciment, l'utilisation d'eau chaude peut réduire le temps de lavage d'environ 22 % lorsqu'aucun trempage n'est effectué (Hurnik, 2005).

De plus, l'utilisation d'une buse conventionnelle (c'est-à-dire une buse rotative) peut entraîner une réduction de 62 % de l'adénosine triphosphate (ATP) microbienne, tandis que l'utilisation d'autres types de buses (buse en Y, balai à eau et buse de 4 pouces) a entraîné une réduction de 16 à 34 % sur des surfaces en béton. La force d'impact de la buse conventionnelle peut également améliorer le nettoyage des surfaces rugueuses (Predicala & Alvarado, 2014).

Dans une étude menée par De Foy en 2005, différents matériaux ont été immergés dans du lisier de porc pendant 72 heures avant d'être placés individuellement dans des chambres en acier inoxydable pendant 24 heures, afin d'être échantillonnés par écouvillonnage et de déterminer la présence de bactéries. L'efficacité du nettoyage a été évaluée en prenant en compte la réduction des colonies bactériennes totales après un nettoyage standard. Les matériaux tels que l'acier galvanisé, le polyéthylène haute densité (HDPE), le HDPE sur contreplaqué, le plastisol et l'époxy lisse ont démontré leur capacité à éliminer complètement la colonisation bactérienne. Cependant, le risque sanitaire n'a pas été complètement éliminé pour les bétons de 30 et 60 MPa, le béton vibré pressé, la fonte, le polychlorure de vinyle (PVC), le contreplaqué et le béton recouvert d'une pellicule rugueuse d'époxy.

Bien que le nettoyage et la désinfection soient des processus essentiels dans les installations porcines, peu d'attention est accordée à la relation entre les paramètres influençant la destruction du biofilm et la facilité de nettoyage des matériaux de surface dans ces installations (Nakanishi et al., 2021).

## 1.2 L'EAU EN PRODUCTION PORCINE

En production porcine, l'eau est utilisée principalement pour abreuver les animaux et les refroidir ainsi que pour les lavages. Cependant, la quantité totale d'eau consommée est souvent méconnue et la répartition de son usage entre les différents postes d'un élevage est mal cernée (Massabie et al., 2014).

Selon les éleveurs de porcs du Québec (ÉPQ), pour des protocoles de lavage similaires, la quantité d'eau utilisée pour le lavage varie considérablement d'un producteur à l'autre en raison de plusieurs variables. Par exemple, Muhlbauer et al. (2010) ont évalué la quantité d'eau totale utilisée (pré-trempage + lavage à pression) pour deux méthodes de pré-trempage. Les résultats ont montré que la quantité d'eau utilisée a varié entre 90,8 et 98,4 litres/place/an pour un pré-trempage en continu, et entre 37,9 et 45,4 litres/place/an pour un pré-trempage intermittent.

Dans une étude de la Veterinary Infectious Diseases Organization (VIDO, 1998), un sondage auprès de producteurs a révélé que la consommation d'eau utilisée pour le lavage des bâtiments porcins varie entre 56 et 363 litres/place/an. Hurnik (2005) a étudié l'impact du pré-trempage, de l'utilisation de savon et de la température de l'eau utilisée lors du lavage à pression d'un élevage de type finisseur. Les résultats ont montré que l'utilisation d'eau chaude, l'utilisation de savon et l'étape de pré-trempage ont réduit le temps de lavage à

pression de 22 %, 8 % et 50 %, respectivement. Cependant, le volume d'eau utilisé et l'économie potentielle n'ont pas été évalués.

Massabie et al. (2014) ont estimé la consommation totale d'eau utilisée pour le lavage par truie présente naisseur-finsseur et par an à 2 300 litres. Selon les auteurs, trois facteurs influencent fortement la consommation d'eau des lavages de bâtiments porcins, à savoir le protocole appliqué, les équipements intérieurs (matériaux) et l'opérateur.

Les méthodes de lavage efficaces peuvent contribuer à réduire le gaspillage d'eau en production porcine. La réduction de la quantité d'eau utilisée apporte une réduction du volume de lisier à gérer, ce qui a un impact positif sur l'environnement et sur les coûts de production. Malheureusement, peu d'études ont été menées pour évaluer la quantité d'eau gaspillée en production porcine et pour développer des méthodes permettant de réaliser des économies d'eau (Predicala et Alvarado, 2014).

### 1.3 PROBLÉMATIQUE

La production porcine utilise une quantité importante d'eau, principalement pour l'abreuvement, mais aussi pour le lavage des bâtiments. Le lavage des installations est effectué après chaque phase de production et avant qu'un nouveau groupe d'animaux entre dans le bâtiment afin de conserver un statut sanitaire élevé. Les Éleveurs de porcs du Québec (EPQ) sont soucieux de l'impact de leur industrie sur l'environnement et cherchent à encadrer la pratique de lavage des bâtiments afin d'assurer la salubrité et la biosécurité dans les bâtiments tout en optimisant la quantité d'eau utilisée afin de réduire à la source les volumes d'eaux usées. Un guide de lavage, désinfection et séchage des porcheries a été publié en 2011 par la Fédération des producteurs de porcs du Québec. Cependant, les EPQ ont observé récemment des différences importantes entre les pratiques de lavage de chaque producteur concernant les paramètres suivants : temps de lavage, pression, débit, équipements, température de l'eau (chaude ou froide), bâtiments et matériaux à laver. Il y a donc un manque de connaissances des relations entre le niveau de salubrité du bâtiment et les paramètres de lavage précédents. Entre autres, les pratiques doivent être adaptées au type de matériau et des indicateurs simples et rapides doivent être développés pour évaluer la qualité du lavage en temps réel dans le bâtiment d'élevage.

## 2 HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

---

### 2.1 HYPOTHÈSES DE L'ÉTUDE

L'hypothèse principale avancée est que l'optimisation des méthodes de lavage permettra non seulement d'améliorer l'hygiène du bâtiment, mais également de réduire de manière significative la consommation d'eau nécessaire pour les opérations de nettoyage. En effet, des méthodes de lavage efficaces permettront de limiter le gaspillage d'eau et de réduire ainsi les coûts de production tout en minimisant l'impact environnemental. Cette hypothèse est particulièrement pertinente dans le contexte de l'industrie porcine, où la gestion efficace de l'eau est cruciale pour assurer des conditions sanitaires optimales tout en préservant les ressources naturelles.

### 2.2 OBJECTIF PRINCIPAL

Optimiser les paramètres des opérations de lavage afin d'assurer de bonnes conditions sanitaires en minimisant la quantité d'eau utilisée dans les bâtiments porcins.

### 2.3 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

Pour atteindre l'objectif principal, ce projet a été conçu avec les objectifs spécifiques suivants :

1. Développer un indicateur simple et efficace pour évaluer rapidement l'efficacité du lavage d'un bâtiment porcine ;
2. Déterminer et valider les paramètres de lavage optimaux tels que la pression d'impact, la vitesse et la température de l'eau pour différents types de matériaux tels que le béton, le plastique et les métaux, tout en assurant la salubrité et en minimisant la quantité d'eau utilisée ;
3. Évaluer les méthodes retenues à l'échelle commerciale en termes d'efficacité de nettoyage, de consommation d'eau et de temps de lavage ;
4. Analyser l'effet de l'efficacité de nettoyage sur des matériaux neufs et usés ;
5. Quantifier l'impact économique et environnemental de la mise en œuvre de ces méthodes optimisées de lavage.

### 2.4 PLAN DU RAPPORT

Dans l'ensemble, cette étude a été divisée en six grandes étapes, chaque étape est présentée dans un chapitre distinct qui détaille le contexte, les objectifs, la méthodologie, les résultats et les conclusions correspondant à chaque étape.

## 3 ÉTAPE 1 – DÉTERMINATION DES MATÉRIAUX ET LES MÉTHODES DE LAVAGE

### 3.1 INTRODUCTION

Dans les pays industrialisés, la production porcine comprend différents types d'installations et de modèles, généralement divisés selon la phase de vie de l'animal : (i) gestation ; (ii) mise-bas ; (iii) maternité; et (iv) les sites de croissance-finissage (Melmer et al. 2018; USDA, 2011). Chaque installation porcine nécessite différents types de matériaux pour la construction de la structure et des éléments intérieurs (caisses, partitions, mangeoires, etc.). Le choix du matériau utilisé à l'intérieur du bâtiment dépendra de la catégorie d'utilisation (par exemple, mur, sol, caisses), en particulier s'il est ou non en contact avec les animaux (Boon & Wray, 1989). Tout d'abord, le matériau doit avoir des propriétés physiques, mécaniques et thermiques répondant aux exigences standard pour son utilisation comme sol, séparateur, mur ou autres fins (Gorman & Turnbull, 1988). La surface doit être facilement nettoyable et ne pas être endommagée par les méthodes de nettoyage utilisées (AHDB, 2013).

Les recherches ont identifié plusieurs variables influençant l'efficacité du lavage, ainsi que la consommation d'eau (Burfoot & Middleton, 2009; Hurnik, 2005; Kymäläinen et al., 2008; Predicala & Alvarado, 2014). Parmi ces variables, il y a le type de buse, la température de l'eau, la pression du jet d'eau, la distance de lavage (c'est-à-dire la distance entre la buse et la surface), le trempage, le temps de lavage et la vitesse de passage de la buse. Toutefois, il est important de souligner que ces paramètres peuvent varier considérablement selon l'opérateur responsable de l'opération de lavage.

La présente étape visait donc à déterminer les paramètres de lavage et les types de matériaux qui sont souvent utilisés dans la production au Québec.

### 3.2 MÉTHODOLOGIE

#### 3.2.1 Revue de littérature

Au cours de la phase initiale du projet, une revue de la littérature a été entreprise dans le but de collecter des informations, de comparer et de sélectionner les paramètres de lavage et/ou les technologies disponibles pour améliorer l'hygiène dans les installations porcines, ainsi que les types de matériaux souvent présents dans ces bâtiments. Cette recherche, sélection et collecte de données ont été effectuées à l'aide d'articles évalués par des pairs, de livres pertinents et de rapports techniques disponibles sur les bases de données telles que Science Direct, Engineering Village, entre autres. Les mots clés tels quels, bâtiment de porc, porcherie, règlementation, lavage de porcherie, paramètre de lavage, matériaux de construction, ont été utilisés pour la recherche.

### 3.2.2 Enquête

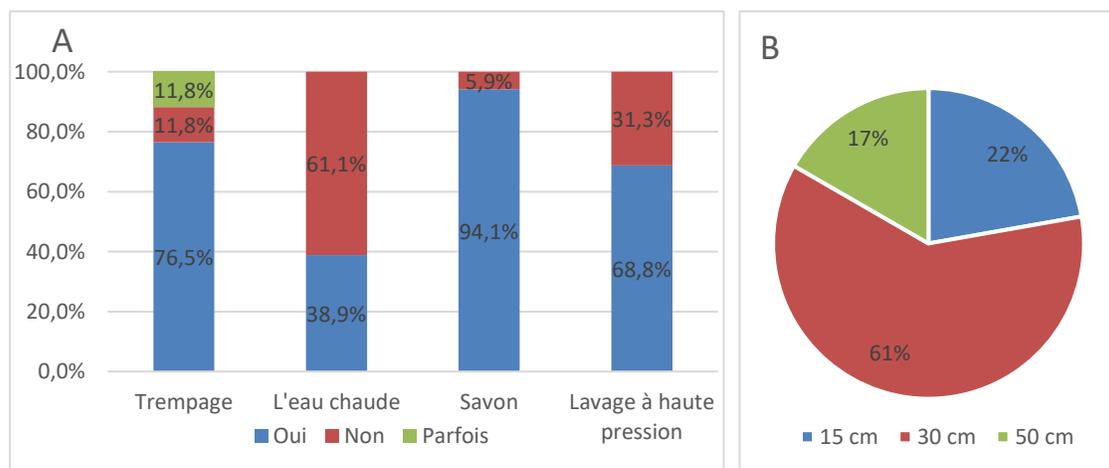
Pendant les visites à la ferme, lors de l'évènement Porcshow 2019 et par appels téléphoniques, 17 producteurs porcins ont été interviewés à l'aide d'un petit sondage anonyme. Les producteurs ont été interrogés sur les éléments suivants :

- Le type de production : naisseur, pouponnière et finisseur;
- Les méthodes de lavage : les pratiques et les paramètres utilisés conformément aux protocoles de lavage appliqués par les producteurs;
- Les caractéristiques du bâtiment : type de matériau utilisé pour le plancher, les murs, le plafond, les séparateurs, les mangeoires et les portes.

## 3.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 3.3.1 Sélection des paramètres de lavage

Selon l'enquête menée auprès des producteurs, la Figure 2 résume les caractéristiques du processus de lavage utilisé. En général, les producteurs effectuent un trempage, utilisent de l'eau froide et du savon, et effectuent le lavage à haute pression à une distance de 30 cm.



**Figure 2. Réponses des producteurs selon les méthodes de lavage**

Ci-dessous sont présentés certains paramètres relatifs aux procédures de lavage, tels qu'identifiés dans le cadre de cette étude :

- Type de buse : Deux types de buses sont particulièrement utilisés par les producteurs : (i) la buse rotative et (ii) la buse à jet plat ;
- Température de l'eau : Cette dernière varie considérablement chez les producteurs, allant du froid (température ambiante de l'eau, comprise entre 4-10 °C en hiver et environ 17 °C en été) au chaud (38-52 °C) ;

- III. Pression du jet d'eau : Celle-ci peut varier de 800 à 5000 psi, avec une moyenne d'environ 3000 psi ;
- IV. Distance de lavage : Celle-ci peut varier de 15 à 50 cm ;
- V. Temps de lavage : Pour une cage de 5x7 pi, le temps peut varier entre 9 et 15 min ;
- VI. Vitesse de passage de la buse : Elle varie selon la personne qui lave ;
- VII. Trempage : La majorité des producteurs effectuent cette étape. Il convient également de noter que certains producteurs ajoutent du savon à cette étape.

A partir de ces informations, quatre paramètres ont été choisis comme variables d'étude pour ce projet: le type de buse, la température de l'eau, la vitesse et la "pression d'impact". Ce dernier paramètre regroupe la pression et la distance, car ils ne sont pas complètement indépendants.

### 3.3.2 Sélection des matériaux

Selon les informations recueillies sur les matériaux, il était envisageable de créer deux catégories de bâtiments : (a) maternité/mise bas et (b) engraissement. Les différents matériaux présents dans chacune de ces catégories sont présentés dans le Tableau 1.

**Tableau 1. Type de matériaux retrouvés dans les bâtiments d'élevage porcin**

Emplacement	Matériaux	
	Maternité – mise bas	Engraissement
Plancher des parcs	Plastique en grille (porcelets)	Béton pressé vibré (lattes)
	Fonte (truies)	Béton coulé sur place
Séparateurs	Plastique (feuilles en vinyle)	Plastique (panneaux de HDPE <sup>1</sup> )
	Acier galvanisé tubulaire (structure)	Béton coulé sur place Jointes métalliques
Portes	Plastique (panneaux de HDPE)	Plastique (panneaux de HDPE)
	Cadre métallique (acier galvanisé)	Accessoires métalliques
Mangeoires	Acier inoxydable	Acier inoxydable
Corridors	Béton coulé sur place	Béton coulé sur place
Murs (recouvrement)	Plastique (feuilles de HDPE)	Plastique (feuilles de HDPE)
	Bois (contreplaqué – OSB <sup>2</sup> )	Bois (contreplaqué - OSB)
	Béton coulé sur place	Béton coulé sur place
Plafond	Plastique (PVC <sup>3</sup> )	Plastique (PVC)
	Bois (feuilles)	Bois (feuilles)

<sup>1</sup> HDPE : Polyéthylène à haute densité

<sup>2</sup> OSB : Oriented strand board

<sup>3</sup> PVC : Polychlorure de vinyle

Pour l'évaluation de l'efficacité sanitaire des paramètres de lavage, six matériaux différents ont été sélectionnés : (i) béton vibré-pressé (lattes à l'engraissement), (ii) béton coulé sur place (murs), (iii) feuilles d'acier inoxydable (mangeoires), (iv) fonte (caillebotis des truies), (v) panneaux de PVC (séparateurs d'enclos) et (vi) panneaux en HDPE (séparateurs d'enclos). Ces matériaux sont les plus couramment utilisés dans les bâtiments d'élevage porcin et sont toujours en contact avec les animaux. Étant donné que les matériaux en bois ne sont pas en contact direct avec les animaux, ils n'ont pas été retenus pour la réalisation de l'étude.

### 3.4 SYNTHÈSE

Quatre paramètres ont été choisis comme variables d'étude pour ce projet: le type de buse, la température de l'eau, la vitesse et la "pression d'impact" et six matériaux différents ont été sélectionnés béton vibré-pressé, béton coulé sur place, acier inoxydable, fonte, PVC et HDPE.

## 4 ÉTAPE 2 - DÉVELOPPEMENT D'UN INDICATEUR VISUEL SIMPLE ET EFFICACE POUR CONNAITRE RAPIDEMENT LE DEGRÉ DE SALUBRITÉ

### 4.1 INTRODUCTION

Dans l'industrie porcine, il est crucial de réduire le temps nécessaire pour détecter la contamination microbienne, afin de connaître rapidement l'état d'hygiène de l'environnement et prendre des mesures correctives. Cependant, les méthodes de culture microbiologiques traditionnelles, telles que les comptages sur plaques, peuvent prendre beaucoup de temps pour détecter la présence de bactérie, des biofilms ou des résidus sur les surfaces du bâtiment (Azeredo et al., 2017; González-Rivas et al., 2018). Par conséquent, il est important de disposer de méthodes d'évaluation en temps réel, faciles à utiliser et à un coût raisonnable.

Les méthodes directes reposent sur l'observation directe de la colonisation microbienne (González-Rivas et al., 2018). Elles comprennent des méthodes telles que la microbiologie (plaques de contact), la fluorescence (microscopes fluorescents à transmission de lumière et à épifluorescence, microscopie confocale à balayage laser et d'imagerie par fluorescence hyperspectrale), la chimie (test des réactions enzymatiques, p.ex., le Biofinder), et la microscopie (microscopie électronique à balayage (MEB), microscopie à force atomique et microscopie électronique à transmission).

Les méthodes indirectes sont basées sur le détachement des microorganismes de la surface avant de les dénombrer (González-Rivas et al., 2018), ainsi que sur la détection de l'activité métabolique et de la biomasse du biofilm. Elles comprennent des méthodes telles que les microbiologiques (comptages sur plaques traditionnels, p.ex., les géloses), le biochimique (détermination de l'ATP), les chimiques (techniques de coloration de la biomasse et dosages métaboliques), le physique (électrochimique et acoustique), et le moléculaire (PCR).

L'objectif de cette étape était de développer un indicateur simple et efficace permettant de qualifier rapidement le lavage et la salubrité d'un bâtiment, ainsi que d'établir un niveau de propreté considéré comme "acceptable".

### 4.2 MÉTHODOLOGIE

#### 4.2.1 Matériel

##### Production des plaques

Les matériaux sélectionnés pour évaluer l'efficacité sanitaire des paramètres de lavage sont résumés dans le Tableau 2 et illustrés dans la Figure 3. Des plaques d'environ 25 x 25 cm ont été produites à partir des matériaux

couramment utilisés dans le secteur porcin, à l'exception du béton coulé sur place qui a été préparé par l'équipe. L'épaisseur des plaques varie en fonction du type de matériau.

**Tableau 2. Description des matériaux**

Matériel	Caractéristiques des échantillons		Endroit d'utilisation	Fournisseur
Béton coulé sur place (BCP)* <sup>1</sup>	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	2,03	Murs	Préparé au laboratoire
	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	38,8		
	Dimensions (mm)	250 x 250 x 15		
Béton pressé vibré (BVP)	Dimensions (mm)	290 x 250 x 53 / 95	Lattes à l'engraissement	Patio Drummond
Plastique PVC* <sup>2</sup> (PVC)	Dimensions (mm)	250 x 250 x 35	Séparateurs d'enclos	Revêtements Agro inc
Plastique HPDE* <sup>3</sup> (HDPE)	Dimensions (mm)	250 x 250 x 2,5	Séparateurs d'enclos	Agriclé inc
Acier Inoxydable (AI)	Acier inoxydable de haute qualité grade 304		Mangeoires	Pro-Métal Plus Inc.
	Dimensions (mm)	250 x 250 x 0,8		
Fonte (F)	Dimensions (mm)	290 x 250 x 13-26	Caillebotis des truies	Les entreprises Martineau Inc

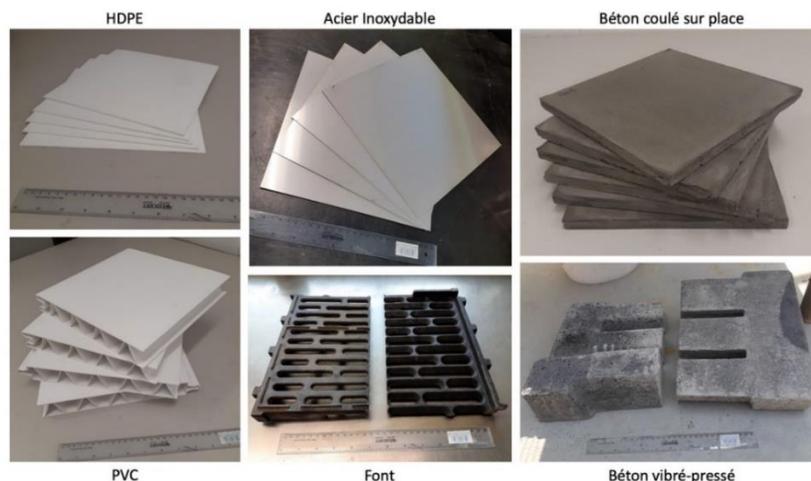
\*<sup>1</sup> Plusieurs formulations ont été évaluées. Des essais standard de compression ont été effectués pour sélectionner une formulation produisant un béton représentatif au béton coulé sur place aux bâtiments. La formulation suivante a été retenue : ratio eau/ciment = 0,4; teneur de superplastifiant en poudre = 1,25 %; teneur en fumé de silicium = 20 %; ratio ciment : sable = 1 : 2. La résistance moyenne à la compression obtenue avec cette formulation a été de 38,8 MPa.

\*<sup>2</sup> PVC : polychlorure de vinyle.

\*<sup>3</sup> HDPE : polyéthylène de haute densité

Premièrement, les plaques ont été stérilisées pour éliminer tout type de contaminant (engrais ou micro-organismes), en suivant l'un des deux protocoles en fonction du type de matériau :

- Autoclave : la plaque a été lavée avec un détergent dégraissant, puis autoclavée pendant 30 minutes à 121 °C et 121 psi ;
- Lumière UV : la plaque a été lavée avec un détergent dégraissant, puis immergée dans de l'eau de Javel à 1 % pendant 2 minutes suffisamment pour couvrir la plaque, puis bien rincée à l'eau distillée. Ensuite, elle a été laissée à sécher dans une hotte biologique pendant 1h30, puis exposée à un rayonnement ultraviolet pendant 1h30.



**Figure 3. Images des plaques des matériaux utilisés**

## Lisier de porc

Pour évaluer les méthodes permettant l'analyse en temps réel de l'efficacité du lavage dans une porcherie, du lisier de porc a été utilisé en huit dilutions : 1/10, 1/80, 1/640, 1/1280, 1/2560, 1/5120, 1/10240 et 1/40960. Le lisier a été prélevé au Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD). Pour réaliser les dilutions, de l'eau peptone a été utilisée. Les dilutions ont été homogénéisées dans un sac stomacher (marque Whirl-pak) afin de séparer la partie solide du lisier.

## Caractérisation des plaques et du lisier

Étant donné que la rugosité de la surface des matériaux peut avoir un impact sur l'adhérence des bactéries, la formation de biofilms et le processus de nettoyage (Nakanishi et al., 2021), la rugosité de chaque matériau a été mesurée à l'aide d'un profilomètre optique Bruker, modèle Contout GT et du logiciel Vision 64. En outre, les caractéristiques physico-chimiques du lisier de porc utilisé, notamment la densité, la teneur en azote, en phosphore, en calcium, en magnésium, en sodium et en potassium, ainsi que la teneur en matière sèche, en cendres et en matière organique ont été mesurées.

### 4.2.2 Méthodes pour l'analyse de l'efficacité de lavage

Quatre méthodes différentes pour évaluer l'efficacité de lavage dans une porcherie ont été testées : 1) la comptage des colonies bactériennes sur des plaques de culture, 2) la mesure de la bioluminescence de l'adénosine triphosphate (ATP), 3) la réaction enzymatique utilisant le Biofinder, 4) la coloration du biofilm par le Crystal violet, et 5) la réaction métabolique utilisant le Alamar Blue. Chaque méthode a été testée selon différentes approches.

## Comptage sur plaques

Pour chaque dilution du lisier, une analyse microbiologique a été effectuée à l'aide de plaques PetriFilm de l'entreprise 3M. Les bactéries analysées étaient *Escherichia coli* et les coliformes totaux. Conformément aux instructions du fabricant, 1 ml du lisier a été ajouté au PetriFilm, puis incubé à  $35 \pm 1$  °C pendant 24 à 48 heures.

## Bioluminescence l'adénosine triphosphate (ATP)

La technique de la bioluminescence de l'ATP a été choisie pour évaluer en temps réel le degré de salubrité en raison de sa simplicité et de sa capacité à fournir des résultats disponibles en quelques secondes, permettant ainsi de vérifier la présence ou l'absence de tous les contaminants biologiques (González-Rivas et al., 2018; Ruiz-Llacsahuanga et al., 2021; Tršan et al., 2020). L'analyse de la bioluminescence de l'ATP a été réalisée à l'aide d'un écouvillon pré-humidifié (Test Hygiena UltraSnap Surface ATP) et d'un luminomètre Hygiena EnSURE, selon les instructions du fabricant. La valeur en ATP du lisier dilué a été déterminée de deux façons : i) directement sur l'écouvillon, pour cette analyse, 10 µL de la solution de lisier en différentes dilutions ont été appliqués directement sur le coton de l'écouvillon (Omidbakhsh et al., 2014); ii) en appliquant sur des plaques stériles, pour cette analyse, 1 mL du lisier dilué (quatre dilutions) a été appliqué sur la plaque couvrant une surface de 100 cm<sup>2</sup> par dilution (Figure 4). Les plaques ont été séchées dans une hotte biologique pendant environ 1h - 1h30 avant d'être soumises à l'analyse d'ATP. De cette manière, il a été possible de déterminer une valeur ATP (en RLU) pour différents matériaux pour une même concentration de contamination.



**Figure 4.** Application de 1 ml de lisier sur la plaque couvrant une aire de 100 cm<sup>2</sup>

## Réaction enzymatique - Biofinder

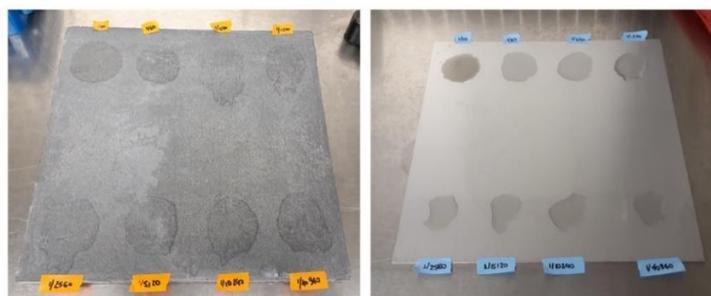
Pour évaluer l'état d'hygiène dans l'industrie agroalimentaire et prendre rapidement des mesures correctives, le produit Biofinder (iTram Higiene, Vic, Barcelone, Espagne) a été développé. Biofinder détecte visuellement la présence de biofilms grâce à des réactions enzymatiques quelques secondes ou minutes après l'application. Le produit réagit avec la catalase, une enzyme présente dans presque toutes les cellules vivantes et universellement trouvée dans les biofilms. La présence de biofilms entraîne la formation d'une couche de nombreuses petites bulles, comme illustré sur la Figure 5. Biofinder peut être utilisé pour vérifier les points d'inspection critiques juste

avant la désinfection et pour valider les bonnes procédures d'hygiène sur les sites de production (González-Rivas et al., 2018).



**Figure 5. Réaction Biofinder**

Pour évaluer en temps réel le niveau d'hygiène, le Biofinder a été testé sur différentes surfaces en utilisant du lisier de porc dilué en 8 dilutions différentes. Pour ce faire, 500  $\mu$ l de lisier de porc dilué ont été appliqués sur six plaques stérilisées, comme illustré sur la Figure 6. Le test a été réalisé sous une hotte biologique. Après séchage du lisier (environ 1h - 1h30), 500  $\mu$ l de Biofinder ont été appliqués sur chaque dilution, ainsi que sur la surface sans solution de lisier (contrôle négatif).



**Figure 6. Plaques salies avec lisier de porc dilué pour le test avec Biofinder**

Pour évaluer la faisabilité d'utiliser ce produit en environnement réel dans une exploitation agricole (porcherie), le Biofinder a été testé dans une porcherie expérimentale du Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD). La chambre était équipée de planchers en béton, de séparateurs en plastique, d'une mangeoire et d'un abreuvoir en métal, ainsi qu'une balance également en métal. L'essai dans la porcherie a été réalisé avant et après le nettoyage. Le test a consisté en l'application directe du Biofinder sur la surface des matériaux à tester, qu'ils soient sales ou propres. Les tests ont été effectués sur différents matériaux (plastique, métal et béton) à différents endroits de la porcherie (plancher, séparateurs et parties extérieures des mangeoires).

## Coloration du biofilm - Crystal violet

Le cristal violet (CV) est un colorant basique qui se lie aux molécules chargées négativement présentes à la fois à la surface des bactéries et à la matrice extracellulaire du biofilm (Alonso et al., 2017). Cette technique est

largement utilisée pour évaluer et comparer la formation de biofilm par différentes bactéries ou dans différentes conditions (Bogan et al., 2020; Kragh et al., 2019; Ommen et al., 2017).

Dans cette étude, des plaques en béton coulé sur place ont été utilisées. Les plaques ont été contaminées en utilisant la méthode de badigeonnage. Pour cela, 50 ml de lisier ont été versés sur la surface du matériau, puis étalés manuellement de manière à bien couvrir toute la surface (Kymäläinen et al., 2008). Cette procédure a été répétée deux fois par jour pendant trois jours, puis les plaques ont été couvertes avec un plastique pour éviter le dessèchement. Un ruban a été appliqué au milieu de chaque plaque pour empêcher tout contact avec le lisier. Après la quatrième journée, les plaques ont été rincées et sécher avant d'être analysées.

Le Crystal violet (0,01 %) dilué dans de l'eau stérile a été utilisé pour la coloration directe des plaques, afin d'évaluer qualitativement l'adsorption et la croissance du biofilm (Rong et al., 2020). Environ 0,7 mL de Crystal violet a été appliqué en différents endroits sur la plaque, notamment dans la région d'intersection entre la surface contaminée et la surface protégée par le ruban (Figure 7). Une plaque propre a été utilisée comme témoin négatif. Ensuite, les plaques ont été laissées sécher pendant 15 minutes, puis ont été rincées par immersion dans de l'eau. L'évaluation visuelle a été réalisée 12 et 36 heures après le rinçage.



**Figure 7.** Souillage des plaques en béton coulé sur place pour le test de Crystal violet. La lettre A indique la zone où le ruban a été utilisé.

## Réaction métabolique - Alamar blue

Le "Alamar blue", également connu sous le nom de résazurine, est une méthode permettant d'évaluer et de quantifier la viabilité microbienne dans les biofilms. La résazurine est réduite en résorufine fluorescente colorée par l'action mitochondriale. Ainsi, le colorant bleu non fluorescent devient rose hautement fluorescent lorsqu'il est réduit (Alonso et al., 2017; González-Rivas et al., 2018). Cette technique est généralement utilisée dans des plaques de microtitration. Toutefois, deux tests expérimentaux ont été évalués pour une possible utilisation dans une ferme :

- Test dans un tube : pour ce test, 100 µl d'Alamar blue (1 %) ont été ajoutés à un tube contenant 9 ml de lisier dilué (dilution de 1/80) et un autre contenant uniquement de l'eau peptone 1 % stérilisée (9 ml). Ce test a été basé sur l'analyse de la qualité microbienne du lait (Madushan et al., 2021).

- Évaluation dans une boîte de Pétri : pour ce test, des boîtes de Pétri ont été préparées avec deux concentrations d'Alamar blue, soit 1 et 2 ml d'Alamar blue ajouté à 100 ml d'agar. Dans les boîtes de Pétri contenant de l'Alamar blue, 60 µl de lisier dilué (1/80) ont été ajoutés à chaque concentration. Pour le témoin négatif, 60 µl d'eau peptone stérilisée ont été utilisés.

Ces deux tests ont été effectués dans une hotte biologique et sont restés dans cette hotte pendant toute la durée de la réaction jusqu'à la lecture.

## 4.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 4.3.1 Caractérisation des matériaux et du lisier

#### Rugosité de surface

La rugosité de la surface a été évaluée pour chaque matériau. La rugosité de surface a un impact significatif sur la fixation bactérienne et la formation subséquente du biofilm dans les installations porcines. Les matériaux avec une haute rugosité peuvent retenir l'humidité et les déchets, favorisant ainsi la croissance bactérienne (Nakanishi et al., 2021). Les piqûres, les rainures et les irrégularités des surfaces plus rugueuses offrent une plus grande surface globale pour la colonisation bactérienne et peuvent protéger les bactéries des processus de nettoyage (Brajkovic et al., 2014; Katsikogianni & Missirlis, 2004).

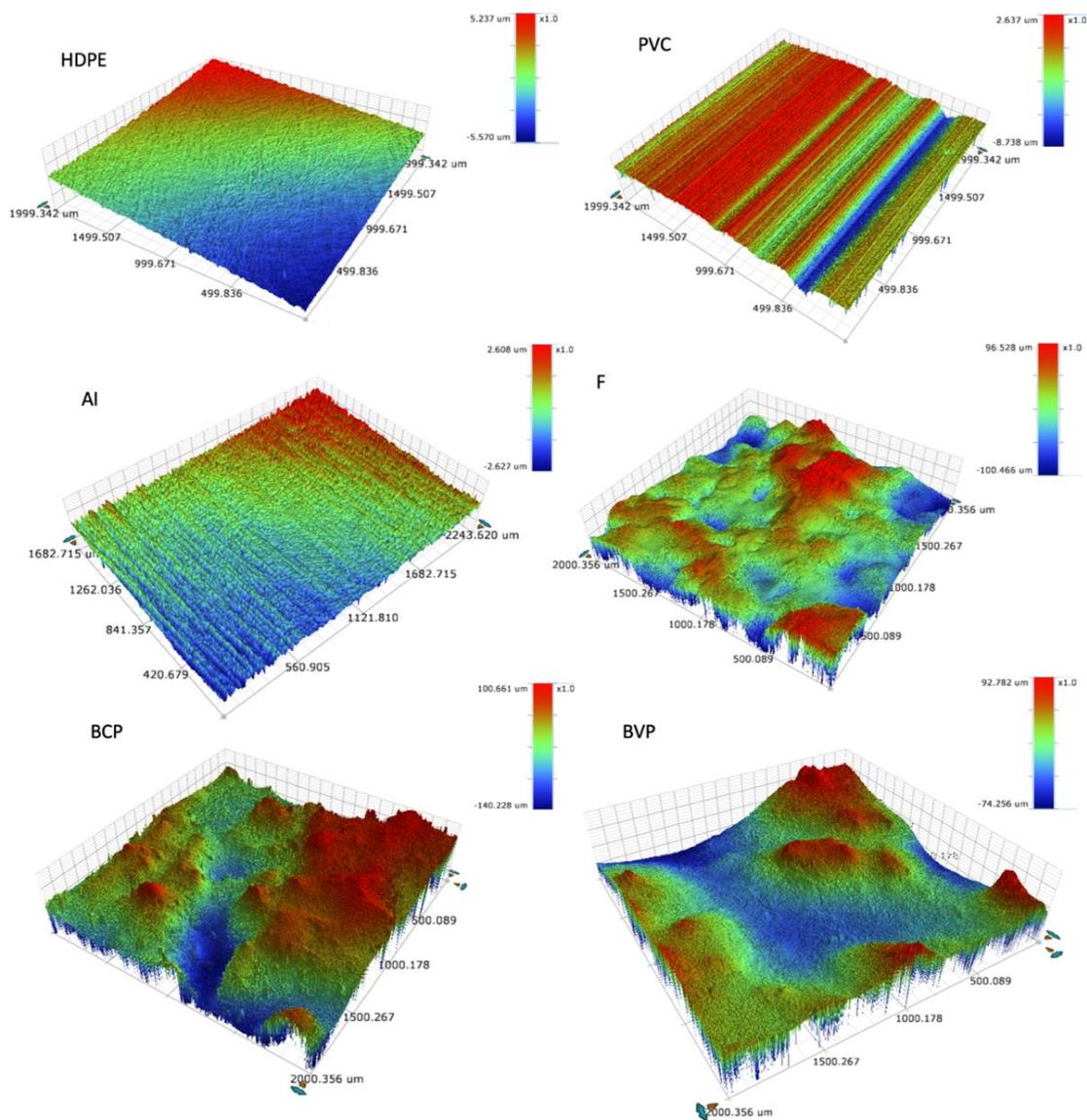
En termes de moyenne arithmétique de la rugosité tridimensionnelle ( $S_a$ ), le HDPE présente la rugosité de surface la plus faible (0,15 µm), suivie de l'acier inoxydable (0,18 µm), du PVC (0,48 µm), de la fonte (22,47 µm), du béton coulé sur place (BCP) (25,28 µm) et du béton vibré-pressé (BVP) (37 µm) (Tableau 3).

**Tableau 3. Caractérisation de la rugosité**

Matériel	$S_a$ (µm)	$S_p$ (µm)	$S_q$ (µm)	$S_v$ (µm)	$S_z$ (µm)
HDPE	0,155 (0,02)	6,399 (3,55)	0,218 (0,01)	-5,016 (3,49)	11,415 (6,73)
PVC	0,482 (0,06)	2,259 (0,24)	0,643 (0,07)	-10,748 (5,92)	13,007 (5,85)
Al	0,180 (0,02)	1,824 (0,44)	0,248 (0,03)	-3,144 (1,09)	4,968 (1,39)
F	22,472 (0,38)	82,369 (14,87)	28,650 (0,64)	-105,087 (13,96)	187,456 (14,16)
BCP	25,279 (9,47)	102,433 (19,74)	31,482 (11,39)	-98,701 (38,97)	201,134 (39,69)
BVP	36,999 (28,52)	126,445 (86,21)	45,441 (34,58)	-125,540 (77,18)	251,985 (155,71)

\* $S_a$  (moyenne arithmétique de la hauteur absolue);  $S_p$  (hauteur maximale du pic de surface);  $S_q$  (valeur quadratique moyenne de la surface);  $S_v$  (hauteur de fosse maximale de la surface);  $S_z$  (hauteur maximale de la surface).

La Figure 8 présente les représentations en 3D des surfaces des différents matériaux étudiés. Les matériaux à base de ciment présentent généralement une structure complexe et une rugosité de surface élevée, ce qui les rend plus difficiles à nettoyer et à maintenir dans des conditions sanitaires adéquates.



**Figure 8. Représentations en 3D des surfaces des matériaux**

Cependant, il convient de retenir que différents profils de rugosité peuvent afficher une même valeur de rugosité, mais cela ne garantit pas une facilité à nettoyer équivalente. En effet, des caractéristiques telles que l'emplacement et l'espacement entre les pics et les creux peuvent varier même si la valeur de rugosité est identique, comme cela est illustré à la Figure 9 (Santos & Júlio, 2013).

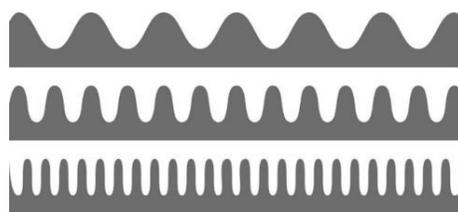


Figure 9. Différents profils de rugosité avec la même valeur moyenne de rugosité (Santos & Júlio, 2013).

## CARACTÉRISATION DU LISIER

Le lisier de porc est un mélange liquide complexe contenant de nombreuses substances organiques et inorganiques particulières, en suspension et dissoutes, y compris des nutriments et des contaminants (Aust et al., 2009). Dans le cadre de ce projet, le lisier utilisé avait un pH de 7,41, une densité de 1,03 g/cm<sup>3</sup>, une teneur en azote (azote Kjeldahl total) de 8 606 mg/kg, ainsi que des teneurs en matière sèche, en cendres, en matière organique et en carbone de 10,8 %, 23,9 %, 71,1 % et 38,0 %, respectivement (voir Tableau 4). La composition du lisier varie selon plusieurs facteurs, tels que le régime alimentaire (Ferrer et al., 2020 ; Hansen et al., 2007) et l'âge et la catégorie des animaux (Antezana et al., 2016).

Tableau 4. Caractérisation du lisier

Échantil.	pH	Densité g/cm <sup>3</sup>	N Total -----mg/kg-----	N-NH4	Mat. Sèche	Cendres	M.O	C.O (1.724)	C.O (2.00)	C/N (1.724)	C/N (2.00)
Ch2	7,51	1,04	8613	4967	10,9	24,1	76,0	44,0	38,0	5,59	4,82
Ch3	7,30	1,02	8600	5139	10,8	23,8	76,2	44,2	38,1	5,53	4,76
Moyenne	7,41	1,03	8606,5	5053	10,85	23,95	76,1	44,1	38,05	5,56	4,79
Échantil.	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na
-----mg/kg-----											
Ch2	2090	4701	2526	1697	74,1	5,93	82,7	168	47,1	169	1455
Ch3	2035	4672	2054	1674	54,2	2,55	82,8	158	45,8	169	1443
Moyenne	2062,5	4686,5	2290	1685,5	64,15	4,24	82,75	163	46,45	169	1449

La caractérisation inorganique de ce lisier a révélé des valeurs élevées en phosphate, potassium, calcium, magnésium, cuivre, fer, zinc et sodium, respectivement 2 036; 4 686; 2 290; 1 685; 82,75; 163; 169 et 1 449 mg/kg. Ces valeurs sont relativement supérieures à celles rapportées dans la littérature, mais il est important de noter que la composition du lisier peut varier en fonction de différents facteurs nutritionnels telle la ration alimentaire des animaux (Antezana et al., 2016 ; Sommer et al., 2015). Les teneurs élevées en cuivre et en zinc s'expliquent par l'ajout de ces micronutriments dans l'alimentation des animaux comme promoteurs de croissance (Antezana et al., 2016 ; Moral et al., 2008).

### 4.3.2 Méthodes pour l'analyse en temps réel

#### Comptage sur plaques

Le Tableau 5 présente le décompte d'E. coli et de coliformes totaux selon les dilutions de lisier, exprimé en log CFU/ml.

**Tableau 5. Décomptage de bactéries selon les dilutions de lisier en log CFU/ml**

Dilution de lisier		<i>E. Coli</i>	Coliformes totaux
1/10	$1 \times 10^{-1}$	2,5	3,9
1/80	$1.25 \times 10^{-2}$	1,0	2,7
1/640	$1,56 \times 10^{-3}$	0,0	1,6
1/1280	$7,81 \times 10^{-4}$	0,0	1,3
1/2560	$3,91 \times 10^{-4}$	0,0	1,1
1/5120	$1,95 \times 10^{-4}$	0,0	0,8
1/10240	$9,77 \times 10^{-5}$	0,0	0,5
1/40960	$2,44 \times 10^{-5}$	0,0	0,0

#### Bioluminescence l'adénosine triphosphate (ATP)

Pour l'application de cette méthode à la ferme, il est nécessaire de déterminer un niveau "acceptable" de propreté en RLU pour le secteur agricole, en particulier pour le nettoyage des bâtiments porcins, en tenant compte des différents types de surfaces souillées par les animaux. C'est pourquoi une étude a été menée pour relier le niveau d'ATP à un niveau de souillure, pour chaque matériau utilisé dans ce projet. Ainsi, du lisier à différentes dilutions (1/10, 1/80, 1/640, 1/1280, 1/2560, 1/5120, 1/10240 et 1/40960) a été utilisé pour souiller de manière standardisée les plaques, afin de mesurer ensuite leur niveau en ATP.

Selon Predicala et al. (2015), l'échelle de RLU permettant d'évaluer l'efficacité du nettoyage des remorques pour le transport de porcs peut être considérée comme "réussie" lorsque la valeur est inférieure à 430 RLU, "critique" lorsque la valeur se situe entre 431 et 850 RLU, puis "échec" lorsque la valeur dépasse 851. Dans l'industrie laitière, Fysun et al. (2019) considèrent qu'une valeur inférieure à 500 RLU pour les tuyaux en PTFE et en acier inoxydable indique une surface propre, tandis qu'une valeur entre 500 et 1000 RLU est considérée comme suspecte et une valeur supérieure à 1000 RLU comme inadéquate en termes d'hygiène.

En considérant les niveaux de propreté suggérés par Predicala et al. (2015) et Fysun et al. (2019), les dilutions du lisier à un ratio de 1/2560 et moins indiquaient une surface propre. Cette dilution représente moins de 1,1 log CFU/ml lors du décompte des bactéries en coliformes totaux (Tableau 5). De cette façon, il a été possible d'établir, pour une même concentration de bactéries, différentes valeurs d'ATP considérant chaque type de matériau. Ainsi, les valeurs de 463, 443, 151, 226, 521 et 505 RLU ont été déterminées comme seuils de propreté acceptable, respectivement pour le HDPE, le PVC, le béton coulé sur place, le béton vibré pressé, l'acier inoxydable et la fonte (Figure 10).

Il est à noter que les matériaux à base de ciment présentent les valeurs RLU les plus basses. Cela peut s'expliquer par le fait que leurs surfaces sont plus rugueuses, ce qui rend le prélèvement de bactéries plus difficile lors de l'écouvillonnage. Les bactéries peuvent se cacher dans les piqûres, les rainures et les irrégularités des surfaces, des zones que l'écouvillon n'est pas capable d'atteindre et d'enlever.

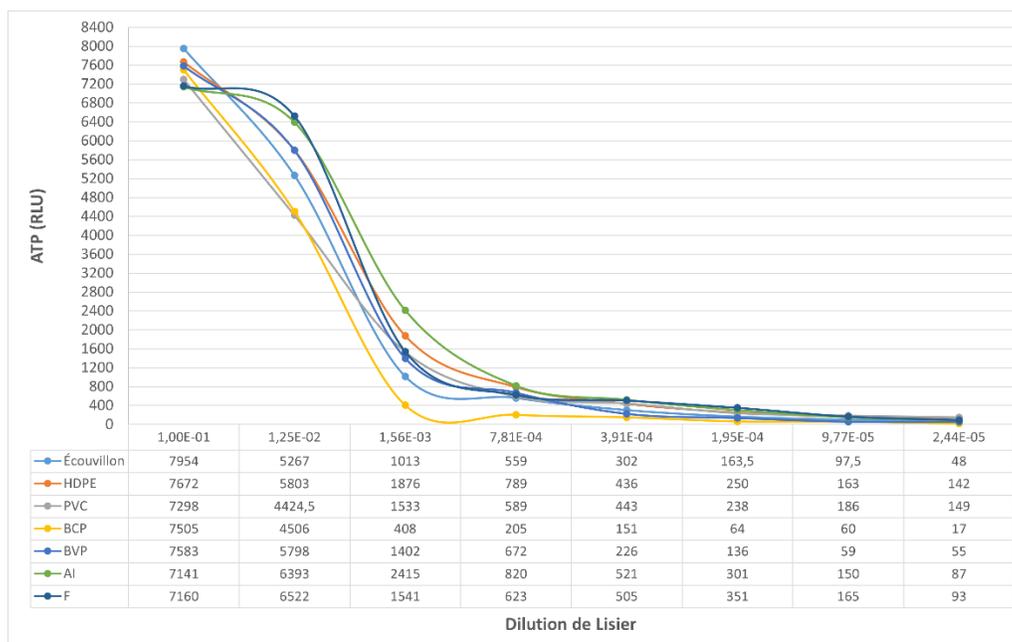
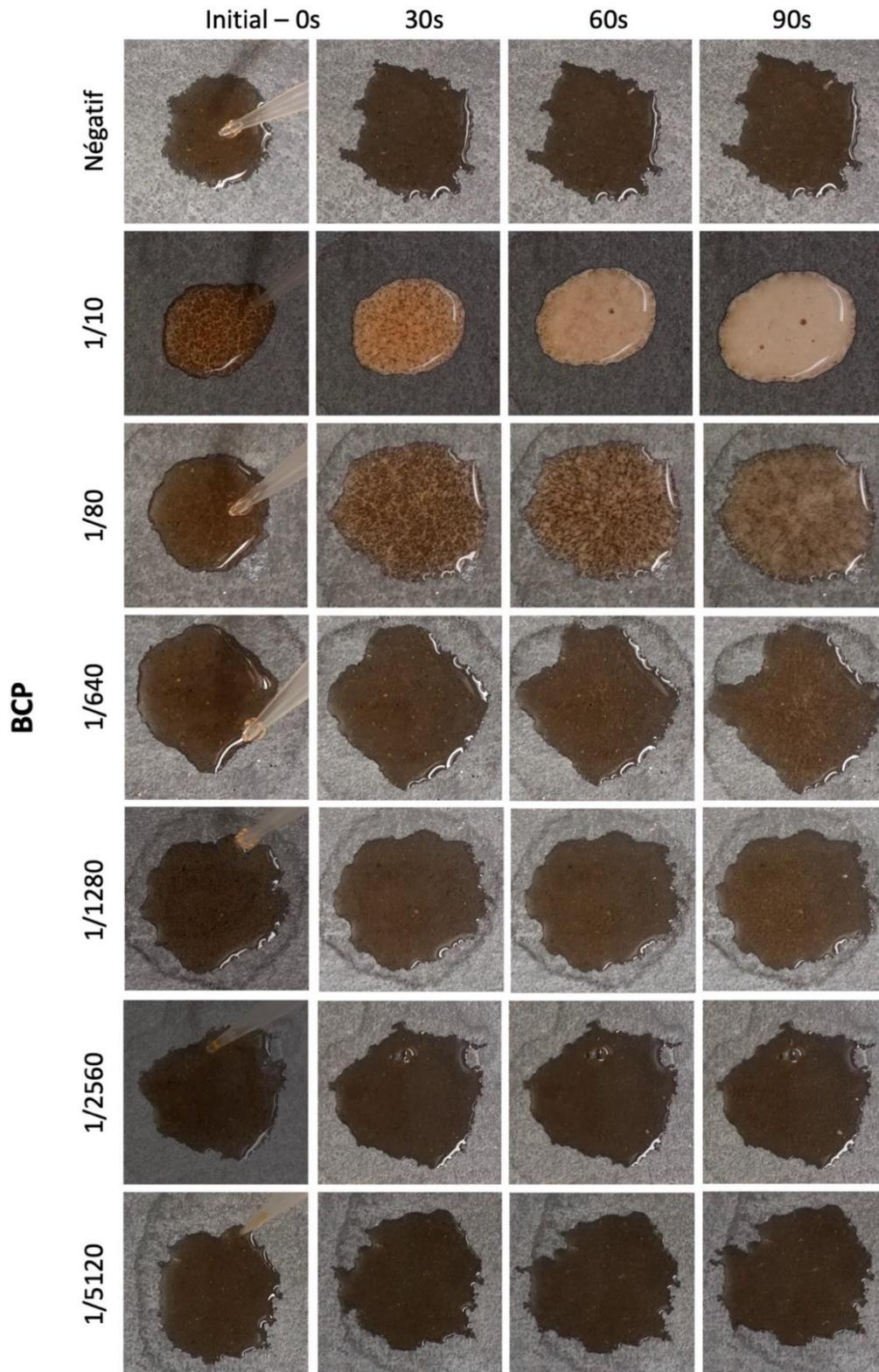


Figure 10. Lecture d'ATP sur l'écouvillon et les plaques du lisier en différentes dilutions

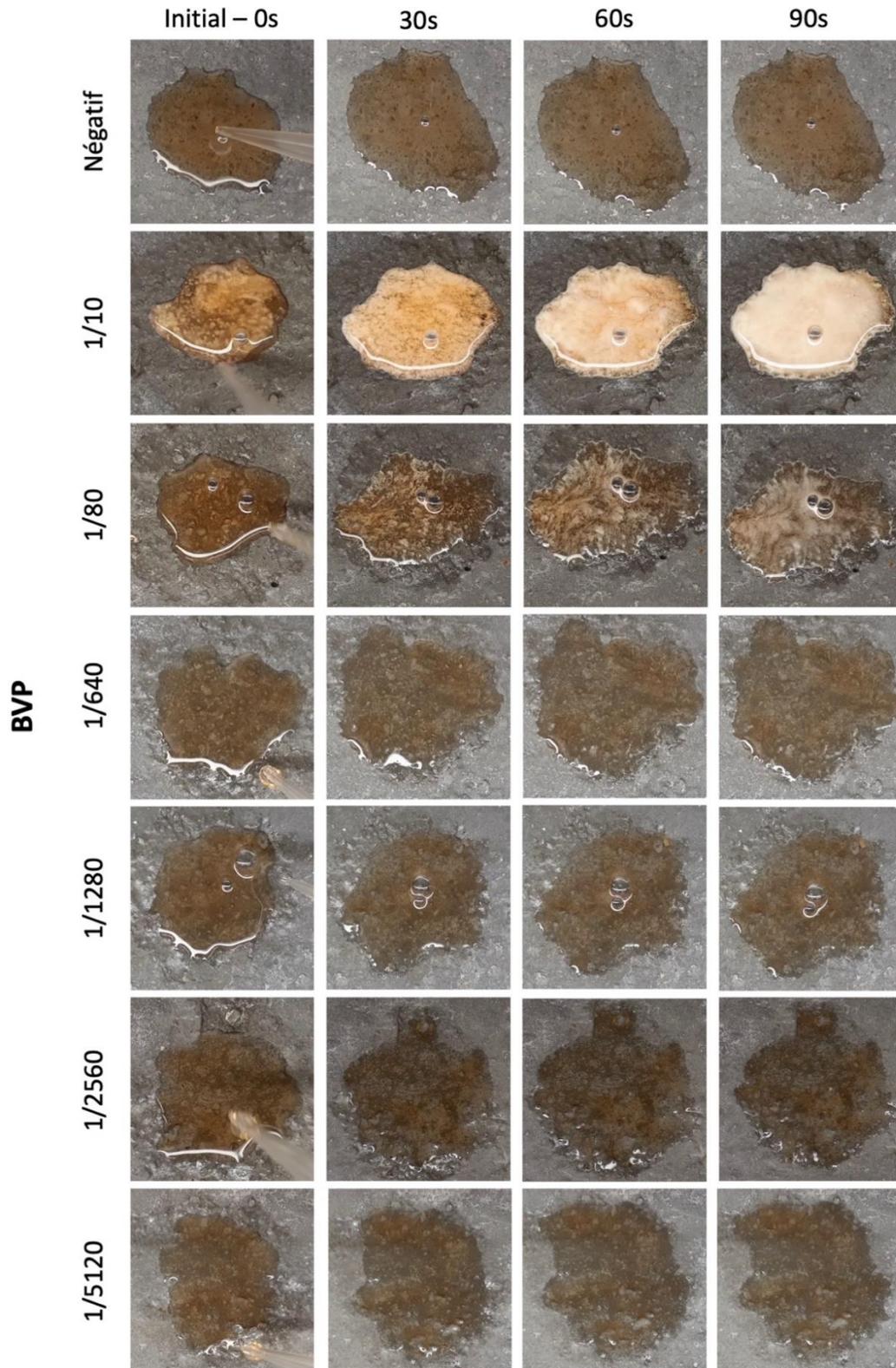
## Réaction enzymatique - Biofinder

Les Figures 11 à 16 présentent les réactions obtenues avec le Biofinder pour chaque type de matériau en fonction de la dilution du lisier. Les enregistrements ont été réalisés à 0 s (initial), 30 s, 60 s et 90 s. En général, le contrôle négatif (sans lisier) n'a pas présenté de réaction, c'est-à-dire qu'il n'y a pas eu de formation de bulles visible. Cependant, lorsque les tests ont été effectués avec une dilution de 1/10, la réaction a été presque instantanée au moment de l'application du Biofinder, en raison de la concentration élevée de bactéries et de composés organiques, ce qui a entraîné une réaction très rapide.

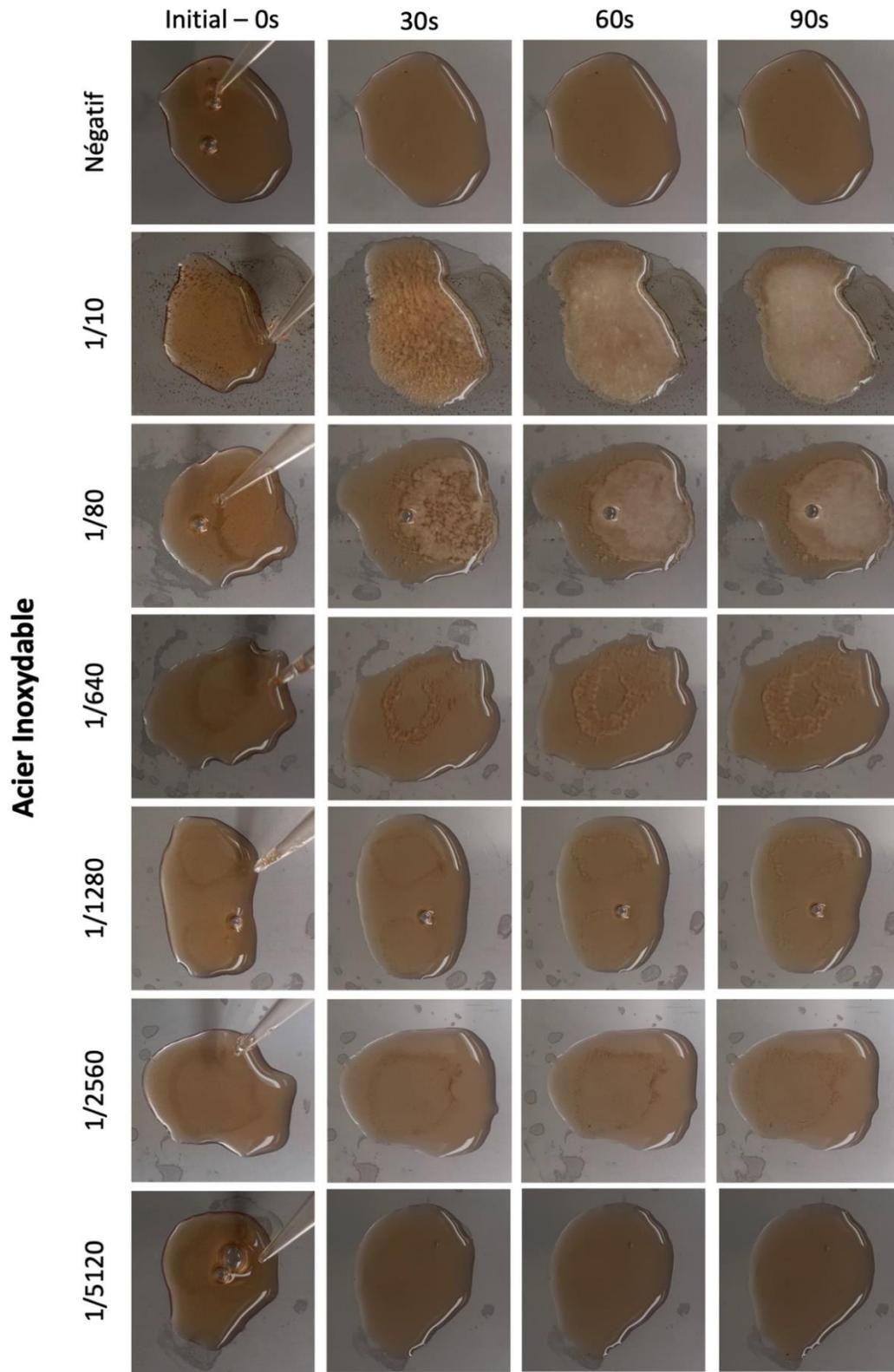
De plus, des réactions (formation de bulles) ont été observées jusqu'à une dilution de 1/640, bien que faibles à 90 s. Dans certains matériaux, des traces de bulles ont été observées avec une dilution de 1/1280. Après une dilution de 1/2560, il n'y avait plus de formation de bulles dans les premières 90 s. Il convient de rappeler que cette réaction se poursuit, ce qui signifie que la formation de bulles peut se produire, c'est pourquoi une limite de 90 s a été établie. Ces résultats sont cohérents avec les limites de propreté obtenues par l'analyse d'ATP.



**Figure 11. Réaction du Biofinder sur le béton coulé sur place au lisier en différentes dilutions**



**Figure 12. Réaction du Biofinder sur le béton vibré-pressé au lisier en différentes dilutions**



**Figure 13. Réaction du Biofinder sur l'acier inoxydable au lisier en différentes dilutions**

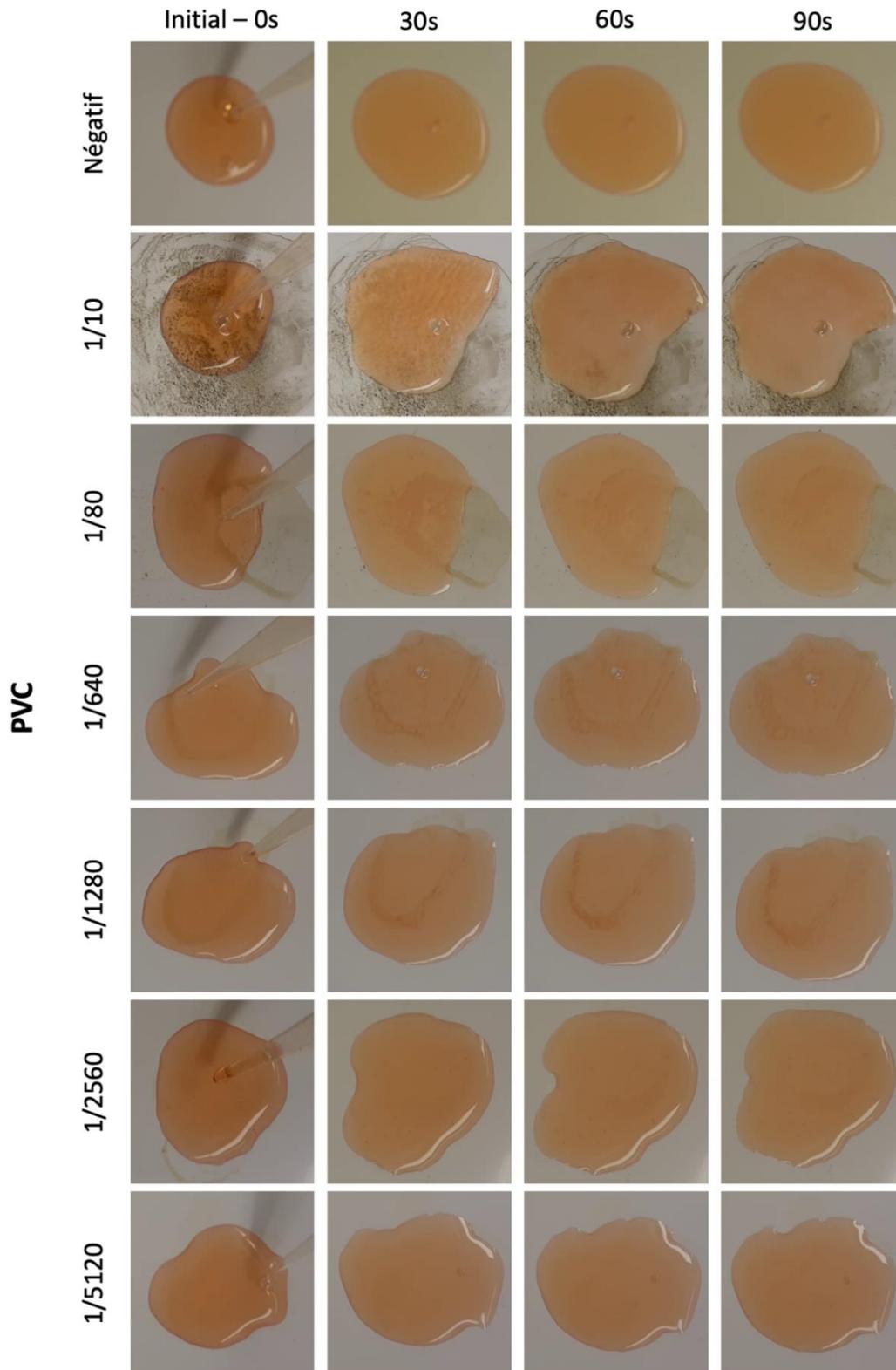
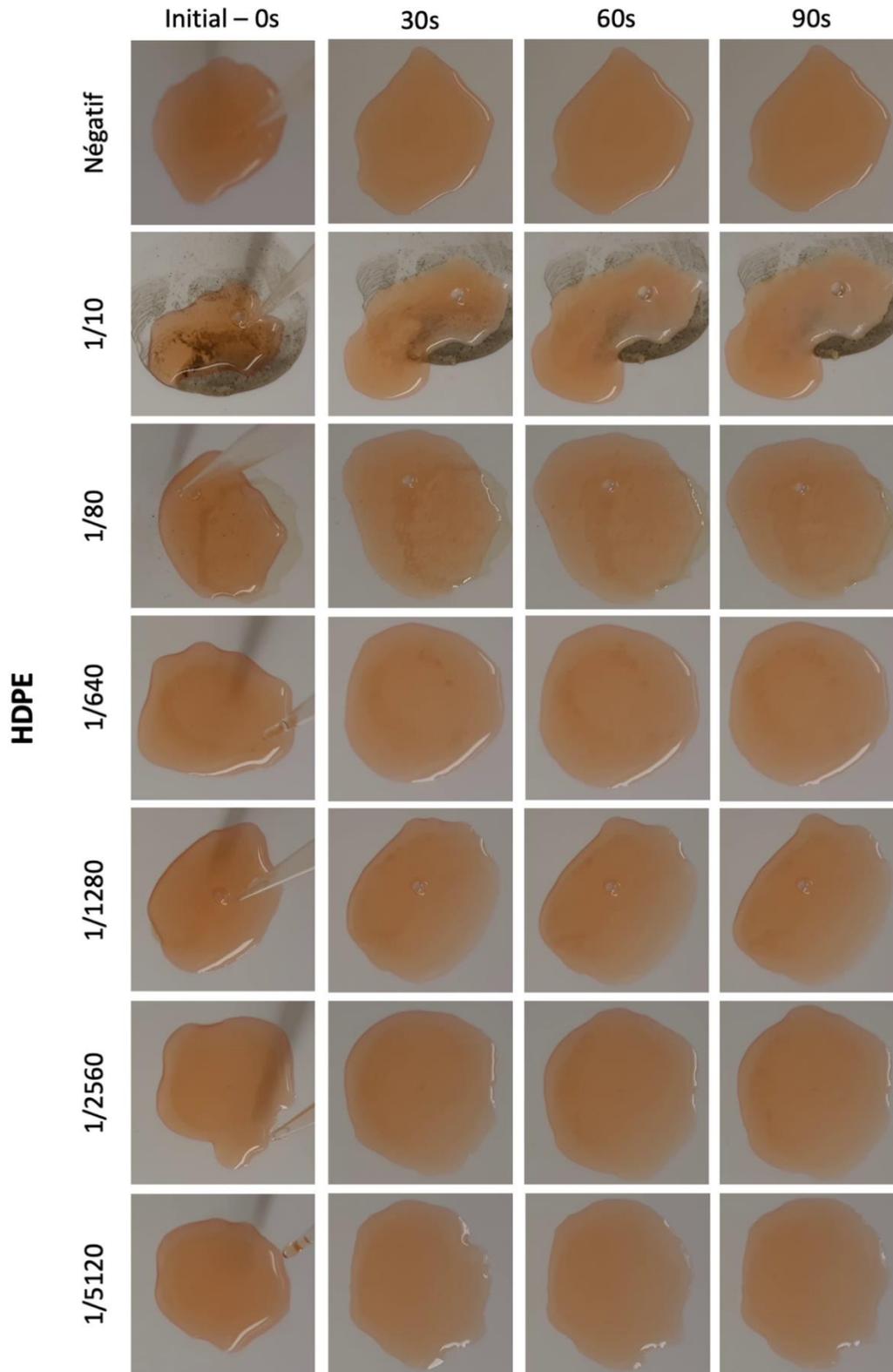
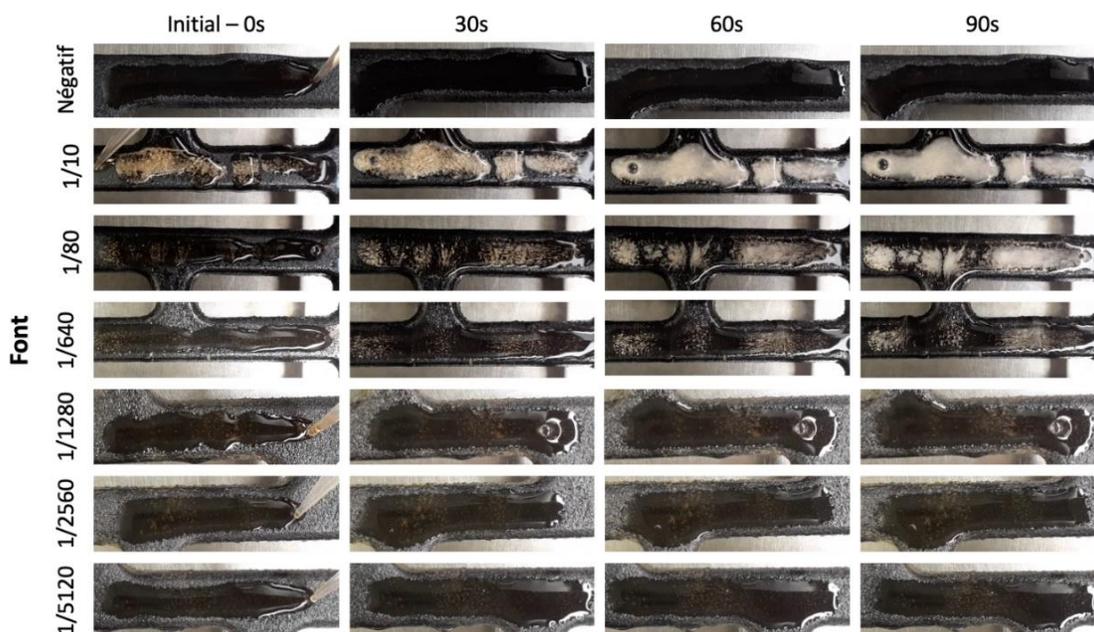


Figure 14. Réaction du Biofinder sur le PVC au lisier en différentes dilutions



**Figure 15. Réaction du Biofinder sur le HDPE au lisier en différentes dilutions**



**Figure 16. Réaction du Biofinder sur la grille en fonte au lisier en différentes dilutions**

Les résultats du test effectué à la ferme sont présentés sur la Figure 17. Avant le lavage, des bulles ont été observées sur les trois surfaces testées : le béton, le métal et le plastique. Après le lavage, la formation de bulles a été principalement constatée sur le plancher en béton. En revanche, aucune bulle n'a été observée sur la partition en plastique et la mangeoire en métal. Cependant, lors de l'application du Biofinder dans les coins ou les structures d'assemblage (Figure 18), la formation de bulles a été constatée.



**Figure 17. Test d'application du biofinder à la ferme avant et après le processus de lavage**

Il est important de noter que ces résultats suggèrent une efficacité de nettoyage moindre sur le plancher en béton par rapport aux autres surfaces testées. Des mesures de nettoyage supplémentaires peuvent être nécessaires pour améliorer l'hygiène dans cette zone.



**Figure 18.** La présence de bulles dans le coin (droit) et la structure d'assemblage (gauche) après application de Biofinder

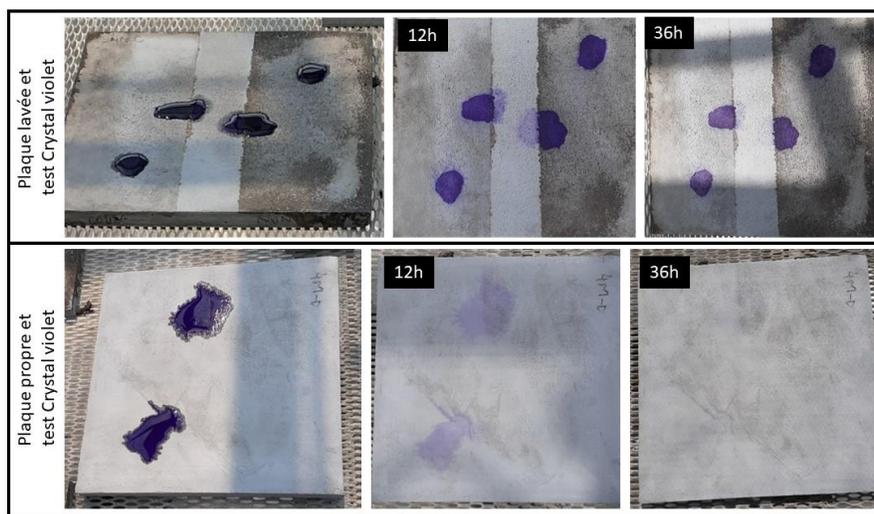
Dans la Figure 19, il est possible de voir des bulles qui s'accumulent dans la partie inférieure du matériel. Les surfaces métalliques et plastiques sont planes, lisses et présentent des caractéristiques hydrophobes. De plus, la concentration de résidus ou de bactéries est faible, ce qui permet au produit de s'écouler avant la formation de bulles. C'est pourquoi les bulles sont plus visibles en bas.



**Figure 19.** Accumulation des bulles dans la partie en bas du matériel

## Coloration du biofilm - Crystal violet

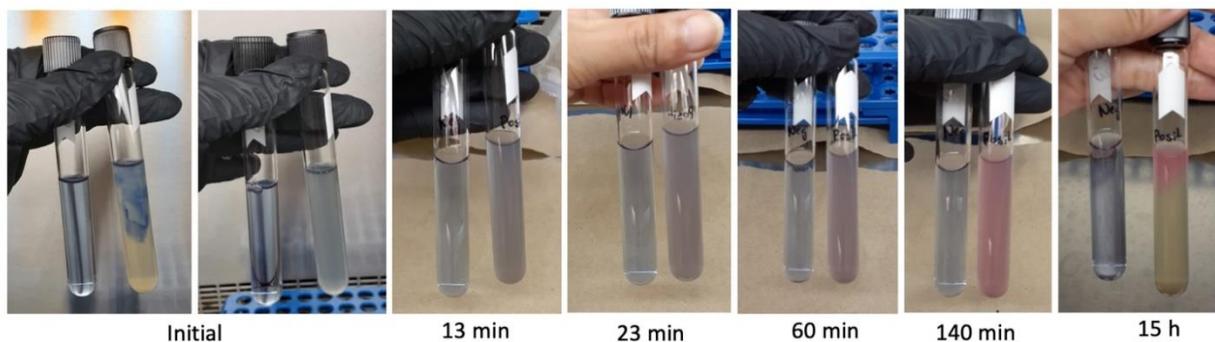
La technique de coloration par le Crystal violet directement sur la plaque fournit la preuve la plus directe de la croissance du biofilm, comme on peut le voir sur la surface après 12 heures dans la Figure 20. Les endroits sales présentent une coloration violet foncé, tandis que les endroits où le lisier n'a pas eu de contact ou sur la plaque propre, la coloration après 12 heures était pâle et après 36 heures, elle a presque disparu.



**Figure 20.** Coloration de la biomasse par Crystal Violet

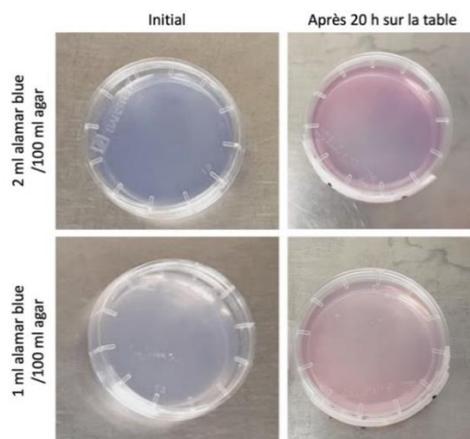
## Réaction métabolique - Alamar blue

La Figure 21 montre le changement de couleur du bleu au rose dans le tube contenant le lisier dilué au fil du temps. On peut observer un changement léger après 13 minutes, mais la couleur devient complètement rose après 140 minutes.



**Figure 21.** Test Alamar blue dans le tube

Dans la Figure 22, il est possible de voir le changement de couleur du bleu au rose pour les deux concentrations du produit après 20 heures.



**Figure 22. Test Alamar blue dans la boîte de Pétri**

#### 4.3.3 Considérations générales

En considérant tous les résultats et expériences obtenus dans cette étude, les avantages et les inconvénients de chacune des méthodes sont présentés dans le Tableau 6. Les analyses potentiellement utilisables dans la ferme sont le Biofinder et l'ATP, car elles fournissent rapidement un résultat de la salubrité d'une surface. Le Crystal violet et l'Alamar blue prennent beaucoup de temps pour fournir un résultat, bien qu'ils fournissent tous deux une analyse visuelle.

**Tableau 6. Les avantages et désavantages pour chacun des méthodes**

Méthodes	Analyse	Avantage	Cout	Désavantage
Biofinder	Biofilm et bactérie	Analyse visuelle et rapide Pas cher	\$	Surfaces verticales
ATP	Bactérie	Analyse rapide (20s) Semi-quantitatif	\$\$\$	-
Crystal violet	Biofilm	Prix Analyse visuelle	\$	24h pour faire l'analyse Toxique pour le milieu aquatique et cause dommage aux yeux
Alamar blue	Bactérie	Analyse visuelle	\$\$	Il faut garder réfrigéré et protéger de la lumière. Il faut un milieu humide pour avoir la réaction. Cher

## 4.4 SYNTHÈSE

La conclusion de ce volet de l'étude est que la méthode de bioluminescence de l'adénosine triphosphate (ATP) et la méthode enzymatique en utilisant le Biofinder sont simples et faciles à utiliser, fournissant rapidement le niveau de propreté. Ces outils présentent un grand potentiel indicateur en temps réel de la salubrité des surfaces chez les producteurs. Pour la méthode enzymatique utilisant le Biofinder, il convient de souligner que l'interprétation est subjective et peut varier selon l'utilisateur. En outre, il est difficile de déterminer une quantité précise ou quantitative, mais cette technique peut donner une indication de l'état de salubrité de la surface.

De plus, cette étude a établi le niveau de propreté pour six types de matériaux (HDPE, PVC, acier inoxydable, fonte, béton vibré pressé et béton coulé sur place) pour les prochains tests de lavage en laboratoire.

## 5 ÉTAPE 3 – IMPACT DES PARAMÈTRES DE LAVAGE ET DU TYPE DE MATÉRIAU SUR LE NIVEAU DE PROPRETÉ

### 5.1 INTRODUCTION

Parfois, la contamination dans les installations porcines peut persister malgré le lavage et la désinfection. Cette persistance peut être influencée par différents facteurs tels que le type de bactérie, la formation de biofilm, le type de matériau et les paramètres de lavage. Nakanishi et al (2021) ont fait une revue de l'influence du type de surface sur la colonisation bactérienne et l'impact de la procédure de lavage sur l'hygiène, en prenant en compte les différents matériaux utilisés dans les installations porcines.

De plus, des études ont démontré que la formation de biofilm sur la surface des matériaux est un système complexe influencé par les conditions environnementales, les caractéristiques de la surface de chaque matériau et du groupe de bactéries (Apedo et al., 2016; Boon & Wray, 1989; Brajkovic et al., 2014; Cheng et al., 2019; Katsikogianni & Missirlis, 2004; Busscher, 2008; Harimawan et al., 2011). Ces paramètres, ainsi que les paramètres de lavage, sont les principaux facteurs qui affectent l'élimination ou la persistance du biofilm dans les installations porcines, même après le nettoyage et la désinfection. Certains paramètres de lavage, telles que les traitements chimiques (par exemple, l'application de détergent), l'utilisation d'eau chaude (recommandée pour certains matériaux) et une durée de lavage plus longue (Burfoot & Middleton, 2009, Hurnik, 2005, Predicala & Alvarado, 2014), peuvent être optimisés pour augmenter l'efficacité de la suppression du biofilm et bactéries.

L'objectif de la présente étape a été divisé en deux parties. La première consistait à déterminer les paramètres de lavage optimaux (pression, débit et température de l'eau) pour différents matériaux (béton, plastique et métal), en veillant à la salubrité et en minimisant la quantité d'eau utilisée. La deuxième partie consistait à valider les paramètres optimaux de lavage, ainsi qu'à évaluer l'effet du savonnage avant ou après le lavage et du nombre de passages de la buse dans un même endroit sur le niveau de propreté. Pour atteindre cet objectif, des lavages contrôlés ont été effectués en laboratoire.

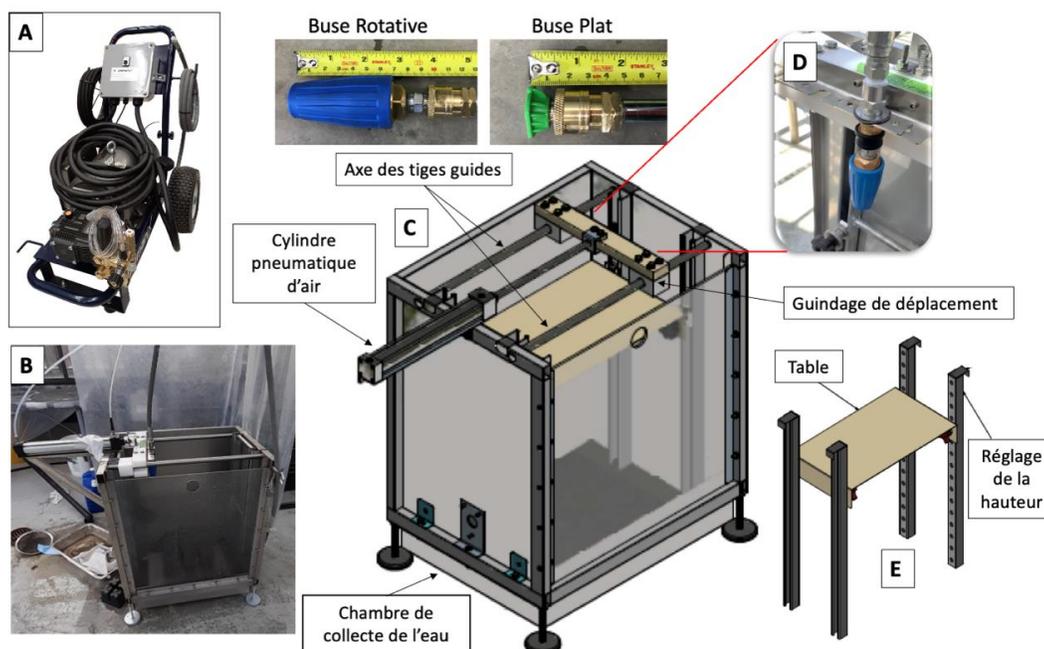
### 5.2 MÉTHODOLOGIE

#### 5.2.1 Station de lavage automatisés expérimentale

En principe, la station de lavage automatisée permet de maintenir les paramètres de lavage constants pour tous les échantillons lavés. La station est équipée d'une laveuse commerciale de modèle ARI-4040E1AH fournie par Unimanix, avec un régulateur de pression et une boîte-station de lavage, comme illustré dans la Figure 23. La laveuse présente une capacité de pression de 4000 psi, un débit de 4,0 GPM, accepte l'eau chaude, a une vitesse de 1750 RPM et est équipée d'un moteur fermé/ventilé de 10 HP, 230 volts monophasé, 40 ampères, d'un boyau de 30 pieds et d'un jet ajustable.

La station de lavage, de dimensions 26' x 20' x 30', est en acier inoxydable et a une forme cubique avec un panneau transparent en polycarbonate sur l'un de ses côtés. Dans la boîte-station de lavage, une table avec une hauteur ajustable permet d'adapter la distance entre la buse et la surface de l'échantillon en fonction des besoins de lavage. Les échantillons sont déposés sur la table dans la boîte-station.

La buse de lavage est fixée à un pont roulant qui est activé par un cylindre pneumatique et ce, à une vitesse constante ajustable. Ce système permet de déplacer la buse horizontalement de manière constante, ce qui garantit une efficacité de lavage uniforme sur toute la surface de l'échantillon. La vitesse est ajustée en réglant la pression dans le cylindre et en effectuant une calibration préalable.



**Figure 23.** Station de lavage automatisée; a) laveuse commerciale de pression, b) photo de la boîte-station de lavage, c) illustration schématique de la boîte-station de lavage, d) connexion de la buse au guidage de déplacement, e) illustration schématique de la table de support où l'échantillon du matériau à laver est déposé avec le réglage de la hauteur.

### 5.2.2 Paramètres de lavage

Les lavages ont été effectués en utilisant deux types de buses couramment utilisées par les producteurs : la buse rotative et la buse plate. Trois paramètres ont été évalués : la température de l'eau, la vitesse de déplacement de la buse et la pression d'impact, comme indiqué dans le Tableau 7.

**Tableau 7. Description des paramètres de lavage**

Paramètres	1	2	3
Buse	Buse rotative	Buse à jet plat	
Température (°C)	7 ± 3	27 ± 3	47 ± 3
Vitesse (m/s)	0,27	0,56	0,78
Pression d'impact - PI (MPa)			
Buse rotative	7,57	22,17	37,07
Buse à jet plat	0,08	0,3	0,68

La pression d'impact a été mesurée en fonction de la distance entre la buse (15, 30, 50 cm) et la surface d'impact, ainsi que la pression d'eau (1000, 2000, 3000 et 4000 psi), car plusieurs combinaisons de ces deux paramètres peuvent fournir la même pression d'impact. Une balance a été utilisée pour mesurer la force exercée, puis la pression d'impact en MPa a été calculée en fonction de l'aire d'impact du jet d'eau (ANNEXE A).

### 5.2.3 Protocole de souillage

La méthode de salissage utilisée consistait en un badigeonnage manuel. Pour ce faire, 50 ml de lisier étaient versés sur la surface du matériau, puis étalés à l'aide d'une spatule pour s'assurer d'une couverture uniforme de toute la surface (Kymäläinen et al., 2008). Cette procédure a été répétée deux fois par jour (matin et après-midi) pendant trois jours consécutifs (De Foy, 2005; Pelletier, 2003). Afin de minimiser la perte d'humidité entre le dernier jour de salissage et le jour du lavage, les échantillons ont été recouverts d'une couverture en plastique.

### 5.2.4 Analyse d'eau de lavage

Afin de garantir la qualité de l'eau utilisée à chaque lavage, des analyses ont été effectuées à chaque fois. Avant le début du processus de lavage, environ 100 ml d'eau ont été prélevés pour être examinés. Ces analyses ont été réalisées par le laboratoire AGAT, basé à Québec, en utilisant la méthode de filtration sur membrane pour déterminer la présence d'*Escherichia coli* et de coliformes totaux dans l'eau. Cette méthode est largement reconnue pour sa précision et sa fiabilité dans la détection de ces bactéries potentiellement dangereuses pour la santé humaine. Ainsi, grâce à ces mesures préventives, nous pouvons garantir la qualité de l'eau utilisée lors de nos lavages.

### 5.2.5 Détermination des paramètres optimaux de lavage

#### Protocole de lavage

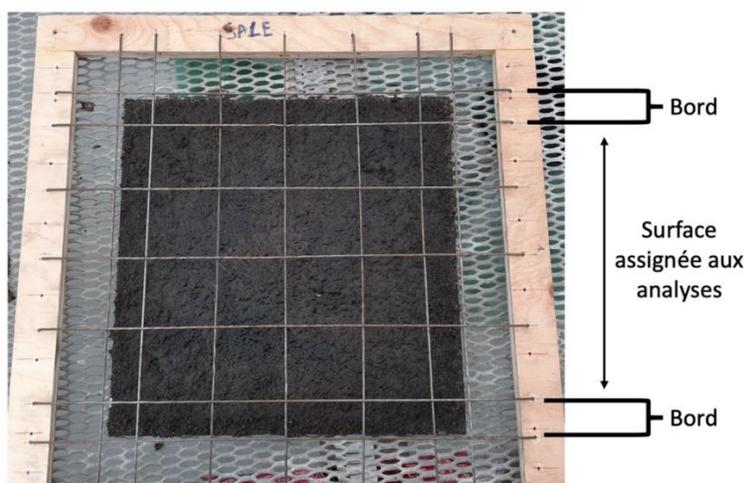
Les six plaques, en béton coulé sur place (BCP), béton vibré-pressé (BVP), PVC, HDPE, acier inoxydable (AI) et fonte (F), ont été nettoyées conformément aux recommandations des conseillers et du guide de lavage, désinfection et séchage des porcheries émis par Les Éleveurs de porcs du Québec en 2011. Le protocole de nettoyage suivi était le suivant :

- I. Trempage à l'eau : avant de commencer le lavage, les plaques ont été trempées pendant 1 heure avec de l'eau à faible pression, à intervalles de 1 à 5 minutes, répétées 10 fois ;
- II. Lavage : à la fin du trempage, le lavage a été effectué en utilisant deux types de buses, en fixant les trois paramètres (température de l'eau, vitesse et pression d'impact). Les plaques ont été considérées comme étant lavées lorsque plus aucun lisier n'était présent sur leur surface. En cas de présence de lisier sur la surface d'impact du jet, le passage de la buse a été répété ;
- III. Savonnage : le savon dégraissant Adhère CPM a été appliqué sur les plaques lavées et a été laissé sur les surfaces pendant 25 minutes pour lui permettre d'agir. Après le temps de réaction du savon, un rinçage à basse pression a été effectué ;
- IV. Séchage : les plaques ont été conservées à l'intérieur pour sécher à température ambiante (18 à 25 °C).

## Évaluation de l'efficacité de lavage

Pour évaluer l'efficacité du lavage, la méthode de la bioluminescence de l'ATP a été utilisée. Les plaques ont été analysées en duplicata, une fois après 1 heure de séchage et une seconde fois après 24 heures de séchage. Les analyses ont été réalisées à la fois sur les plaques témoins (non lavées) et sur les plaques lavées. La surface de chaque plaque a été divisée en 16 carrés de 5 x 5 cm (soit 25 cm<sup>2</sup>) à l'aide d'une grille métallique (Figure 24). Un bord de 2,5 cm autour de la plaque n'a pas été pris en compte pour l'analyse (De Foy, 2005).

Pour chaque analyse d'ATP, quatre carrés ont été sélectionnés aléatoirement, ce qui a permis d'échantillonner une aire totale de 100 cm<sup>2</sup> à l'aide d'un écouvillon ATP rapide.



**Figure 24. Division de la plaque pour les analyses à l'aide d'une grille métallique**

## Consommation d'eau

La consommation d'eau pour chaque lavage de plaque a été mesurée à l'aide d'un compteur d'eau installé à l'entrée de la laveuse commerciale.

### 5.2.6 Validation des paramètres optimaux

#### Protocole de lavage

Pour valider les paramètres optimaux obtenus lors du premier groupe de lavage, un deuxième test de lavage a été effectué. Les plaques en béton coulé sur place et en béton vibré-pressé ont été utilisées pour ce test, car elles se sont avérées plus difficiles à nettoyer. Les lavages ont été réalisés en utilisant deux types de buses : i) buse rotative, et ii) buse plate, comme dans le premier groupe de lavage. Deux facteurs ont été ajoutés pour le test de validation : le savonnage avant ou après le lavage et le nombre de passages de la buse.

Pour le facteur savonnage avant ou après le lavage, deux protocoles ont été évalués :

1. Plaques lavées avec savonnage après le lavage (S-APRÈS), suivant le même protocole que le premier groupe de lavage, comprenant le trempage, le lavage avec les paramètres optimaux, l'application du savon, le rinçage en basse pression et le séchage ;
2. Plaques lavées avec savonnage avant le lavage (S-AVANT), dans lesquelles le trempage a été effectué avec du savon (1 fois) laissé agir pendant 20 minutes avant le lavage avec les paramètres optimaux, suivi du séchage.

Pour le facteur passage de la buse, le nombre de passages de la buse dans un même endroit a été évalué, soit 1 fois et 2 fois. Au total, cela a abouti à 4 traitements pour chaque type de buse, pour chaque type de matériau. Pour chaque traitement, 3 répétitions ont été réalisées.

#### Analyses

Pour valider les paramètres optimaux et évaluer les différents traitements, trois méthodes ont été utilisées : 1) la mesure de la bioluminescence de l'ATP ; 2) la réaction enzymatique utilisant le Biofinder ; et, 3) le comptage des colonies bactériennes sur les plaques. De plus, la consommation d'eau utilisée pour laver les plaques a été mesurée à l'aide d'un débitmètre placé à l'entrée de la laveuse commerciale. Les analyses ont été réalisées après 1 heure de séchage, en utilisant la même grille métallique pour diviser la surface des plaques (Figure 23). Des analyses ont également été effectuées sur les plaques non lavées à titre de comparaison.

1. Pour chaque analyse d'ATP, quatre carrés ont été sélectionnés au hasard, couvrant une surface totale de 100 cm<sup>2</sup>, en utilisant un écouvillon préalablement humidifié (Test Hygiene UltraSnap surface ATP) et un luminomètre Hygiene EnSURE ;
2. Pour la méthode de dénombrement sur plaques, huit carrés ont été sélectionnés au hasard dans les plaques lavées, couvrant une surface totale de 200 cm<sup>2</sup>, et quatre carrés ont été sélectionnés au hasard dans les plaques sales, couvrant une surface totale de 100 cm<sup>2</sup> (Keeratipibul et al., 2009).

L'échantillonnage a été effectué par écouvillonnage à l'aide d'écouvillons prêts à l'emploi contenant du liquide peptone tamponné (3M, St. Paul, MN, USA), et l'analyse microbiologique a été réalisée à l'aide de Petrifilms de numération des coliformes totaux et d'*Escherichia coli* (3M, St. Paul, MN, USA) ;

3. Pour la méthode de réaction enzymatique utilisant le Biofinder, 500 µl du produit ont été appliqués sur un carré sélectionné au hasard. L'analyse visuelle a été réalisée à 30 et 90 s de réaction.

### 5.2.7 Analyse statistique

Pour déterminer les paramètres optimaux de lavage pour chaque matériau, la conception de Box-Behnken a été choisie pour collecter les données (Montgomery, 2001). Le design Box-Behnken a été mis en place pour étudier l'effet de trois variables indépendantes sur les réponses de l'analyse d'ATP (1 h et 24 h) ainsi que sur la consommation d'eau. Pour une expérience à trois facteurs, ce délinéament factoriel incomplet nécessite trois niveaux régulièrement espacés pour chaque facteur, codés -1, 0 et +1. Selon le design Box-Behnken, deux variables (niveaux -1 et +1) sont appariées en factorielle 2k, tandis que l'autre facteur reste fixé au centre (niveau 0) (voir tableau 9). Au total, quinze expériences ont été effectuées dans un ordre aléatoire, dont trois répétitions d'une expérience avec les trois variables indépendantes fixées en leur point central. La randomisation garantit que les conditions d'une exécution ne dépendent pas des conditions des exécutions précédentes et ne prédisent pas les conditions des exécutions suivantes. La randomisation est essentielle pour tirer des conclusions de l'expérience de manière correcte (sans biais), sans ambiguïté et rigoureuses. Plus important encore, les paramètres correspondant au point central (0,0,0) ont été répétés deux fois pour s'assurer que les données expérimentales sont bien réparties dans la dispersion normale et que la répétabilité est assurée (Manohar et al., 2013).

Le design Box-Behnken a été réalisé pour chaque matériau et pour chaque type de buse, ce qui représente un total de 180 tests. L'analyse de surface de réponse a été utilisée pour sélectionner la meilleure combinaison de paramètres de lavage pour chaque matériau. Le logiciel R Studio (version 1.4.1106) a été utilisé pour la régression et l'analyse graphique de surface de réponse des données obtenues.

Pour valider les paramètres optimaux de lavage, un design complètement randomisé (DCR) a été réalisé, avec les traitements organisés selon un schéma factoriel 2x2. Pour l'analyse statistique du test ATP, une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée pour évaluer l'interaction entre les facteurs, à savoir le savonnage avant ou après le lavage (S-AVANT et S-APRÈS) et le passage de la buse (1 et 2 fois). Ensuite, les moyennes ont été comparées à l'aide du test de Tukey, avec un seuil de signification de 5%.

## 5.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 5.3.1 Analyse d'eau de lavage

Selon les résultats d'analyse de l'eau émis par le laboratoire, l'eau était considérée potable conformément au Règlement sur la qualité de l'eau potable (MELCC) pour les paramètres analysés. Ces résultats confirment que l'eau utilisée pour les besoins en eau potable respecte les normes sanitaires établies par le gouvernement.

### 5.3.2 Détermination des paramètres optimaux de lavage

#### Évaluation de la période de mesure d'ATP

En général, il a été observé une réduction des valeurs RLU des analyses d'ATP sur les plaques lavées après une heure de séchage. Cependant, après 24 heures de séchage, une augmentation de la valeur RLU a été observée. Ce même comportement a été rapporté par Yi et al. (2020), qui ont évalué la facilité à nettoyer les planchers grillagés en polypropylène et des mangeoires en mise bas à l'aide d'une bioluminescence d'ATP. Les mêmes auteurs ont observé une diminution significative des niveaux de bioluminescence d'ATP qui s'est produite après le lavage et a persisté jusqu'à 48 heures après la désinfection. Passé ce délai, les niveaux mesurés dépassaient ceux mesurés immédiatement après le nettoyage. Cependant, dans les coins du plancher et dans les mangeoires, les niveaux de bioluminescence d'ATP mesurés après le nettoyage n'étaient pas significativement différents de ceux mesurés avant le nettoyage, et les niveaux d'ATP ont encore augmenté à 1 et 3 heures, respectivement, après le processus de désinfection.

La raison de cette augmentation est que des colonies de bactéries ont survécu sur la surface en raison de la présence de biofilm (Loza-Correa & Ramírez-Arcos, 2017) ou encore la porosité, des rainures ou des irrégularités de la surface (Brajkovic et al., 2014). Cette sous-population peut se développer rapidement, et la présence de résidus de lisier ou de nourriture peut encore favoriser le développement de bactéries (Jun et al., 2010).

#### Évaluation de l'influence des paramètres sur la consommation d'eau et le temps de lavage

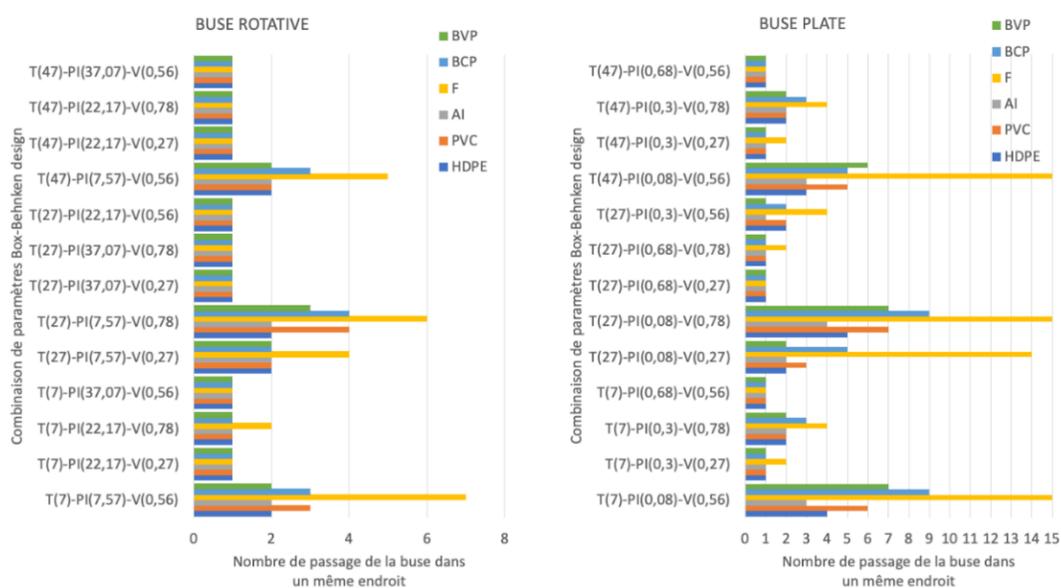
Il a été observé que l'augmentation de la température et de la pression d'impact, accompagnée d'une réduction de la vitesse, permet d'obtenir un meilleur nettoyage. Il apparaît également que la pression d'impact et la vitesse de nettoyage sont les paramètres qui influencent le plus la consommation d'eau. De plus, de faibles pressions d'impact nécessitent de passer la buse plus d'une fois au même endroit. En revanche, des pressions d'impact plus élevées réduisent la surface couverte par le jet d'eau, ce qui nécessite de prendre plus de temps pour un balayage complet de la surface à laver.

Il est important de noter que la consommation d'eau peut être significativement réduite en utilisant des pressions d'impact et des vitesses de nettoyage appropriées, ce qui permet également d'économiser de l'énergie et de

réduire les coûts d'exploitation. Par conséquent, il est recommandé d'optimiser ces paramètres pour atteindre un équilibre entre un nettoyage efficace et une consommation d'eau minimale.

## Évaluation du nombre de passages de la buse sur une même place

Dans la plupart des expériences menées dans le cadre de l'étude pour déterminer les paramètres optimaux, un seul passage de la buse au même endroit a suffi pour laver les plaques, sauf lorsque la pression d'impact était faible, indépendamment du type de buse utilisé, de la température ou de la vitesse (voir Figure 25). Cependant, la fonte a nécessité un nombre plus élevé de passages dans plusieurs cas. Pour certains matériaux, il est également possible d'observer une augmentation du nombre de passages nécessaires au nettoyage d'une même zone lorsque la vitesse est élevée et que la pression d'impact est moyenne pour une buse plate.



**Figure 25. Nombre de passages de la buse rotative et de la buse plate dans un même endroit durant les expériences de lavage du volet d'optimisation par Box-Behnken\***

\*T : température (°C); PI : Pression d'impact (MPa); V : Vitesse (m/s)

## Optimisation des paramètres de lavage par analyse de type box-behnken

Les analyses de surface de réponse, gérées par l'analyse Box-Behnken, sont plus utiles que la méthode d'optimisation traditionnelle à effet unique. Elles permettent de comprendre les effets d'interaction entre deux paramètres ou plus et de déterminer la valeur optimale de chaque variable pour minimiser ou maximiser une réponse donnée (Nekkaa et al., 2021) avec un nombre moindre de tests. Le principe de l'étude repose sur l'analyse de la variance de la régression, la vérification de l'ajustement des modèles quadratiques et l'étude des graphiques des surfaces de réponse. Les équations de régression des trois réponses sont obtenues après l'analyse de variance,

permettant de déterminer les paramètres les plus significatifs en termes de niveau de confiance (95 %, 99 % ou 99,9 %) (Aziz et al., 2021).

Les représentations graphiques de surface de réponse montrent les effets de deux facteurs sur la réponse étudiée, tandis que le troisième facteur reste constant dans la conception. Dans la présente étude, la valeur moyenne a été fixée à 27 °C pour la température, 0,54 m/s pour la vitesse, 22,25 MPa pour la pression d'impact des buses rotatives et 0,3 MPa pour la pression d'impact des buses plates. L'analyse détaillée, avec les représentations graphiques et les modèles de surface de réponse, est présentée dans l'Annexe B.

### *Lavage avec la buse rotative*

Les principaux effets des paramètres de lavage sur l'efficacité de lavage pour chaque matériau, selon les analyses Box-Behnken, sont décrit ci-dessous :

- PVC : La réduction de la vitesse de lavage a favorisé un meilleur nettoyage, c'est-à-dire une diminution des valeurs en RLU pour l'analyse ATP à 1h et à 24h. Cependant, cette réduction a entraîné une augmentation de la consommation d'eau. Par ailleurs, l'augmentation de la température et de la pression d'impact a favorisé un meilleur nettoyage ;
- HDPE : Le lavage a été plus efficace, c'est-à-dire les valeurs en RLU plus faibles, lorsque la température était comprise entre 20 et 30 °C pour les analyses d'ATP à 1h et à 24h ;
- Acier inoxydable : Les représentations graphiques de surface de réponse montrent une tendance à avoir des valeurs plus faibles en RLU pour les analyses ATP lorsque la température est plus élevée et que la vitesse et la pression sont plus basses ;
- Fonte : Le lavage a été plus efficace lorsque la température était comprise entre 20 et 30 °C. Une pression d'impact plus forte a tendance à réduire les valeurs en RLU. Cependant, en augmentant la température avec une pression d'impact comprise entre 20 et 30 MPa, une consommation d'eau moindre a été observée ;
- Béton coulé sur place : Il est possible de réduire les valeurs en RLU en diminuant la vitesse et la pression d'impact avec une température comprise entre 20 et 30 °C. De plus, la consommation d'eau a été influencée par la vitesse et la pression d'impact, une vitesse plus élevée avec une pression comprise entre 20 MPa et 30 MPa réduisant la consommation d'eau ;
- Béton vibré-pressé : Les représentations graphiques de surface de réponse montrent que des valeurs plus faibles sont obtenues pour l'analyse ATP à 24h dans deux situations : 1) en réduisant la température, la vitesse et la pression ou 2) en augmentant la pression d'impact et en réduisant la température et la vitesse. Toutefois, une consommation d'eau plus faible est observée lorsque la vitesse est augmentée et que la pression d'impact est comprise entre 15 et 25 MPa.

### *Lavage avec la buse plate*

Les principaux effets des paramètres de lavage sur l'efficacité de lavage de chaque matériau, selon les analyses de Box-Behnken, sont décrits ci-dessous :

- PVC : Les valeurs d'ATP à 1 h sont plus faibles lorsque les plaques sont lavées à une température comprise entre 20 et 30 °C. La consommation d'eau est également plus faible lorsque la pression d'impact est comprise entre 0,35 et 0,5 ;
- HDPE : Une température de 20 à 30 °C a entraîné une réduction des valeurs en RLU à 24 heures. De plus, une pression d'impact comprise entre 0,4 et 0,7 MPa a permis de réduire la consommation d'eau ;
- Acier inoxydable : La consommation d'eau est plus faible lorsque les lavages sont effectués à une pression d'impact comprise entre 0,35 et 0,55 MPa, accompagnée d'une vitesse comprise entre 0,4 et 0,6 m/s ;
- Fonte : La réduction de la vitesse avec une pression d'impact comprise entre 0,3 et 0,6 m/s a favorisé la réduction de la valeur en RLU pour l'analyse ATP à 1 heure. En ce qui concerne la consommation d'eau, il est possible d'observer une tendance à la réduction en augmentant la pression d'impact ;
- Béton coulé sur place : L'augmentation de la température et la réduction de la vitesse entraînent une diminution des valeurs d'ATP, tandis que la pression d'impact comprise entre 0,4 et 0,6 MPa permet de réduire la consommation d'eau ;
- Béton vibré-pressé : Les représentations graphiques de surface de réponse montrent une diminution de la consommation d'eau lorsque les lavages sont effectués avec une pression d'impact comprise entre 0,35 et 0,55 MPa.

## Évaluation de la stratégie de lavage la plus efficace pour l'ensemble de matériaux

Afin de déterminer le paramètre optimal applicable chez les producteurs, il est nécessaire de trouver un paramètre optimal unique pour tous les types de matériaux. En pratique, il n'est pas possible de modifier chaque paramètre à chaque fois pour laver différents types de matériaux dans un même bâtiment. Cependant, il est important de choisir un paramètre qui réduise efficacement la présence de bactéries et de résidus organiques pour tous les matériaux, tout en minimisant la consommation d'eau.

Ainsi, les représentations graphiques de surface de réponse gérées par l'analyse Box-Behnken ont été analysées en utilisant les valeurs d'ATP pour évaluer l'efficacité du lavage. Cette analyse a été réalisée en deux étapes : a) une présélection de l'intervalle pour chacun des paramètres (température, vitesse et pression d'impact) a été identifiée dans les représentations graphiques de surface de réponse de l'ATP1h et de l'ATP24h. Les paramètres qui ont obtenu des valeurs en dessous du seuil de propreté RLU ont été retenus pour la présélection. Les valeurs d'ATP considérées comme seuils acceptables de propreté pour chaque matériau ont été établies dans le cadre de ce projet et ont été de 463, 443, 151, 226, 521 et 505 RLU respectivement pour le HDPE, le PVC, le béton coulé sur place, le béton vibré pressé, l'acier inoxydable et la fonte ; b) en utilisant la range présélectionnée, une nouvelle sélection de l'intervalle pour chacun des paramètres a été effectuée en utilisant les représentations graphiques de surface de réponse pour la consommation d'eau, en choisissant celle qui présentait la consommation d'eau la plus faible.

Des intervalles ont été déterminés pour chaque matériau lavé, à la fois pour la buse rotative et la buse plate. Finalement, un paramètre optimal pour la buse rotative et un autre pour la buse plate ont été déterminés pour le lavage de tous les matériaux. Pour la buse rotative, les paramètres optimaux ont été une température comprise

entre 35 et 37 °C, une pression d'impact de 20 MPa et une vitesse de 0,5 à 0,55 m/s (Tableau 8). En revanche, pour la buse plate, les paramètres optimaux ont été une température comprise entre 40 et 45 °C, une pression d'impact de 0,6 MPa et une vitesse de 0,3 m/s (Tableau 9).

**Tableau 8. Intervalles de chaque paramètre en fonction de matériaux lavée avec la buse rotative obtenu de l'analyse Box-Behnken en utilisant les valeurs d'ATP établies.**

Buse Rotative	Température (°C)	Pression d'impact (MPa)	Vitesse (m/s)	ATP établies
HDPE	7 à 45	15 à 25	0,5 à 0,78	436
PVC	35 à 47	15 à 30	0,4 à 0,6	443
AI	35 à 47	20 à 30	0,5 à 0,78	521
F	35 à 47	20 à 30	0,45 à 0,78	505
BCP	15 à 37	15 à 20	0,45 à 0,55	151
BVP *	7 à 10 ou 44 à 47	12 à 15	0,45 à 0,55	226
Optimal	35 à 37	20	0,5 à 0,55	

\* Impossible de considérer 226 pour l'ATP à 24h (en utilisant 300 pour l'atp 24h).

**Tableau 9. Intervalles de chaque paramètre en fonction de matériaux lavée avec la buse plate obtenu de l'analyse Box-Behnken en utilisant les valeurs d'ATP établies.**

Buse Plate	Température (°C)	Pression d'impact (MPa)	Vitesse (m/s)	ATP établit
HDPE	7 à 45	a: 0,4 à 0,68 ou b: 0,3 à 0,5	a: 0,6 à 0,78 ou b: 0,27 à 0,3	436
PVC	35 à 47	0,5 à 0,6	0,27 à 0,35	443
AI	7 à 47	0,3 à 0,5	0,3 à 0,6	521
F	7 à 10 ou 40 à 47	0,5 à 0,68	0,67 à 0,78	505
BCP*1	40 à 47	0,3 à 0,6	0,27 à 0,35	151
BVP*2	7 à 10 ou 45 à 47	0,6 à 0,68	0,27 à 0,3 ou 0,7 à 0,78	226
Optimal	40 à 45	0,6	0,3	

\*1 Impossible de considérer 151 pour la buse plate (en utilisant 200 pour l'ATP24h)

\*2 Il a été considéré l'ATP de 300 pour l'évaluation à 1h, à 24h les valeurs d'ATP ont été plus hautes que la limite. Il va falloir passer plusieurs fois au même endroit

### 5.3.3 Validation des paramètres optimaux

Tout d'abord, il convient de souligner que les paramètres de température, de vitesse et de pression d'impact varient selon le type de buse, ce qui peut affecter la capacité de la buse à éliminer les contaminants en fonction des différents profils de rugosité des matériaux. Ainsi, chaque type de buse présente un comportement de lavage différent sur chaque type de surface en fonction du protocole adopté. C'est pourquoi aucune comparaison n'a été effectuée entre les buses ni entre les types de plaques (BCP et BVP). Les résultats présentés dans cette étude ont été évalués en fonction de deux facteurs : le savonnage avant ou après le savon et le nombre de passages de la buse (1 ou 2 fois).

Le lavage représente un important processus pour réduit la présence de bactérie et de résidu organiques sur les surfaces. L'analyse d'ATP faite sur les surfaces sales ont présenté de valeurs moyennes de 5345,3 RLU pour les plaques en BCP et de 4423,6 RLU pour les plaques en BVP, qui montre haute concentration de contaminants.

Les Tableaux 10 et 11 présentent les valeurs moyennes de l'ATP en fonction de l'effet du trempage avec ou sans savon et du nombre de passages de la buse pour les plaques en béton coulé sur place (BCP) lavées avec les deux types de buses, tandis que le Tableau 12 montre les valeurs moyennes de l'ATP pour les plaques en béton vibré pressé. Les résultats indiquent que le savonnage effectué après le lavage (S-APRÈS) a atteint des niveaux inférieurs à la limite de propreté prédéterminé dans le cadre de ce projet, soit 151 RLU pour les plaques en BCP et 226 RLU pour les plaques en BVP, ce qui montre que le lavage a été efficace. De plus, le nombre de passages (1 ou 2 fois) dans le protocole S-APRÈS n'a pas eu de différence significative ( $p > 0,05$ ), ce qui signifie que le passage d'une deuxième fois de la buse n'a pas eu d'effet sur la propreté. Cependant, la consommation d'eau a été doublée.

Toutefois, lorsque le savonnage est effectué avant le lavage (S-AVANT) et en passant une fois la buse, les valeurs en RLU ont dépassé les limites prédéterminées dans le cadre de ce projet, ce qui signifie que le nettoyage n'a pas été suffisant pour garantir l'hygiène. En revanche, lorsque deux passages ont été effectués, les valeurs en RLU ont été significativement réduites pour les deux types de plaques avec les deux types de buses. Pour les plaques en BVP, un deuxième passage de la buse a réduit les valeurs en dessous de la limite de propreté, mais a nécessité une consommation d'eau plus importante.

En comparant les deux protocoles, il est clair que le protocole (S-APRÈS) a été plus efficace pour nettoyer les plaques que le protocole S-AVANT, avec des valeurs significativement inférieures ( $p < 0,05$ ).

**Tableau 10. Valeurs moyennes en RLU et écart-type pour l'analyse d'ATP sur les plaques en béton coulé sur place (BCP) lavées avec la buse rotative**

Nombre de passages dans un même endroit	Protocole de lavage*	
	S-APRÈS	S-AVANT
1 fois	88 (64,2) <sup>Aa</sup>	1487,3 (340,3) <sup>Ab</sup>
2 fois	18 (6,1) <sup>Aa</sup>	238,7 (59,3) <sup>Bb</sup>

Les moyennes avec la même lettre majuscule dans la colonne ou la même lettre minuscule dans la ligne ne diffèrent pas par le test de Tukey à  $p < 0,05$ .

\*S-APRÈS : Savonnage après le lavage; S-AVANT : Savonnage avant le lavage.

**Tableau 11. Valeurs moyennes en RLU et écart-type pour l'analyse d'ATP sur les plaques en béton coulé sur place (BCP) lavées avec la buse plate**

Nombre de passage dans un même endroit	Protocole de lavage*		Moyenne
	S-APRÈS	S-AVANT	
1 fois	62,7 (11,5)	1382 (883,6)	722,3 <sup>A</sup>
2 fois	16,3 (17,1)	220,3 (158,2)	118,3 <sup>B</sup>
Moyenne	39,5 <sup>a</sup>	801 <sup>b</sup>	

Les moyennes avec la même lettre majuscule dans la colonne ou la même lettre minuscule dans la ligne ne diffèrent pas par le test de Tukey à  $p < 0,05$ .

\*S-APRÈS : Savonnage après le lavage; S-AVANT : Savonnage avant le lavage.

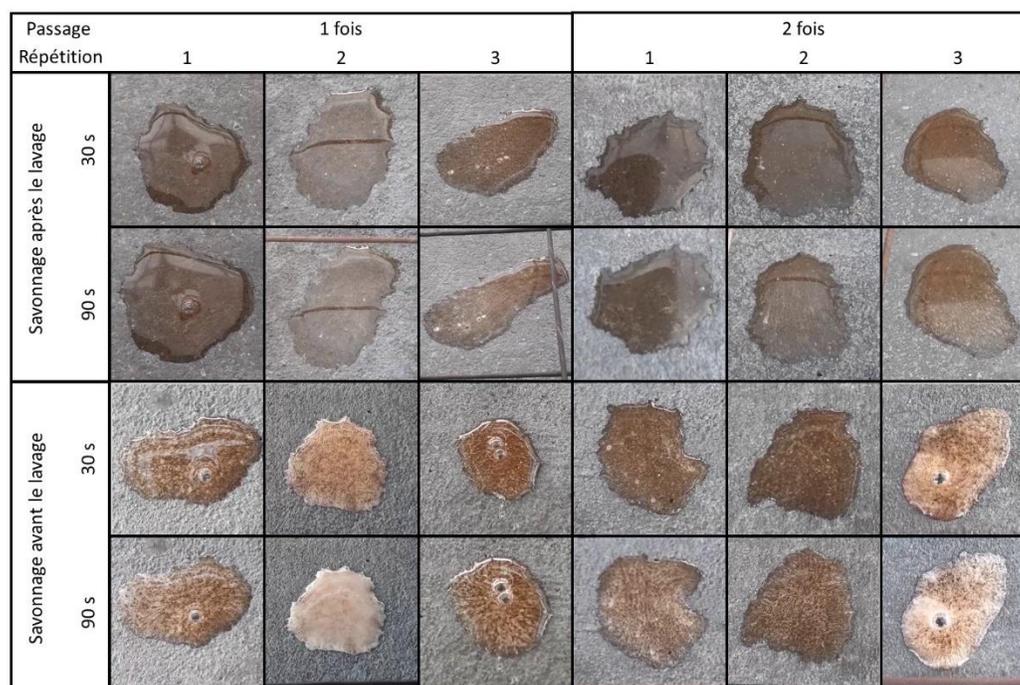
**Tableau 12. Valeurs moyennes en RLU et écart-type pour l'analyse d'ATP sur les plaques en béton vibré pressé (BVP) lavées avec la buse rotative et plate**

Nombre de passages dans un même endroit	Buse rotative*		Buse Plait*	
	S-APRÈS	S-AVANT	S-APRÈS	S-AVANT
1 fois	38,3 (15) <sup>Aa</sup>	890 (170,5) <sup>Ab</sup>	19,3 (6,7) <sup>Aa</sup>	1020 (276,4) <sup>Ab</sup>
2 fois	18 (3,6) <sup>Aa</sup>	212,3 (79,5) <sup>Bb</sup>	20,3 (6,1) <sup>Aa</sup>	143,7 (4,2) <sup>Bb</sup>

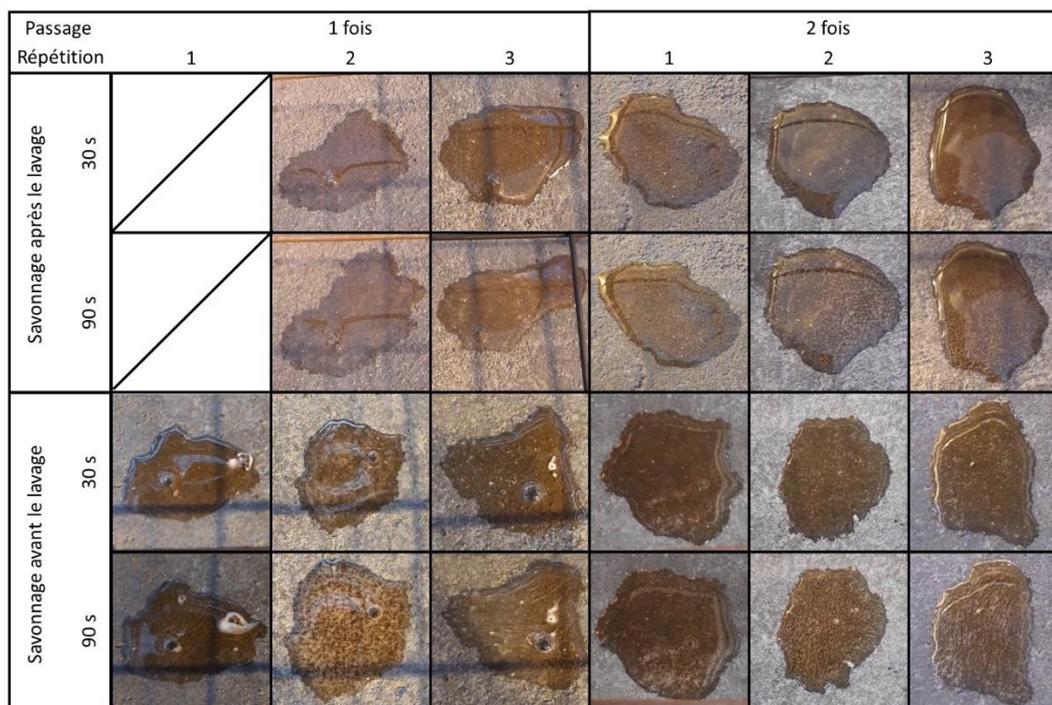
Les moyennes avec la même lettre majuscule dans la colonne ou la même lettre minuscule dans la ligne ne diffèrent pas par le test de Tukey à  $p < 0,05$ .

\*S-APRÈS : Savonnage après le lavage; S-AVANT : Savonnage avant le lavage.

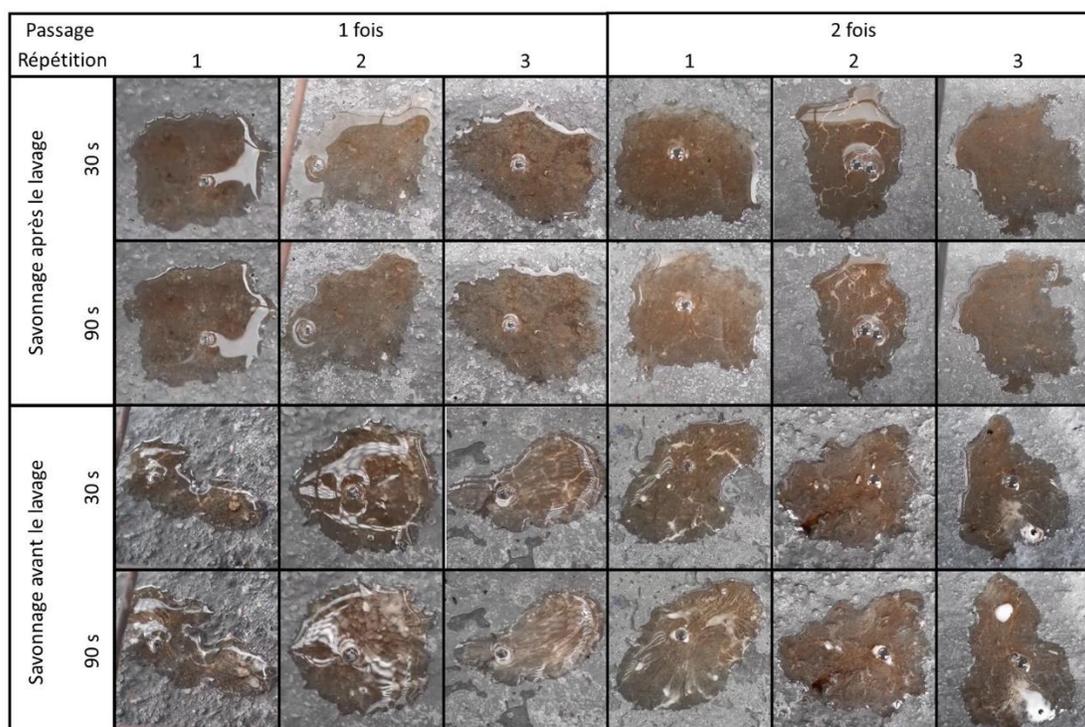
Les Figures 26 à 29 montrent les enregistrements visuels de l'analyse effectuée avec le Biofinder pendant 30 et 90 secondes pour les plaques en béton coulé sur place (BCP) et en béton vibré pressé (BVP) lavées avec une buse rotative ou une buse plate. Un enregistrement visuel a été effectué pour chaque répétition. La Figure 29 affiche les enregistrements des plaques sales en BCP et en BVP. Lorsque les plaques sont sales, la réaction (formation de bulles) est très rapide. Après le lavage, en général, les plaques où le savonnage était fait après (S-APRÈS) présentent très peu ou pas de formation de bulles jusqu'à 90 secondes, tandis que les plaques avec le savonnage avant le lavage (S-AVANT) montrent une formation de bulles plus visible, surtout lorsqu'elles ont été lavées avec un seul passage. Tout comme les analyses d'ATP, le protocole S-APRÈS a montré un nettoyage plus efficace que le protocole S-AVANT.



**Figure 26. Enregistrement de la réaction du Biofinder sur les plaques en béton coulé sur place (BCP) lavées avec la buse rotative.**



**Figure 27. Enregistrement de la réaction du Biofinder sur les plaques en béton coulé sur place (BCP) lavées avec la buse plate**



**Figure 28. Enregistrement de la réaction du Biofinder sur les plaques en béton vibré pressé (BVP) lavées avec la buse rotative**

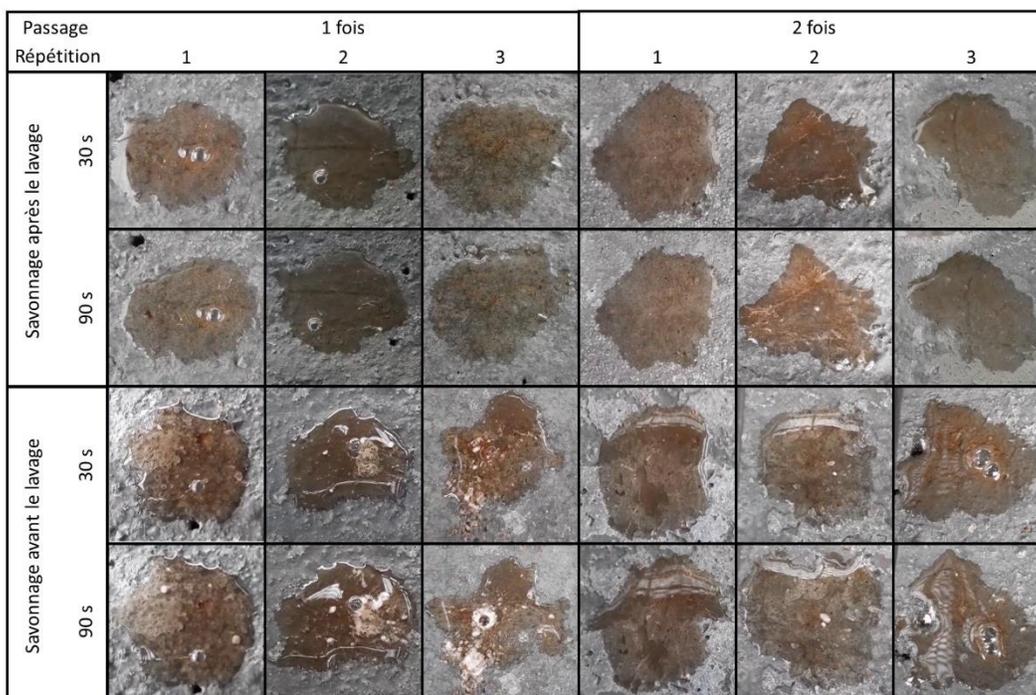


Figure 29. Suivi de la réaction du Biofinder sur le béton vibré pressé (BVP) lavé avec la buse plate.

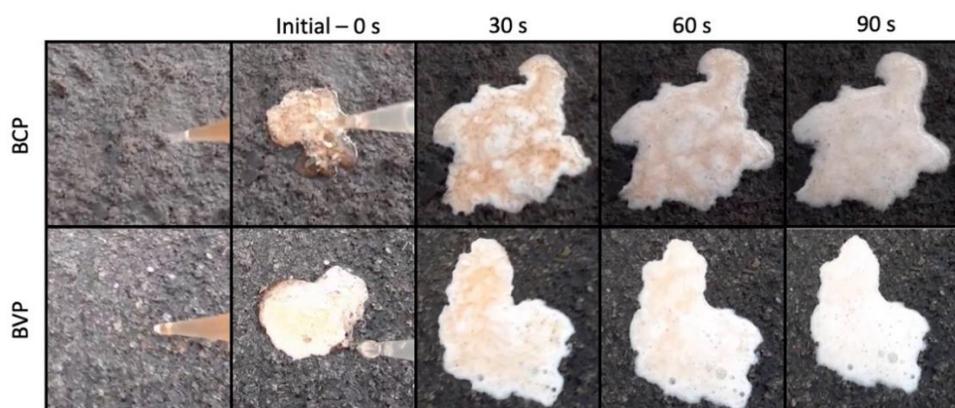
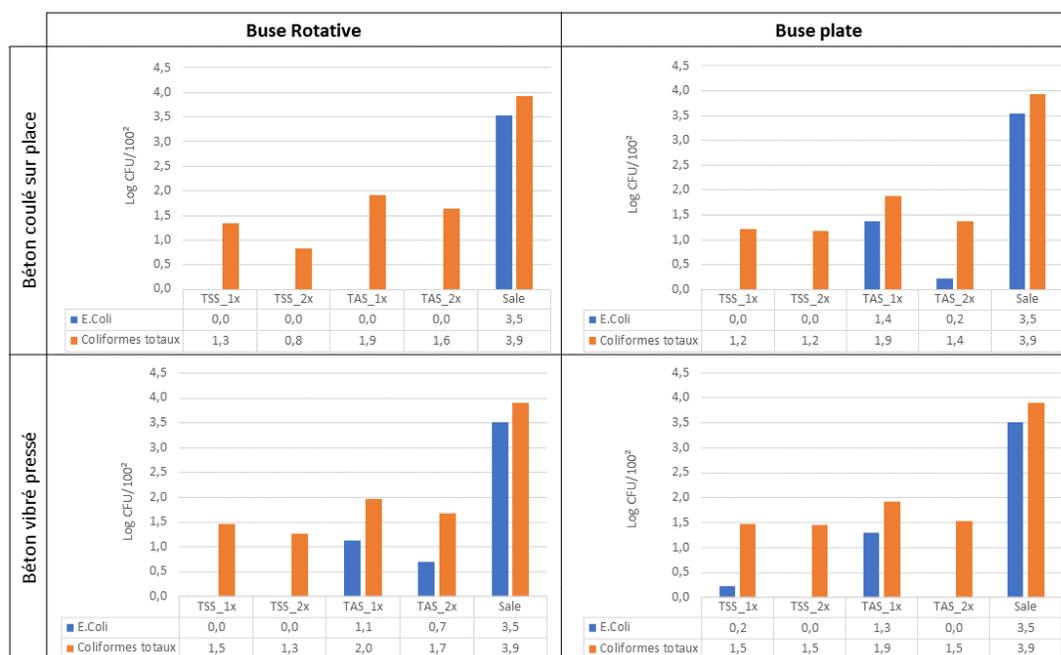


Figure 30. Suivi de la réaction du Biofinder sur les plaques souillées.

La Figure 31 représente les valeurs moyennes en  $\log_{10}$  d'*E. coli* et de coliformes totaux présents sur les plaques lavées avec trempage avec ou sans savon, en fonction du nombre de passages et du type de buses utilisées (rotative et plate) pour les plaques en BCP et en BVP, ainsi que pour les plaques sales. Comme dans les autres analyses, les plaques lavées avec du savonnage avant le lavage (S-AVANT) en utilisant un seul passage de la buse au même endroit présentent une quantité plus élevée d'*E. coli* et de coliformes totaux par rapport au savonnage après le lavage (S-APRÈS). De plus, le passage d'une deuxième fois sur les plaques lavées avec le protocole S-APRÈS a entraîné une réduction de la quantité d'*E. coli* et de coliformes totaux.



**Figure 31. Comptage d'*E. coli* et coliformes totaux sur les plaques en log CFU/100 cm<sup>2</sup> selon les facteurs : savonnage avant ou après le lavage (S-AVANT et S-APRÈS) et passage de la buse (1 et 2 fois)**

## 5.4 SYNTHÈSE

Cette étape avait pour objectif d'optimiser et valider les paramètres des opérations de lavage afin de garantir des conditions sanitaires optimales tout en minimisant la consommation d'eau. Les résultats ont montré que l'augmentation de la température de l'eau et de la pression d'impact du jet d'eau sur la surface, ainsi que la réduction de la vitesse de passage, ont eu un impact significatif sur l'efficacité du nettoyage. Pour chaque type de buse, il a été possible d'identifier les valeurs optimales des trois variables (température de l'eau, pression d'impact et vitesse) en fonction des mesures d'ATP à 1 heure et 24 heures ainsi que des niveaux de consommation d'eau. Pour la buse rotative, les paramètres optimaux ont été une température de l'eau comprise entre 35 et 37 °C, une pression d'impact de 20 MPa et une vitesse de 0,5 à 0,55 m/s. En revanche, pour la buse plate, les paramètres optimaux ont été une température de l'eau comprise entre 40 et 45 °C, une pression d'impact de 0,6 MPa et une vitesse de 0,3 m/s. En utilisant ces paramètres, il fut possible de minimiser la quantité d'eau utilisée tout en garantissant des niveaux élevés d'efficacité de nettoyage, ce qui peut contribuer à améliorer les conditions sanitaires.

Finalement, la validation des paramètres optimaux a montré être efficaces pour réduire la présence de bactéries et de résidus organiques en dessous des valeurs limites de propreté, selon l'analyse ATP, pour les plaques avec le savonnage après le lavage (S-APRÈS). En ce qui concerne l'évaluation du savonnage avant ou après le lavage, les résultats ont montré que le savonnage après le lavage (S-APRÈS) a été plus efficace pour réduire la présence de

bactéries et de résidus organiques, car le savon appliqué après le lavage permet d'éliminer les bactéries qui sont restées sur la surface après le lavage. Tandis que le savonnage avant le lavage (S-AVANT), le savon réagit sur le lisier coulé sur la surface et non sur la surface des matériaux où se cachent les bactéries, qui sont parfois sous la protection du biofilm qui les protège contre les effets du savon. En ce qui concerne le nombre de passages, il est observé que pour le protocole S-APRÈS, le deuxième passage de la buse au même endroit ne résulte pas en un gain effectif sur la qualité de lavage. En revanche, le deuxième passage dans le protocole S-AVANT a représenté une amélioration de la qualité de lavage, en contrepartie d'une double consommation d'eau.

## 6 ÉTAPE 4 – VALIDATION ET ADAPTATION DE LA MÉTHODE À LA FERME

### 6.1 INTRODUCTION

Le but de cette étape était d'évaluer les méthodes sélectionnées à l'échelle commerciale, en termes de propreté selon l'indicateur, de consommation d'eau et de temps de lavage.

### 6.2 MÉTHODOLOGIE

#### 6.2.1 Description des fermes

Les essais ont été effectués pendant l'été 2022 dans cinq sites, dont trois élevages porcins commerciaux situés dans les régions du Centre-du-Québec et de Montérégie, ainsi que deux sites expérimentaux au Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD). Un total de 9 visites (n) a été fait. Les caractéristiques des différents élevages visités sont présentées dans le Tableau 13.

**Tableau 13. Caractéristiques du bâtiment et du troupeau d'élevage de chaque ferme**

Sites	Caractéristiques du bâtiment				Caractéristiques du troupeau			Capacité animal par cage (place) <sup>1</sup>	
	n	Type d'élevage	Surface de la chambre (m <sup>2</sup> )	Nb. cage	Surface de la cage (m <sup>2</sup> )	Nb. tête	Tête par cage		Poids (kg)
A	1	Engraissement	Ch. 1 = 325,09	24	12,13	1070 <sup>2</sup>	18	120-130	14
			Ch. 2 = 346,11	25	12,13				14
B	1	Maternité	59,92	12	3,21	12 <sup>3</sup>	1	-	1
C	1	Maternité	113,58	24	3,35	24 <sup>3</sup>	1	-	1
D	3	Engraissement	-	1	11,15	-	10-12	90	16
E	3	Engraissement	-	1	2,93	-	4	80	4

<sup>1</sup>Valeur calculé en fonction du poids des animaux selon les recommandations dans le Guide sur la superficie des bâtiments d'élevages porcins (MAPAQ/CDPQ 2016).

<sup>2</sup>Nombre de porc par bâtiment. Bâtiment composé de 3 chambres.

<sup>3</sup>Nombre de truies par chambre.

## 6.2.2 Paramètres et protocoles de lavage

### Paramètres des lavages

Pour les lavages à la ferme, seuls les paramètres de température d'eau ont été évalués, à savoir chaud ou froid. Les paramètres de pression d'impact et de vitesse ont été plus difficiles à mettre en place en raison des variations des caractéristiques des laveuses à pression et des compétences des ouvriers entre les différentes fermes. Pour des raisons de biosécurité et de logistique, des laveuses à pression différentes ont été utilisées pour chaque ferme (Tableau 14). La pression maximale de lavage des différents modèles variait entre 2000 et 4000 psi.

**Tableau 14. Description des laveuse commerciales utilisées selon le fabricant**

Sites	Laveuse	Pression (psi)	Débit (gal/min)
A	Unimanix ARH-3050EDIAC	3000	5
B	Danyblast H4035DGF	3500	3,8
C	Honda GX390	4000	4
D	Unimanix ARI4040-E1AH	4000	4
E	Blue Clean AR290SS	2000	1,4

Dans chaque site, deux chambres de même dimension ont été sélectionnées. Une chambre a été lavée à l'eau froide et l'autre à l'eau chaude, en utilisant la même laveuse à pression. Le lavage des deux chambres a été effectué par le même ouvrier afin de limiter les variations. Une buse à tête rotative a été utilisée pour le lavage. La distance entre l'embout et la surface variait entre 10 cm et 30 cm.

Le Tableau 15 présente une description des paramètres de lavage utilisés dans chacune des fermes. La pression réelle de travail a été mesurée à l'aide d'un manomètre, lorsque disponible. Le débit effectif de travail a été mesuré à l'aide d'un contenant de plastique de 10 L gradué. Le volume d'eau versé dans le contenant sur un intervalle de 30 secondes a été converti par la suite en gallons par minute. La température de l'eau de lavage a été mesurée pour l'eau chaude et l'eau froide à l'aide d'une sonde de température couplée à un logger.

**Tableau 15. Description des paramètres de lavage utilisés dans chacune des fermes**

Site	Temp. (°C)		Savon	P test (psi)	Q test (gal/min)	Distance (cm)	PI estimé* (MPa)
	Chaud	Froid					
A	61,3	15,2	Gensol P	3100	5,3	15	30-31
B	51,7	18,5	Gensol P	3500	4,0	15	33-34
C	-	19,8	Foam Chlor	4000	-	15	-
D	46,4	9,3	BioSolve Plus	2500-2600	3,2	30	21
E	45,2	10,5	d.m.	1700	1,6	-	-

\*Pression d'impact (PI) estimée en fonction de la pression réelle de travail mesurée et la distance déclarée selon le Tableau présenté à l'annexe 1

## Protocoles des lavages

Selon les procédures décrit par les producteurs, trois protocoles ont été utilisés pour les lavages :

- Protocole 1 : Trempage à l'eau, lavage à pression, savonnage, temps de pause de 15 minutes, rinçage avec la laveuse à pression;
- Protocole 2 : Trempage à l'eau, pré-lavage, savonnage, temps de pause de 30 minutes, lavage à pression;
- Protocole 3 : le savon était appliqué directement après le trempage. Le temps de pause était de 10-15 minutes. Le lavage à pression était effectué par la suite.

## Mesures des lavages

À chaque ferme, un compteur d'eau a été installé. Le volume d'eau utilisé pour chaque lavage a été calculé en soustrayant le volume au début du lavage du volume final. Ainsi que les durées de lavage ont été mesurées afin d'évaluer la vitesse de lavage réelle.

### 6.2.3 Analyse de l'efficacité de lavage

Les analyses visant à évaluer l'efficacité du lavage ont été effectuées sur différentes surfaces, lorsque présent dans le bâtiment, telles que le PVC, l'acier inoxydable, le béton vibré-pressé, le béton coulé sur place, la fonte et l'acier galvanisé. Deux méthodes ont été utilisées : 1) la bioluminescence de l'adénosine triphosphate (ATP) et 2) la réaction enzymatique utilisant le Biofinder.

#### Bioluminescence de l'ATP

L'analyse d'ATP a été réalisée sur les différents types de surfaces une heure et 24 heures après la fin du lavage, mais avant l'application de l'assainisseur. Les surfaces des matériaux devaient être sèches ou légèrement humides, mais pas détrempées. L'analyse a été effectuée sur une surface d'environ 10 cm x 10 cm et cinq répétitions ont été effectuées pour chaque matériau. Les surfaces visiblement souillées ont été évitées lors de l'échantillonnage.

#### Réaction enzymatique – Biofinder

L'analyse utilisant le Biofinder sur les différentes surfaces a été réalisée une heure après la fin du lavage. L'application a été effectuée directement sur la surface en vaporisant à une distance de 10 à 15 cm. Le test a été répété six à dix fois par matériau. Pour évaluer l'efficacité du lavage dans un environnement réel, une échelle de degré de réaction de zéro à trois a été créée. Le score zéro a été attribué en l'absence de réaction, c'est-à-dire, aucune bulle n'a été produite, et le score trois a été attribué en présence d'une abondante formation de bulles, créant une mousse blanche. La description de l'échelle de notation est présentée dans le Tableau 16. Des photos ont été prises une minute après la réaction afin d'évaluer la présence de biofilm.

**Tableau 16. Description de l'échelle de cotes utilisée pour grader le niveau de réaction du Biofinder**

Échelle	Interprétation
0	Aucune bulle ou mousse blanche
1	Présence de rares bulles d'air
2	Présence de plusieurs bulles ou mousse blanche
3	Présence de mousse blanche sur presque toute la surface testée

## 6.2.4 Analyse statistique

Un dispositif complètement aléatoire (DCR) a été utilisé pour étudier l'effet de la température de l'eau de lavage (chaude et froide) et du type de protocole (1, 2 et 3) sur les variables de consommation d'eau et de temps de lavage, ainsi que sur les analyses d'efficacité de lavage, notamment la bioluminescence d'ATP à 1 h et à 24 h et l'analyse de la réaction enzymatique en utilisant le Biofinder. Ce design a été réalisé selon un schéma factoriel 2x3. Une analyse de variance (ANOVA) a été effectuée pour évaluer l'existence d'une interaction entre les facteurs. Ensuite, une comparaison des moyennes a été réalisée en utilisant le test de Tukey, avec un niveau de signification de 5 %. Comme les dimensions des chambres lavées varient selon les sites, les variables de consommation d'eau et de temps de lavage ont été rapportées à une base égale en considérant les m<sup>2</sup> lavés. Le logiciel R Studio (version 1.4.1106) a été utilisé pour réaliser les analyses.

## 6.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 6.3.1 Évaluation de la consommation d'eau

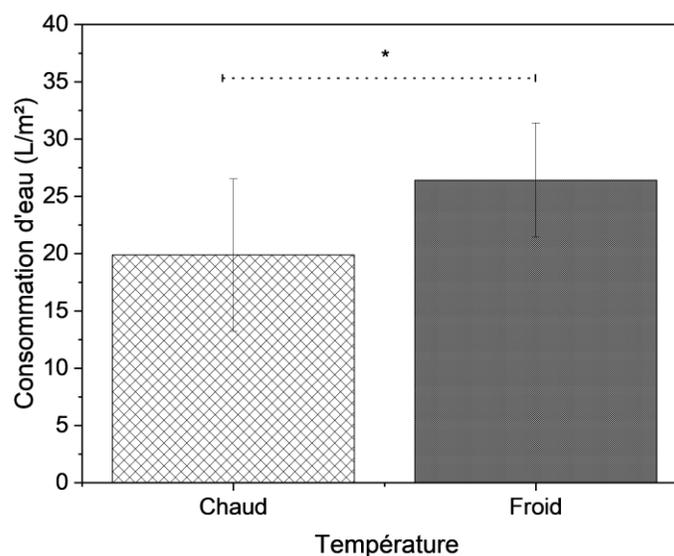
Le tableau 17 présente les quantités d'eau, exprimées en litres, utilisées pour laver un mètre carré de surface en fonction de la température de l'eau et du type de protocole de lavage. L'analyse a pris en compte uniquement l'eau utilisée pendant le processus de lavage, c'est-à-dire la quantité d'eau nécessaire pour effectuer l'étape de lavage elle-même. La consommation d'eau pour d'autres étapes telles que le prélavage présent dans le protocole 2 ou le rinçage n'a pas été incluse dans cette analyse. En effet, les paramètres et la température de l'eau utilisés pour l'étape de prélavage sont différents de ceux utilisés pour les lavages.

**Tableau 17. Valeurs moyennes et écarts-types de la consommation d'eau en litres par mètre carré lavé**

	Chaud	Froid
Protocole 1	27,90 ± 4,05	28,93 ± 8,85
Protocole 2	14,71 ± 0,89	26,88 ± 1,51
Protocole 3	17,08 ± 2,41	24,20 ± 2,81

Après avoir analysé les valeurs de consommation d'eau par m<sup>2</sup> lavé, il a été constaté qu'il n'y avait pas d'interaction significative entre les facteurs de la température d'eau et du type de protocole de lavage. Les résultats de l'analyse ont montré que seule la température de l'eau avait un effet significatif sur la consommation d'eau, avec des

différences statistiquement significatives entre les différentes températures testées. Les résultats pour le type de protocole de lavage n'étaient pas statistiquement significatifs. Les résultats ont montré que les lavages effectués avec de l'eau chaude ont consommé significativement moins d'eau (en litres) pour laver un m<sup>2</sup> ( $p < 0,05$ ), comme illustré à la Figure 32. En effet, une réduction significative de 31% de la consommation d'eau par m<sup>2</sup> a été observée en comparaison avec l'utilisation de l'eau froide.



**Figure 32. Consommation d'eau (L/m<sup>2</sup>) en utilisant l'eau chaude et froide**

\* Différence statistiquement significative détectée par le test Tukey à un niveau de confiance de 95%.

### 6.3.2 Évaluation du temps de lavage

Le Tableau 18 présente les valeurs moyennes du temps de lavage en minutes pour laver un m<sup>2</sup> en fonction de la température de l'eau et du type de protocole de lavage. Les temps de lavage ont été mesurés pendant le processus de lavage à haute pression. Cette mesure du temps de lavage a été enregistrée afin d'établir une corrélation avec la vitesse de lavage. De la même manière que pour la consommation d'eau, il convient de souligner que le temps de lavage utilisé pendant le pré-lavage dans le protocole deux n'a pas été pris en compte dans l'analyse des temps de lavage présenté dans le Tableau 18.

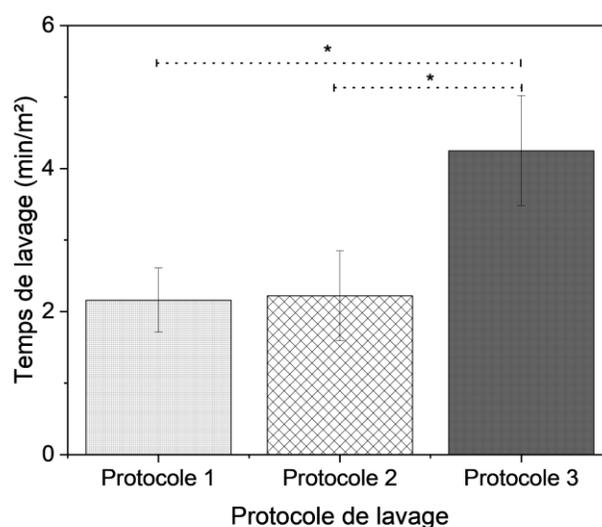
**Tableau 18. Valeurs moyenne et écart-type de temps de lavage en minute par m<sup>2</sup>**

	Chaud	Froid
Protocole 1	2,00 ± 0,0	2,24 ± 0,6
Protocole 2	1,61 ± 0,0	2,63 ± 0,4
Protocole 3	3,94 ± 0,56	4,56 ± 0,9

Après analyse des valeurs de temps de lavage par m<sup>2</sup>, il a été constaté qu'il n'y avait pas d'interaction entre les facteurs, à savoir la température de l'eau et le type de protocole de lavage. Dans ce contexte, une analyse indépendante de ces facteurs a été effectuée. Les résultats ont montré que le temps de lavage a été significativement influencé par le type de protocole de lavage ( $p < 0,001$ ), tandis que la température de l'eau n'a pas eu d'influence significative sur le temps de lavage. La Figure 33 représente le temps de lavage (en minutes) nécessaire pour laver un m<sup>2</sup> en utilisant différents protocoles de lavage.

Les résultats montrent que le temps de lavage par m<sup>2</sup> est significativement plus élevé dans le protocole 3 par rapport aux deux autres protocoles ( $p < 0,05$ ). Par conséquent, l'application de savon avant le lavage dans le protocole 3 n'a pas facilité le processus de nettoyage ni l'élimination du lisier sur les surfaces. Dans le cas du protocole 2, le pré-lavage a influencé le processus de lavage, en réduisant considérablement le temps nécessaire. On observe une réduction du temps de lavage d'environ 48,5 % pour les protocoles 1 et 2 par rapport au protocole 3.

En considérant le temps de lavage en fonction de la température de l'eau, on remarque que l'utilisation de l'eau chaude prend 24% de temps en moins que l'utilisation de l'eau froide. Cependant, cette différence n'est pas statistiquement significative, ce qui suggère qu'elle pourrait être due au hasard et ne constitue pas une différence réelle ou substantielle. Dans l'étude menée par Hurnik (2005), l'utilisation d'eau chaude a permis de réduire le temps de nettoyage d'environ 22 % lorsqu'aucun trempage n'a été effectué. Cependant, l'auteur a également noté que bien que l'eau chaude soit plus agréable à appliquer, elle créait une brume qui rendait plus difficile de voir. Ce phénomène a également été observé chez le groupe lors des lavages à l'eau chaude.



**Figure 33. Temps de lavage (min/m<sup>2</sup>) selon les différents protocoles de lavage utilisé.**

\* Différence statistiquement significative détectée par le test Tukey à un niveau de confiance de 95%.

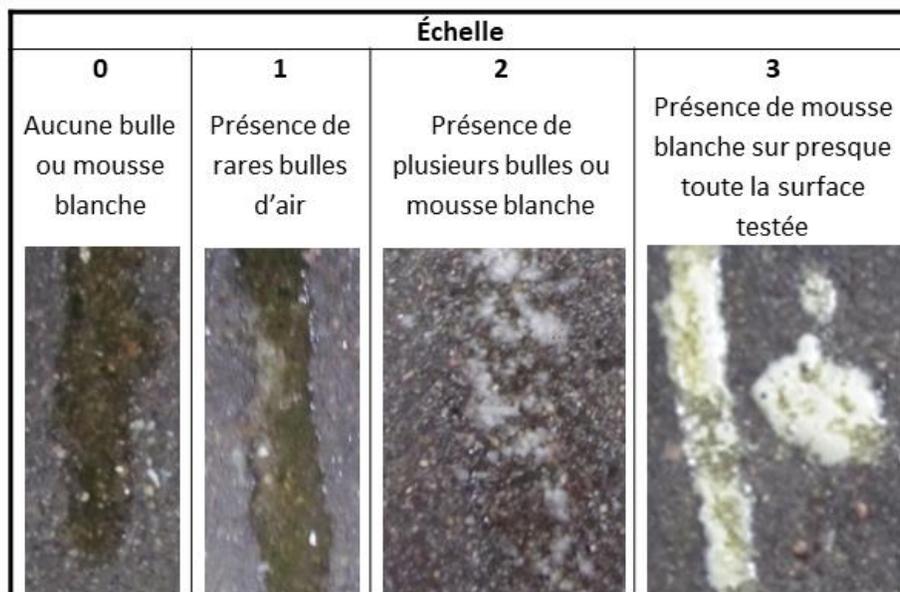
### 6.3.3 Adaptation des méthodes à la ferme

Pour réaliser des analyses en ferme, il a été nécessaire d'adapter les interprétations et les limites de propriété établies lors des essais en laboratoire pour les méthodes de mesure de la bioluminescence de l'ATP et de la réaction enzymatique utilisant le Biofinder. Cependant, il est important de noter que les conditions de mesure en ferme peuvent varier considérablement par rapport à celles des lavages effectués en laboratoire dans des conditions contrôlées.

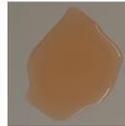
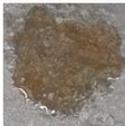
Pour réaliser l'analyse Biofinder (visuelle), une échelle de notation allant de zéro à trois a été mise en place, comme illustré dans la Figure 34. En comparant les résultats obtenus avec différentes dilutions du lisier au laboratoire, il est possible de les comparer visuellement avec des dilutions de lisier de 1/640, 1/80 et 1/10, correspondant respectivement aux échelles 1, 2 et 3 (voir la Figure 35). Les comptages bactériens pour les dilutions de lisier (1/640, 1/80 et 1/10) étaient de 0, 1 et 2,5 log CFU/ml pour *Escherichia coli*, et de 1,6, 2,7 et 3,9 log CFU/ml pour les coliformes totaux. Nous considérons que le lavage est satisfaisant lorsque l'analyse visuelle est notée 1, tandis que les échelles 2 et 3 sont jugées inadéquates.

En établissant un lien entre les dilutions de lisier et les valeurs d'ATP mesurées en laboratoire pour l'échelle de 1, il est possible d'établir de nouvelles valeurs de référence pour les conditions à la ferme. Dans ce contexte, une valeur d'ATP inférieure à 1500 RLU est considérée comme acceptable pour les porcheries.

Il est important de souligner que ces méthodes d'analyse, bien que pratique, ne permettent pas une quantification précise des niveaux de contamination bactérienne. Elles peuvent néanmoins être utile pour évaluer rapidement l'efficacité d'un lavage et pour surveiller l'évolution des niveaux de contamination dans le temps.



**Figure 34.** Illustration de l'évaluation d'une réponse du Biofinder

Échelle	Lisier	BCP	BVP	Acier inoxydable	Fonte	PVC	HDPE	<i>E. Coli</i>	Coliformes
								log CFU/ml	
0	Négatif							-	-
1	1/640	 408 RLU	 1402 RLU	 2415 RLU	 1541 RLU	 1533 RLU	 1876 RLU	0	1,6
2	1/80	 4506 RLU	 5798 RLU	 6393RLU	 6522 RLU	 4425 RLU	 5803 RLU	1	2,7
3	1/10	 7505 RLU	 7583 RLU	 7141 RLU	 7160 RLU	 7298 RLU	 7672 RLU	2,5	3,9

**Figure 35. Fiche représentative des analyses de Biofinder, d'ATP et de comptage sur plaques en laboratoire**

### 6.3.4 Évaluation de l'efficacité de lavage

#### Bioluminescence de l'ATP

Les résultats de l'analyse de bioluminescence de l'ATP effectuée sur chaque matériau, 1 heure et 24 heures après le lavage, ont montré qu'il n'y avait pas d'interaction significative entre les facteurs de la température de l'eau et du type de protocole de lavage. Le Tableau 19 présente les valeurs moyennes en RLU de l'analyse ATP réalisée une heure après le lavage pour chaque type de matériau, en fonction de la température de l'eau (chaude ou froide).

Les résultats ont démontré qu'une heure après le lavage avec de l'eau chaude, les valeurs d'ATP étaient significativement plus faibles ( $p < 0,05$ ). Ainsi, le lavage avec de l'eau chaude a été plus efficace pour réduire les niveaux d'ATP. Pour les surfaces en acier inoxydable, les niveaux d'ATP tendent à être plus faibles une heure après le lavage avec de l'eau chaude par rapport à l'eau froide. En revanche, aucune différence statistiquement significative n'est observée pour les surfaces en acier galvanisé.

Bien qu'une réduction des niveaux d'ATP ait été observée une heure après le lavage avec de l'eau chaude, seules les surfaces en PVC, en acier inoxydable et en fonte ont atteint des niveaux de propreté inférieurs à la valeur seuil de 1500 RLU considérée comme acceptable. En revanche, lorsque les porcherie ont été lavées avec de l'eau froide, toutes les valeurs d'ATP en RLU étaient supérieures à ce niveau de propreté acceptable.

**Tableau 19. Valeurs moyennes et écart-types en RLU pour l'analyse de l'ATP effectuée une heure après le lavage de différentes surfaces dans les bâtiments porcins**

Type de matériau	Chaud	Froid	
PVC	378 ± 639	1129 ± 1698	*
Acier inoxydable	1411 ± 1988	2393 ± 2652	.
Fonte	1097 ± 573	4915 ± 2421	*
Acier galvanisé	2668 ± 1930	2685 ± 2012	
Béton coulé sur place	2084 ± 1737	4523 ± 2247	*
Béton vibré pressé	2546 ± 2298	3942 ± 2643	*

Différence statistiquement significative détectée par le test Tukey avec un niveau de signification de 5 % (\*) et 10% (.)

En analysant les valeurs d'ATP effectuées à 24 heures sur les différentes surfaces lavées (Tableau 20), aucune différence significative n'a été observée entre les deux températures d'eau, sauf pour le béton coulé sur place, qui a présenté une légère tendance à avoir des niveaux d'ATP plus faibles 24 heures après le lavage à l'eau chaude par rapport au lavage à l'eau froide ( $p < 0,1$ ).

De plus, les valeurs en RLU de toutes les surfaces lavées à l'eau chaude, à l'exception du béton vibré pressé, ont atteint des niveaux de propreté inférieurs à la valeur seuil de 1500 RLU considérée comme acceptable. En revanche, pour le lavage à l'eau froide, seulement les surfaces en PVC, en acier inoxydable et en fonte étaient considérées comme acceptables.

**Tableau 20. Valeurs moyennes et écart-types en RLU pour l'analyse de l'ATP effectuée 24 heures après le lavage de différentes surfaces dans les bâtiments porcins**

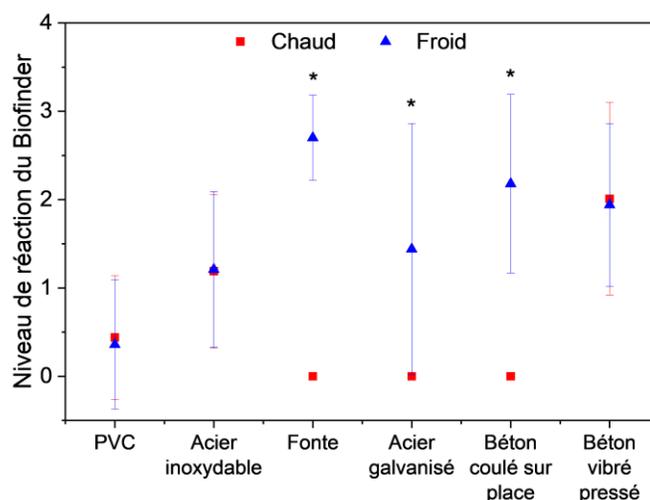
Type de matériau	Chaud	Froid	
PVC	346 ± 586	313 ± 288	
Acier inoxydable	989 ± 1436	740 ± 844	
Fonte	762 ± 612	1363 ± 1065	
Acier galvanisé	1390 ± 1180	1987 ± 2147	
Béton coulé sur place	872 ± 654	4110 ± 3777	.
Béton vibré pressé	3448 ± 2454	3723 ± 2381	

Test Tukey avec un niveau de signification de 10% (.)

## Réaction enzymatique – Biofinder

La Figure 37 présente les niveaux moyens de réaction observés sur des surfaces lavées à l'eau chaude et froide, évalués sur une échelle préétablie allant de 0 à 3. L'analyse visuelle de l'efficacité du lavage en utilisant le Biofinder a révélé une réduction significative du niveau de réaction pour les matériaux en fonte, en acier galvanisé et en béton coulé sur place après le lavage à l'eau chaude, comparé au lavage à l'eau froide. En outre, les lavages à l'eau chaude ont permis d'obtenir des niveaux inférieurs à l'échelle 1, considérés comme satisfaisants, pour tous les

matériaux sauf l'acier inoxydable et le béton vibré pressé. Pour les lavages à l'eau froide, seules les surfaces en PVC étaient considérées comme satisfaisantes.



**Figure 36. Niveau moyen de réaction de l'analyse visuelle du Biofinder pour chaque matériau lavé à l'eau chaude et l'eau froide**

\*Différence statistiquement significative détectée par le test Tukey avec un niveau de signification de 5 %.

## 6.4 SYNTHÈSE

En somme, les résultats ont montré que les lavages à l'eau chaude ont significativement réduit la consommation d'eau, avec une réduction importante de 31 % par rapport aux lavages à l'eau froide. De plus, l'utilisation d'eau chaude a également réduit le temps nécessaire pour la phase de lavage de 24 %. Les résultats ont également montré une réduction du temps de lavage selon le type de protocole adopté, avec une réduction significative du temps d'environ 48,5 % pour les protocoles 1 et 2 par rapport au protocole 3.

En outre, le lavage avec de l'eau chaude s'est avéré plus efficace pour réduire les niveaux d'ATP effectués une heure après le lavage sur les surfaces en PVC, en béton coulé sur place, en béton vibré pressé et en fonte, par rapport aux mêmes types de surfaces lavées à l'eau froide. Pour l'analyse utilisant le Biofinder, les matériaux en fonte, en acier galvanisé et en béton coulé sur place a présenté une réduction significative de leur niveau de réaction après le lavage à l'eau chaude, par rapport au lavage à l'eau froide.

Les interprétations et les limites de propriété établies pour les méthodes de mesure de la bioluminescence de l'ATP et de la réaction enzymatique utilisant le Biofinder ont été adaptées pour leur utilisation à la ferme. Pour la méthode Biofinder, le lavage était considéré satisfaisant lorsque l'analyse visuelle était notée 1, tandis que les échelles 2 et 3 étaient jugées inadéquates. Pour la méthode utilisant l'ATP, un niveau de propreté inférieur à 1500 RLU (unités de lumière relatives) a été déterminé comme étant acceptable pour un bâtiment porcin.

Ainsi, les résultats ont montré que les lavages à l'eau chaude ont permis d'obtenir des niveaux satisfaisants inférieurs à l'échelle 1 pour tous les matériaux, à l'exception de l'acier inoxydable et du béton vibré pressé, lors de l'analyse utilisant le Biofinder. En revanche, avec les lavages à l'eau froide, seules les surfaces en PVC étaient considérées comme satisfaisantes. Pour l'analyse d'ATP, les résultats à 24 heures ont montré que, après le lavage à l'eau chaude, les valeurs en RLU de toutes les surfaces lavées, à l'exception du béton vibré pressé, étaient inférieures au niveau de propreté considérée comme acceptable. En revanche, pour le lavage à l'eau froide, les surfaces en PVC, en acier inoxydable et en fonte étaient considérées comme acceptables.

## 7 ÉTAPE 5 –COMPARAISON DE L’EFFET DU LAVAGE DES MATÉRIAUX NEUFS ET USÉS

### 7.1 INTRODUCTION

Plusieurs normes et tests ont été établis pour garantir la qualité des matériaux de construction ainsi que leur durabilité dans différentes conditions environnementales. Dans les porcheries, les matériaux sont constamment en contact avec les mouvements des animaux, des travailleurs et des machines, ainsi que sont soumis à plusieurs cycles de lavage, ce qui peut entraîner leur usure. De plus, les déjections et les résidus de nourriture contribuent à la dégradation des matériaux.

L'usure des matériaux peut être définie comme la perte progressive et continue de matériau en surface, ou comme une déformation résultant de l'interaction mécanique entre deux surfaces en mouvement (Grymark et al 2022; Wu et al. 2022). De nombreux facteurs peuvent affecter l'usure, tels que la composition, la vitesse de glissement, la dureté, le module d'élasticité, la charge et la température (Meshref et al., 2020 ; Karaca et al., 2012). Ainsi, l'usure peut entraîner un changement de la rugosité de la surface, qui peut avoir un impact sur le processus de nettoyage. Par conséquent, l'objectif de cette étude était d'analyser l'effet de l'efficacité de nettoyage à travers l'analyse de l'adénosine triphosphate (ATP) sur des matériaux neufs et usés.

Puisqu'il était difficile de reproduire des plaques de laboratoire représentant un usage en milieu commercial, une approche comparative basée sur l'efficacité de lavage fut adoptée. Cette dernière consiste à comparer pour un matériau spécifique, la différence entre l'efficacité de lavage en laboratoire et celle obtenue en conditions réelles d'élevage. Cette différence consistera alors la quantification de l'impact de l'usure d'un matériel.

### 7.2 MÉTHODOLOGIE

#### 7.2.1 Design expérimental

D'abord, les termes de matériau neuf et matériau usé considéré pour cette étude ont été définis :

- Matériau neuf : Un matériau a été considéré comme neuf s'il n'a jamais été utilisé dans un bâtiment porcin, même s'il a été fabriqué il y a plusieurs années. Ainsi, les matériaux n'ont jamais subi les actions du mouvement et/ou le contact avec les animaux, les ouvriers et les machines, bien que n'ont jamais eu le contact direct avec les déjections ou les résidus de nourriture qui peuvent occasionner l'usure de matériaux.
- Matériau usé : Un matériau a été considéré comme usé s'il a été déjà utilisé dans un bâtiment porcin. Par conséquent le matériau a subi les effets de l'usure causée par le mouvement et le contact avec les animaux, les ouvriers et les machines, ainsi que par le contact direct avec les déjections ou les résidus de nourriture.

Pour cette étape, les données cumulées des analyses d'ATP à 1 et 24 heures après les procédures de lavages en laboratoire et à la ferme ont été utilisées. Les données obtenues au laboratoire ont été considérées comme matériaux neufs et les données obtenues à la ferme ont été considérées comme matériaux usés. Afin d'assurer la comparaison entre les deux types de matériaux, il a été considéré le même protocole de lavage (trempage à l'eau, lavage à pression, savonnage, rinçage), pour le lavage à la ferme a été le protocole 1. Ainsi que, les paramètres de lavage ont été le même ou proche, en cet effet, les ranges considérés pour l'analyse ont été : i) température d'eau entre 7 et 18 °C (eau froide) et entre 47 et 61 °C (eau chaude); et ii) pression d'impact entre 22 à 37 MPa. La vitesse n'a pas été prise en compte, car elle était plus difficile à mesurer sur la ferme.

## 7.2.2 Analyse statistique

Un design complètement randomisé (DCR) a été utilisé pour étudier l'effet de l'efficacité de nettoyage de matériaux neufs et usés à travers de l'analyse de la bioluminescence d'ATP à 1 heure et à 24 heures. Tendu en compte l'effet de la température d'eau sur l'efficacité de lavage, l'analyse a été séparée en deux groupes : i) l'efficacité de nettoyage de matériaux neufs et usés lavés à l'eau chaude et ii) l'efficacité de nettoyage de matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide. Une analyse de variance (ANOVA) a été effectuée pour évaluer l'existence d'une différence entre les matériaux neufs et usés, à un niveau de signification de 5%. Ensuite, une analyse de corrélation de Pearson a été faite pour voir si l'efficacité de nettoyage du matériel (valeur d'ATP) pourrait être corrélée avec l'état du matériau : neuf et usé. Finalement, une analyse de régression a été faite pour voir la relation de l'efficacité de nettoyage entre les matériaux neufs et usés. Le logiciel R Studio (version 2023.03.0) a été utilisé pour réaliser les analyses.

## 7.3 RÉSULTATS

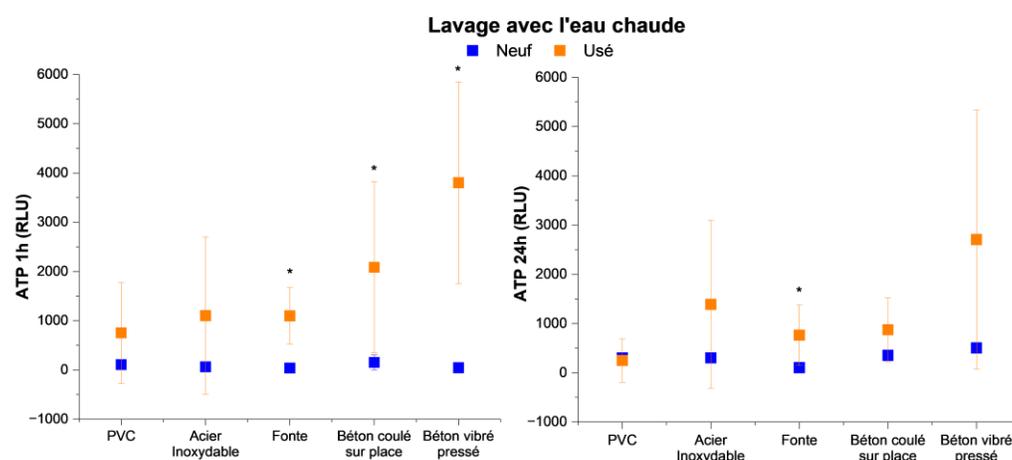
### 7.3.1 L'efficacité de nettoyage de matériaux neufs et usés lavés à l'eau chaude

La Figure 37 présente la comparaison entre les valeurs de bioluminescence de l'ATP effectuée à 1 heure et 24 heures des matériaux neufs et usés lavés à l'eau chaude. Les résultats de bioluminescence de l'ATP effectués une heure après le lavage à l'eau chaude ont montré une différence statistique entre les surfaces neuves et usées en fonte, béton coulé sur place et béton vibré pressé ( $p < 0,05$ ). Les matériaux usés ont présenté des valeurs d'ATP plus hautes par rapport avec les matériaux neufs, possiblement, la perte de matériau en surface ou la déformation de la surface a favorisé la protection et la persistance de la bactérie. Ces effets étaient plus marqués sur les matériaux utilisés comme plancher, lorsque le lavage à l'eau chaude a été fait.

En revanche, après 24 heures, seulement la fonte a démontré une différence significative entre les surfaces neuves et usées ( $p < 0,05$ ). Même si les valeurs d'ATP des surfaces en béton vibré pressé et béton coulé sur place ont été numériquement plus haut sur les matériaux usés, cette différence n'est pas statistiquement significative. Pourtant, pour les surfaces en béton (vibré pressé et coulé sur place), l'effet du temps d'analyse (24 heures) a réduit l'effet de détection par le test d'ATP. Probablement deux hypothèses peuvent expliquer ce phénomène. Le premier peut être associé à la réduction du nombre des bactéries après 24 heures causé par l'effet du savon et/ou

du processus de séchage adopté. Le deuxième peut-être en raison de l'augmentation des déformations causée par l'usure qui est associée à un moindre nombre de bactéries sur la surface a occasionné une réduction de la capacité du test d'ATP de ramasser les bactéries de la surface lorsque les surfaces deviennent complètement sèches, comme le test de l'étape 2.

Les résultats de l'ATP effectués à une heure et 24 heures sur surfaces en PVC et acier inoxydable n'ont pas eu de différence entre les matériaux neufs ou usés. En effet, ces matériaux sont normalement impliqués, comme murs de séparation de parcs, mangeoires et abreuvoirs, dont les effets d'abrasion causés par des animaux ou des ouvriers sont moins expressifs. Par conséquent, l'état du matériau (neuf ou usé) n'a pas influencé l'efficacité de nettoyage lorsque le lavage à l'eau chaude a été utilisé.



**Figure 37. Comparaison de l'analyse d'ATP effectuée à 1 heure et à 24 heures entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau chaude**

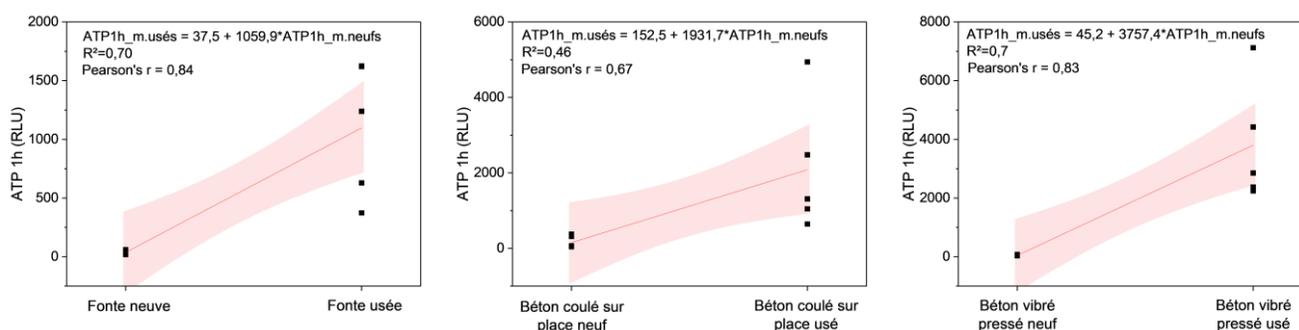
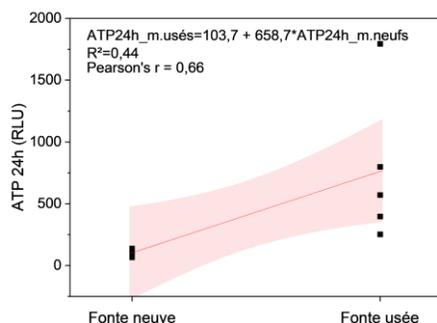
Différence statistiquement significative à un niveau de signification de 5 % (\*)

Le Tableau 21 montre les valeurs de corrélation de Pearson pour chaque matériau pour les valeurs d'ATP effectuées à une heure et à 24 heures. Les résultats proches de 1 ou -1 démontrent une forte corrélation positive ou négative entre l'état du matériau (neuf et usé) et les valeurs d'ATP, tandis que les valeurs proches de zéro représentent une faible ou nulle corrélation entre l'état du matériau et les valeurs d'ATP. Une forte corrélation positive a été observée pour les matériaux en fonte ( $r=0,84$ ), béton coulé sur place ( $r=0,67$ ) et béton vibré pressé ( $r=0,83$ ) pour les valeurs d'ATP effectuées à une heure, c'est-à-dire, que l'usage du matériau était corrélé à l'augmentation de la valeur d'ATP 1 heure. Cependant, une diminution de la corrélation a été constatée dans l'analyse de l'ATP effectuée à 24 heures.

**Tableau 21. Valeurs de corrélation de Pearson entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau chaude**

Matériau	ATP 1h (neuf x usés)	ATP 24h (neuf x usés)
PVC	0,37	-0,08
Acier inoxydable	0,39	0,38
Fonte	0,84	0,66
Béton coulé sur place	0,67	0,55
Béton vibré pressé	0,83	0,60

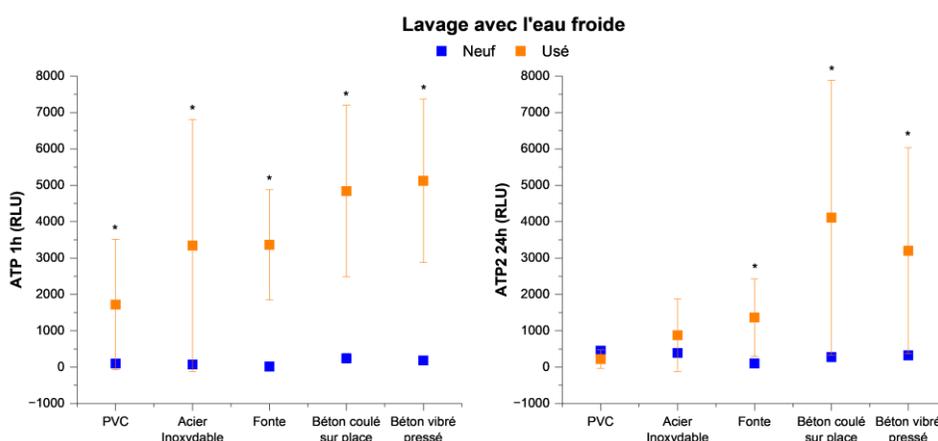
Une analyse de régression a été faite pour voir la relation l'efficacité de nettoyage entre les matériaux neufs et usés. Les Figures 38 et 39 présentent les graphiques de régression, les modèles mathématiques et les coefficients de régression ( $R^2$ ) pour les matériaux dont les modèles ont été significatifs, autrement dit les valeurs de P-value était moindre que 0,05. Les matériaux en fonte, en béton coulé sur place et en béton vibré pressé, ont présenté une tendance linéaire à la hausse de la valeur de l'ATP effectuée à une heure associée à l'usage de matériau. Toutefois, pour l'analyse de l'ATP effectuée à 24 heures, cette tendance se poursuit seulement pour les matériaux en fonte. Par conséquent, les matériaux en fonte utilisés comme planchers ont été plus susceptibles d'être influencés par l'usure du matériau sur l'efficacité de lavage, c'est-à-dire, il y a une relation entre l'usure et l'augmentation de la valeur d'ATP.

**Figure 38. Analyse de régression de l'analyse d'ATP effectuée à 24 heures entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide****Figure 39. Analyse de régression de l'analyse d'ATP effectuée à 24 heures entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide**

### 7.3.2 L'efficacité de nettoyage de matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide

La Figure 40 présente la comparaison entre les valeurs de bioluminescence de l'ATP mesurées une heure et 24 heures après le lavage à l'eau froide de matériaux neufs et usés. Les résultats de bioluminescence de l'ATP obtenus une heure après le lavage ont montré une différence statistique entre les surfaces neuves et usées de tous les matériaux ( $p < 0,05$ ). Autrement dit, lorsque les lavages ont été faits à l'eau froide, l'effet de l'usure des matériaux a influencé la capacité d'enlever les résidus et de détruire les biofilms et bactéries présentes sur la surface. Par conséquent, tous les matériaux usés étudiés ont présenté un niveau plus haut de micro-organismes sur la surface après le lavage, par rapport au matériau neuf. En revanche, les résultats de l'ATP effectués à une heure avec l'eau chaude démontraient une différence plus marquée sur les matériaux utilisés en tant que planchers. En effet, les résultats de l'étape 4 montraient que les surfaces lavées à l'eau chaude présentaient un niveau plus faible de micro-organismes, avec des valeurs d'ATP plus basses que celles lavées à l'eau froide.

Toutefois, les résultats de bioluminescence de l'ATP effectués à 24 heures ont montré une différence statistique entre les surfaces neuves et usées en fonte, béton coulé sur place et béton vibré pressé ( $p < 0,05$ ). Malgré la réduction du nombre des bactéries après 24 heures causé par l'effet du savon et/ou du processus de séchage adopté, le niveau de micro-organismes à la fin du lavage a été assez important pour qu'il soit possible de bien échantillonner par écouvillon les bactéries sur les surfaces en béton avec le test d'ATP.



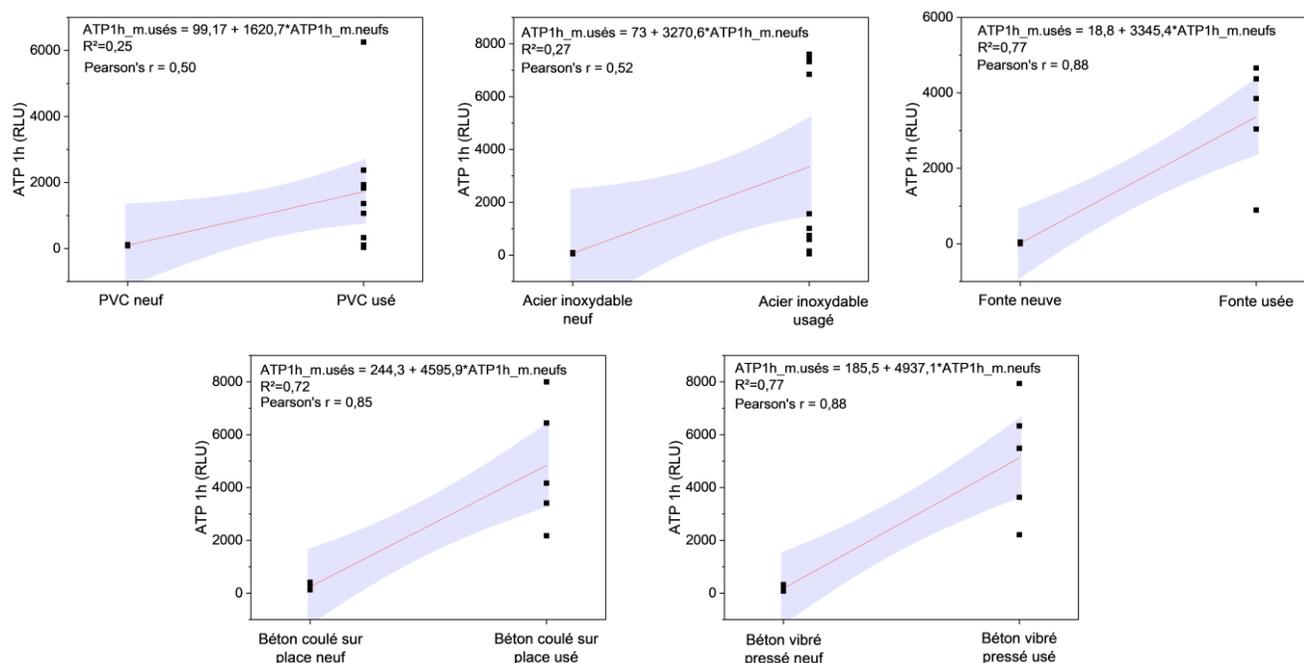
**Figure 40. Comparaison de l'analyse d'ATP effectuée à 1 heure et à 24 heures entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide**

Le Tableau 22 montre les valeurs de corrélation de Pearson pour chaque matériau pour les valeurs d'ATP effectués à une heure et à 24 heures. Une forte corrélation positive a été observée pour les matériaux en fonte, béton coulé sur place et béton vibré pressé pour les valeurs d'ATP effectués à 1 heure et à 24 heures. Tandis que pour les matériaux en PVC en acier inoxydable une corrélation positive a été obtenue.

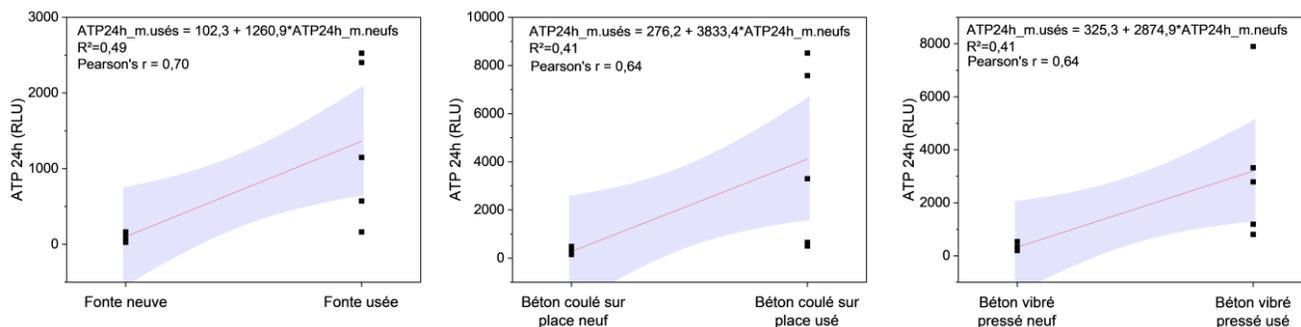
**Tableau 22. Valeurs de corrélation de Pearson entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide**

Matériau	ATP 1h (neuf x usés)	ATP 24h (neuf x usés)
PVC	0,50	-0,46
Acier inoxydable	0,52	0,30
Fonte	0,88	0,70
Béton coulé sur place	0,85	0,64
Béton vibré pressé	0,88	0,64

Les Figures 41 et 42 présentent les graphiques de régression entre l'état du matériau et les valeurs d'ATP effectués à une heure et à 24 heures pour les lavages à l'eau froide, ainsi que, les modèles mathématiques et les coefficients de régression ( $R^2$ ). Pour l'analyse de bioluminescence de l'ATP effectuée à une heure, tous les matériaux ont présenté une tendance linéaire à la hausse de la valeur de l'ATP associée à l'usage du matériau. Autrement dit, il a une relation entre l'usure et l'augmentation de la valeur d'ATP. Cependant, pour l'analyse d'ATP effectuée à 24 heures, cette tendance prévaut sur les matériaux en fonte, béton coulé sur place et béton vibré pressé, notamment ceux utilisés en plancher.



**Figure 41. Analyse de régression de l'analyse d'ATP effectuée à 1 heure entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide**



**Figure 42. Analyse de régression de l'analyse d'ATP effectuée à 24 heures entre les matériaux neufs et usés lavés à l'eau froide**

## 7.4 SYNTHÈSE

En général, les valeurs de bioluminescence d'ATP étaient plus hautes sur les matériaux usés par rapport aux neufs pour le lavage à l'eau chaude et à l'eau froide. Les cycles de lavages, le mouvement des animaux, des ouvriers et parfois des équipements favorisent l'usure de matériaux. Ceci résulte en une perte de matériau en surface ou encore des déformations de la surface, par conséquent un niveau plus haut de micro-organismes demeure sur la surface après le lavage. De plus, les résultats ont montré une tendance linéaire à la hausse de la valeur d'ATP associée au fait que le matériau soit usé, principalement pour les matériaux utilisés comme plancher tels que la fonte, le béton coulé sur placé et le béton vibré pressé.

Le Tableau résumé 23, [X] indique la situation où il y a un impact de l'usure sur la propreté du matériau selon la température d'eau de lavage et temps d'analyse d'ATP (une heure ou 24 heures).

**Tableau 23. Résumé indiquant la situation où il y a un impact de l'usure sur la propreté du matériau.**

Matériaux	Lavage à l'eau chaude		Lavage à l'eau froide	
	ATP 1 heure	ATP 24 heures	ATP 1 heure	ATP 24 heures
PVC			X	
Acier Inoxydable			X	
Fonte	X	X	X	X
Béton coulé sur place	X		X	X
Béton vibré pressé	X		X	X

De tous les matériaux, l'usure de la fonte a été la plus susceptible d'influencer l'efficacité de lavage, c'est-à-dire, qu'il existe une relation entre l'usure et l'augmentation de la valeur d'ATP. Ces résultats ont démontré une différence significative entre les surfaces neuves et usées pour les analyses ATP effectuées à une heure et à 24 heures autant pour le lavage à l'eau chaude qu'à l'eau froide.

Pour les autres matériaux utilisés comme plancher, tels que le béton coulé sur place et le béton vibré pressé, l'usure du matériau a un effet sur l'efficacité de nettoyage, en particulier lorsqu'il est effectué à l'eau froide. Une

différence significative entre les surfaces neuves et usées a été observée dans les analyses ATP effectuées à une et 24 heures lavées à l'eau froide.

Pour le PVC et l'acier inoxydable souvent utilisés comme murs de séparations de parcs, mangeoires et abreuvoirs, dont les effets d'abrasion causés par des animaux ou des ouvriers sont moins expressifs. Une différence significative entre les surfaces neuves et usées a été observée seulement dans les analyses ATP effectuées à une heure lavées à l'eau froide. L'état du matériau (neuf ou usé) n'a pas influencé dans l'efficacité de nettoyage lorsque le lavage à l'eau chaude a été utilisé.

De plus, ces résultats suggèrent que l'utilisation d'eau chaude pour le lavage peut offrir des avantages significatifs en termes de l'efficacité de nettoyage concernant les matériaux usés. Par conséquent, les méthodes de lavage développé dans le cadre ce projet permettra d'atteindre un niveau de propreté adéquat pour l'ensemble des matériaux neufs et usés surtout si cela se fait à l'eau chaude.

## 8 ÉTAPE 6 - ANALYSES ENVIRONNEMENTALE ET ÉCONOMIQUE

### 8.1 INTRODUCTION

Le but à cette étape était de quantifier l'impact économique et environnemental de la mise en œuvre des méthodes optimisées de lavage. Les résultats du projet ont permis de démontrer que l'utilisation d'eau chaude (>35 °C) permet une réduction des volumes d'eau de lavage et une réduction du temps de lavage, tout en obtenant un niveau de salubrité égal ou supérieur. La réduction de la quantité d'eau de lavage permet de réduire le volume de lisier à épandre, ce qui pourra réduire les émissions de GES associées au pompage et à l'épandage du lisier. De plus, la réduction du temps de lavage pourrait permettre de réduire les besoins en main d'œuvre, et donc les coûts de production.

### 8.2 MÉTHODOLOGIE

#### 8.2.1 Description des scénarios

Deux scénarios de lavage sont comparés pour une ferme porcine naisseur-finisser type décrite au Tableau 24 : 1) scénario de référence avec un lavage à l'eau froide ( $\pm 17$  °C), et 2) scénario alternatif avec lavage à l'eau chaude ( $\pm 36$  °C).

**Tableau 24. Ferme type**

Caractéristiques	Engraissement	Pouponnière	Maternité
Places-animal par bâtiment	2000	2043	278
Superficie lavée*	2250 m <sup>2</sup>	1030 m <sup>2</sup>	1231 m <sup>2</sup>
Types de matériaux	Béton vibré pressé (plancher); Béton coulé sur place (plancher, mur et partitions); PVC (partitions); Acier inoxydable (mangeoires et abreuvoirs)	Similaire à l'engraissement	Béton coulé sur place (couloir); Fonte (plancher); PVC (partitions); Acier inoxydable (mangeoires et abreuvoirs)
Lavages/an	2,89	6,5	Mise-bas : 13 Saillie et gestation : 1
Protocole de lavage	#1 (trempage, lavage à pression, savonnage, rinçage)		

\* Surface de bâtiment par place = 1,25 m<sup>2</sup> pour l'engraissement, 4,92 m<sup>2</sup> pour la maternité et 0,56 m<sup>2</sup> pour la pouponnière (CDPQ, 2016). Cette superficie comprend les corridors et les autres espaces du bâtiment. 90% de la surface de bâtiment est considéré.

## 8.2.2 Évaluation des impacts environnementaux et économiques

Les impacts environnementaux des deux scénarios de lavage, soit le scénario de référence avec lavage à l'eau froide et le scénario alternatif avec lavage à l'eau chaude, sont évalués et comparés en respectant l'approche de l'analyse de cycle de vie. L'analyse se limite aux frontières de la ferme et concerne deux catégories d'impact : la consommation d'eau ( $m^3$ ) et les changements climatiques (émissions de gaz à effet de serre, en  $kg\ CO_2e$ ). L'unité fonctionnelle est la surface de bâtiment (plancher) lavée d'une ferme type ( $m^2$ ). Ainsi, les impacts sont rapportés par mètre carré de bâtiment lavé par année.

Seuls les procédés affectés par le changement de la procédure de lavage sont considérés dans l'inventaire de cycle de vie, dont :

- L'utilisation de la machine à laver à pression. Le chauffage de l'eau au diesel augmentera la consommation de combustible, et ainsi les émissions de GES.
- Le pompage et l'épandage de lisier. La réduction du volume d'eau lors du lavage résultera en une réduction du volume de lisier à épandre.

Ainsi, les émissions de GES associées à l'entreposage du lisier ne sont pas considérées, car ces dernières sont corrélées aux matières volatiles excrétées par les animaux, et non au volume de lisier.

D'un point de vue économique, la diminution du volume d'eau de lavage a un impact sur le niveau de dilution du lisier ce qui engendre une baisse du volume de lisier à épandre. Ceci peut se traduire par des économies. L'évaluation de l'impact économique tient compte des coûts du diesel consommé pour l'alimentation de la machine à laver, de la pompe à lisier et du tracteur lors de l'épandage. De plus, le salaire économisé grâce à une réduction du temps de lavage dans le scénario alternatif est considéré.

## 8.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 8.3.1 Volume d'eau et temps économisé

La consommation en eau froide du scénario de référence a été déterminée selon les mesures effectuées lors des essais de lavage dans des fermes à l'échelle commerciale (section 6). En engraissement, la consommation d'eau a atteint  $34,7\ L/m^2$ , alors qu'elle était de  $33,4\ L/m^2$  en maternité. Comme des essais n'ont pas été réalisés en pouponnière, l'hypothèse retenue est que la consommation d'eau est similaire à l'engraissement pour chaque lavage. Le scénario de lavage à l'eau chaude considère que la consommation en eau est réduite de 31% comparativement au scénario de lavage à l'eau froide (Figure 32). Une réduction de  $218\ m^3$  d'eau par année est ainsi obtenue pour la ferme type qui lave à l'eau chaude (Tableau 25). Le volume d'eau utilisé passe ainsi de  $156\ L\ m^{-2}\ an^{-1}$  à  $108\ L\ m^{-2}\ an^{-1}$ , correspondant à une économie de  $48\ L\ m^{-2}\ an^{-1}$ .

Le temps de lavage a été estimé lors des essais de lavage dans les fermes commerciales. Ainsi, la durée du lavage à l'eau froide est estimée à  $1,21\ min/m^2$  en engraissement et en pouponnière, et à  $2,24\ min/m^2$  en maternité. Le temps de lavage dans le scénario utilisant de l'eau chaude est réduit de 24% (section 6.3.2). Globalement, le temps

de lavage annuel sur la ferme type est de 542 heures dans le scénario de lavage à l'eau froide, et 412 heures lorsque l'eau chaude est utilisée.

**Tableau 25. Réduction du volume d'eau et du temps de lavage (ferme type)**

	Volume (m <sup>3</sup> /an)		Temps (heures/an)	
	Eau froide	Eau chaude	Eau froide	Eau chaude
Engraissement	225,4	155,6	131,1	99,7
Maternité	246,8	170,3	276,1	209,8
Pouponnière	232,0	160,1	135,0	102,6
<b>Total</b>	<b>704,3</b>	<b>486,0</b>	<b>542,2</b>	<b>412,0</b>

### 8.3.2 Émissions de GES

#### Lavage

Des laveuses à pression à l'eau chaude avec un brûleur alimenté au diesel sont généralement utilisées dans les fermes porcines à l'échelle commerciale. Il existe également des laveuses fonctionnant à l'électricité, mais pour avoir la même capacité de chauffage, ces dernières nécessitent une tension électrique de 600 volts (3 phases). Ces machines permettraient d'éviter les émissions de GES causées par la combustion de combustibles fossiles, mais peu de producteurs ont accès au réseau électrique triphasé.

Le scénario à l'étude considère l'utilisation de la machine à laver avec moteur électrique avec ou sans brûleur diésel de la marque Unimax (modèles ARI-4040E1AH et ARH-4040EDI). Ces machines sont équipées d'un moteur fermé/ventilé de 10 HP, 220 volts monophasé, 40 ampères, avec une puissance de 7,460 kW. Connaissant la durée de lavage totale pour la ferme type, les émissions de GES pour chaque scénario ont ainsi été calculées en multipliant la consommation totale annuelle d'électricité par le facteur d'émissions estimé à 20,72 kg CO<sub>2</sub>/kWh. Les émissions annuelles de la ferme type pour le scénario de référence et le scénario alternatif sont de 84 et 3 984 kg CO<sub>2</sub>e, respectivement (Tableau 26).

L'équation 1 a été utilisée pour calculer la puissance nécessaire pour le chauffage de l'eau (Q, en kW), où m est le débit massique d'eau moyen lors du lavage (0,379 kg s<sup>-1</sup>), Cp représente la capacité thermique de l'eau (4,185 kJ/kg·°C), Δt représente la différence de température entre l'eau chaude et l'eau froide (19 °C), et η est l'efficacité thermique (75%).

$$Q = mCp\Delta T * \eta$$

Equation 1

La puissance de chauffage ainsi calculée est de 40,2 kW. Cela correspond à un apport énergétique de 59 634 MJ par année. Le lavage s’effectuant sur une durée totale de 412 heures, la consommation en carburant est évaluée à 3,73 L h<sup>-1</sup>. Ainsi, 1 535 litres de diesel (38,85 MJ L<sup>-1</sup>) sont nécessaires par année sur la ferme type lavant à l’eau chaude. Le facteur d’émission pour la combustion de carburant d’un brûleur est estimé à 2 762,9 kg CO<sub>2</sub>/L (Environnement Canada, 2022). Les émissions annuelles sont donc de 4 241 kg CO<sub>2</sub>e (tableau 26).

Pour fin de comparaison, la consommation théorique maximale en carburant du brûleur d’une machine à laver à l’eau chaude (Unimax, modèle ARH-4040EDI) est de 2,21 GPH, soit 7,95 L h<sup>-1</sup>.

**Tableau 26. Consommation de carburant et émissions de GES des procédés de lavage pour la ferme type sur une base annuelle**

	Référence (Eau froide)	Référence (Eau chaude)	Différence
<b>Machine à pression</b>			
Électricité (kWh)	4 044	3 074	-970
Émissions (kg CO <sub>2</sub> e)	84	64	-20
<b>Chauffage de l’eau</b>			
Carburant (L)	-	1 535	
Émissions (kg CO <sub>2</sub> e)	-	4 241	4 241
<b>Sous-total</b>			
Émissions (kg CO <sub>2</sub> e)	84	4 305	4 221

## Épandage du lisier

Les volumes des lisier produits sur une année ont été calculés pour chaque bâtiment de la ferme type, pour le scénario de référence (Tableau 27) et pour le scénario alternatif avec utilisation d’eau chaude (Tableau 28).

Les eaux usées sont constituées principalement d’eau de lavage du bâtiment et d’eau gaspillée des abreuvoirs. Les volumes d’eaux usées générés en maternité et en engraissement ont été calculés à partir des valeurs présentées dans le guide technique « Calcul du volume de fumier pour le dimensionnement des structures d’entreposage – Évaluation des volumes complémentaire » (Godbout et al., 2017). Ce volume inclut les pertes d’eau des abreuvoirs et l’eau de lavage des équipements. Connaissant la quantité d’eau de lavage utilisée (Tableau 22), la différence est considérée provenir du gaspillage des abreuvoirs.

Une étude du CDPQ (Turcotte et al., 2018) a permis de calculer l’eau gaspillée des abreuvoirs pour les porcs à l’engraissement. La consommation en eau d’un porc à l’engraissement est évaluée à 6 L/jour. Considérant un gaspillage de 14,5% pour un abreuvement avec des tétines de type “bite ball”, le gaspillage correspond à 1,02 L j<sup>-1</sup> porc<sup>-1</sup>. Le volume d’eaux usées à l’engraissement a donc été calculé en additionnant l’eau de lavage (225,4 m<sup>3</sup>) et l’eau gaspillée des abreuvoirs (673,6 m<sup>3</sup>).

La réduction du volume de lisier de 218 m<sup>3</sup>/année correspond à 2,4% du volume à épandre par année.

**Tableau 27. Volumes annuels de lisier produit (m<sup>3</sup>) – Scénario de référence (ferme type)**

		Eaux usées <sup>1</sup>		Déjections <sup>2</sup>	Précipitations <sup>3</sup>	Lisier (total)
		Lavage	Gaspillage			
Fosse 1	Engraissement	225	674	3 213	839	4 951
Fosse 2	Maternité	247	1 108	745	839	4 118
	Pouponnière	232	57	911		
Total						9 069

<sup>1</sup>Guide Technique – Évaluation des volumes complémentaires. Inclut les pertes d’eaux des abreuvoirs et les eaux de lavage; <sup>2</sup> Déjections animales – Production 2012; <sup>3</sup> Guide technique - Accumulation d’eau dans les installations d’entreposage des fumiers à ciel ouvert, calcul basé sur une fosse de 125’ de diamètre.

**Tableau 28. Volumes annuels de lisier produit (m<sup>3</sup>) – Scénario alternatif (ferme type)**

		Eaux usées <sup>1</sup>		Déjections <sup>2</sup>	Précipitations <sup>3</sup>	Lisier
		Lavage	Gaspillage			
Fosse 1	Engraissement	156	674	3213	839	4 881
Fosse 2	Maternité	170	1 108	745	839	3 970
	Pouponnière	160	57	911		
Total						8 851

<sup>1</sup>Guide Technique – Évaluation des volumes complémentaires. Inclut les pertes d’eaux des abreuvoirs et les eaux de lavage; <sup>2</sup> Déjections animales – Production 2012; <sup>3</sup> Guide technique - Accumulation d’eau dans les installations d’entreposage des fumiers à ciel ouvert, calcul basé sur une fosse de 125’ de diamètre.

Un scénario de fertilisation a été établi en faisant l’hypothèse qu’une dose de 80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> est appliquée au champ. Le volume d’eau ajouté au lisier a un impact direct sur la concentration en éléments fertilisant et affecte ainsi la dose qui doit être épandue. La valeur fertilisante du lisier dans le scénario de référence correspond aux valeurs de référence du CRAAQ (2007) pour des porcs en croissance sans trémie-abreuvoirs. La composition chimique du lisier dans le scénario alternatif (eau chaude) a été calculée en considérant la réduction du volume d’eau, se traduisant par une moins grande dilution.

Ainsi, pour chaque scénario, le volume total de lisier doit être épandu sur une superficie de 239 hectares, ce qui correspond à une dose de 37,9 m<sup>3</sup>/ha pour le scénario de référence, et 37 m<sup>3</sup>/ha pour le scénario alternatif (eau chaude). Le scénario d’épandage considère un épandeur d’un volume de 20,12 m<sup>3</sup> et un taux d’épandage de 3 voyages à l’heure.

La consommation totale de carburant et les émissions de GES associées à l’épandage (pompage et épandage au champ) pour chaque scénario sont présentées au Tableau 29. La consommation de carburant pour l’épandage a

été fixée à 18,73 L h<sup>-1</sup> (CRAAQ, 2018 – AGDEX 740/825). Les émissions associées au pompage du lisier ont été calculées en considérant un pompage de 300 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> et une consommation de carburant de 26,6 L h<sup>-1</sup>. Un facteur d'émissions de 2 756 g CO<sub>2</sub>e L<sup>-1</sup> est considéré pour la combustion du diesel par les tracteurs, incluant 18 g CO<sub>2</sub>e L<sup>-1</sup> pour la fabrication (Snyder et al., 2009) et 2 738 g CO<sub>2</sub>e L<sup>-1</sup> pour la combustion (Baker et al., 2015).

Le Tableau 30 montre les émissions totales de GES associées aux procédés de lavage (machine à pression et chauffage de l'eau) et à l'épandage (pompage et épandage au champ) pour chaque scénario en base annuelle pour la ferme type.

**Tableau 29. Consommation de carburant et émissions de GES de l'épandage sur une base annuelle pour la ferme type**

	Référence (Eau froide)	Référence (Eau chaude)	Différence
<b>Pompage du lisier</b>			
Carburant (L)	804	785	
Émissions (kg CO <sub>2</sub> e)	2 216	2 163	-53
<b>Épandage du lisier</b>			
Carburant (L)	2 814	2 746	
Émissions (kg CO <sub>2</sub> e)	7 756	7 569	-187
<b>Sous-total</b>			
Carburant (L)	3 618	3 531	
Émissions (kg CO <sub>2</sub> e)	9 972	9 732	-240

**Tableau 30. Consommation de carburant et d'électricité et émissions de GES totales pour le lavage et pour l'épandage de lisier sur la ferme type sur une base annuelle**

	Référence (Eau froide)	Référence (Eau chaude)	Différence
<b>Carburant</b>			
Total (L)	3 618	5 066	1 448
Unitaire (L/m <sup>2</sup> )	0,80	1,12	0,32
<b>Électricité</b>			
Total (kWh)	4 044	3 074	-970
<b>Émissions de GES</b>			
Total (kg CO <sub>2</sub> e)	10 056	14 037	3 981
Unitaire (kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )	2,23	3,11	0,88

### 8.3.3 Analyse économique

La diminution du volume d'eau de lavage a un impact sur le niveau de dilution du lisier ce qui engendre une baisse du volume de lisier à épandre de 218 m<sup>3</sup> par année (Tableaux 27 et 28). Le coût d'épandage du lisier moyen incluant le pompage est de l'ordre de 3,15 \$/m<sup>3</sup> (CRAAQ, 2018 – AGDEX 740/825) pour l'usage d'une citerne avec aéroaspersion basse et servodirection (Turcotte et al., 2018). Ainsi, 687,00 \$ sont économisés grâce à la réduction du volume de lisier (Tableau 31).

Le scénario alternatif de lavage à l'eau chaude permet de réduire le temps de travail de 130 heures. Ainsi, considérant un taux horaire de 18,00 \$, une économie de 2 340,00 \$ pourrait être réalisée.

L'achat de 1 535 litres de carburant supplémentaires est nécessaire afin de chauffer l'eau dans le scénario alternatif. Considérant le coût du carburant diesel rouge de 1,50 \$ (taxes inclus) (Les huiles Harnois Charny, 22 juin 2023), le coût annuel supplémentaire du carburant est de 2 302,49\$. Néanmoins, la machine à laver fonctionnera 130 heures de moins avec l'utilisation d'eau chaude, ce qui permettra de réduire la consommation d'électricité de 971 kWh, représentant une économie de 97,47\$ (à 0,1004\$/kWh) (Tarifs d'électricité d'Hydro-Québec dans ses activités de distribution d'électricité, en vigueur le 1er avril 2023; Tarif D – excédant 40 kWh/j).

**Tableau 31. Coûts (CAD\$) associés aux procédés de lavage et d'épandage pour la ferme type**

	Référence (Eau froide)	Référence (Eau chaude)
<b>Épandage</b>		
Volume de lisier (L)	9 069	8 851
Coûts (\$)	28 567,70	27 879,95
<b>Lavage (main d'œuvre)</b>		
Temps (h)	542	412
Salaires (\$)	9 758,84	7 416,72
<b>Lavage (énergie)</b>		
Carburant (L)	-	1 535
Électricité (kWh)	4 044	3 074
Coûts (\$)	406,11	2 611,13
<b>Total</b>		
Coût annuels (\$)	38 72,65	37 907,80

## 8.4 SYNTHÈSE

Pour une ferme type naisseur-finisser avec une surface totale à laver de 4 511 m<sup>2</sup>, l'utilisation de l'eau chaude pour le lavage permet une économie de 218 m<sup>3</sup> d'eau par année, soit 48 L m<sup>-2</sup>.

Les émissions de GES, considérant le carburant utilisé pour alimenter le chauffe-eau et pour l'épandage du lisier, sont augmentées de 3 981 kg CO<sub>2</sub>e par année lorsque l'eau chaude est utilisée pour le lavage, ou de 0,88 kg CO<sub>2</sub>e m<sup>-2</sup>. Cette augmentation est causée par l'utilisation d'une machine à laver à pression dont le chauffe-eau est alimenté généralement avec des carburants fossiles et correspond aux émissions d'une voiture roulant 18 285 km par année, ce qui permet de relativiser l'impact. L'utilisation d'une machine à laver fonctionnant à l'électricité résulterait en une faible réduction des émissions de GES pour le scénario de lavage à l'eau chaude. Cependant, le producteur doit avoir accès au réseau d'électricité triphasé pour pouvoir utiliser ce type de machine.

En ce qui concerne l'analyse des coûts, les économies totales annuelles s'élèvent à 824,90 \$ pour une ferme type utilisant l'eau chaude pour le lavage, ce qui est équivalent à une économie de 0,18 \$/m<sup>2</sup>.

## 9 CONCLUSIONS

Voici les principales conclusions obtenues de ce projet de recherche :

- Les méthodes de bioluminescence de l'adénosine triphosphate (ATP) et de réaction enzymatique utilisant le Biofinder ont été identifiées comme étant à la fois simples et faciles pour servir d'indicateurs de propreté immédiatement après les procédures de lavage. Ces méthodes permettent de déterminer rapidement l'état sanitaire des surfaces.
- Les résultats ont montré que l'augmentation de la température de l'eau et de la pression d'impact du jet d'eau sur la surface, ainsi que la réduction de la vitesse de passage, ont eu un impact significatif sur l'efficacité du nettoyage. De plus, ce projet a permis d'optimiser les paramètres des opérations de lavage :
  - Buse rotative : température de l'eau comprise entre 35 et 37 °C, une pression d'impact de 20 Mpa et une vitesse de 0,5 à 0,55 m/s.
  - Buse plate : température de l'eau comprise entre 40 et 45 °C, une pression d'impact de 0,6 Mpa et une vitesse de 0,3 m/s.
- Le savon après le lavage a été plus efficace pour réduire la présence de bactéries et de résidus organiques, car le savon appliqué après le lavage permet d'éliminer les bactéries qui sont restées sur la surface.
- À l'échelle commerciale, les résultats ont montré que les lavages réalisés avec de l'eau chaude ont significativement réduit la consommation d'eau, représentant une réduction importante de 31 % par rapport aux lavages avec l'eau froide. De plus, l'utilisation d'eau chaude a également permis de réduire le temps nécessaire pour la phase de lavage de 24 %. En outre, les surfaces lavées à l'eau chaude ont montré un niveau plus faible de micro-organismes, avec des valeurs d'ATP et le niveau de réaction du Biofinder plus basses que celles lavées à l'eau froide. Ces résultats suggèrent que l'utilisation d'eau chaude (>35 °C) pour le lavage peut offrir des avantages significatifs en termes de consommation d'eau, de temps et d'efficacité de nettoyage.
- Des niveaux de propreté ont été établis pour l'utilisation des indicateurs dans les bâtiments porcines. Pour le Biofinder, une échelle de notation de 0 à 3 a été développée. Un pointage de 0 ou 1 signifie un niveau de propreté acceptable. De même, pour la méthode utilisant l'ATP, un niveau de propreté inférieur à 1500 RLU (unités de lumière relatives) a été déterminé comme étant acceptable pour un bâtiment porcin.
- L'usure du matériau causé par son utilisation résulte en un niveau plus haut de micro-organismes sur la surface après le lavage, principalement pour les matériaux utilisés comme plancher tels que la fonte, le béton coulé sur placé et le béton vibré pressé. Cet effet est plus marqué pour les lavages effectués à l'eau froide.
- Pour une ferme porcine naisseur-finisserie type, le procédé de lavage à l'eau chaude permet une économie annuelle d'eau de 218 m<sup>3</sup>, soit 48 L par mètre carré de bâtiment lavé. Cela se traduit en une réduction du volume de lisier à épandre, réduisant les émissions de GES et les coûts qui y sont associés. Cependant, les fermes lavant à l'eau chaude utilisent généralement une machine à laver à pression dont le chauffe-eau est alimenté généralement avec des carburants fossiles, émettant ainsi des GES. Globalement, pour la ferme type, les émissions de GES associées aux procédés de lavage et d'épandage s'élèvent à 2,23 kg CO<sub>2</sub>e

par mètre carré de bâtiment pour le scénario de lavage à l'eau froide, et 3,11 kg CO<sub>2</sub>e par mètre carré pour le scénario de lavage à l'eau chaude. Cela représente une augmentation annuelle de 3981 kg CO<sub>2</sub>e. En ce qui concerne l'analyse des coûts, les économies totales annuelles s'élèvent à 824,00 \$ pour une ferme type utilisant l'eau chaude pour le lavage, ce qui est équivalent à une économie de 0,8 \$/m<sup>2</sup>. Ainsi, malgré une plus grande consommation de carburant dans le scénario de lavage à l'eau chaude, la réduction du temps de lavage, et ainsi des salaires, résulte en des coûts totaux plus faibles.

En bref, il est crucial de mettre en place des pratiques rigoureuses de nettoyage afin de réduire et/ou éliminer les biofilms et les bactéries de la surface des bâtiment porcins, résultant en un niveau de propreté adéquat pour l'ensemble des matériaux neufs et usés tout en réduisant la consommation d'eau. Le cadre de ce projet fournit des recommandations pour optimiser les procédures de lavage. Cela implique l'utilisation d'une buse rotative, d'une température supérieure à 35 °C et d'une pression d'impact supérieure à 20 MPa (par exemple, une pression de la laveuse de 2 600 psi à une distance de 30 cm), ainsi que l'application de savon après le lavage à haute pression. En outre, la présence de biofilm après le nettoyage est un indicateur important de l'efficacité du processus de nettoyage et de la nécessité d'améliorer les pratiques pour maintenir un statut sanitaire élevé des bâtiments d'élevage, qui pourra être surveillé à l'aide des analyses d'ATP et du Biofinder.

## RÉFÉRENCES

- AHDB Agriculture and Horticulture Development Board - Finisher Pig Buildings Design and Build – a Blueprint for English Farms 2013, 1–123.
- Alonso, B., Cruces, R., Pérez, A., Sánchez-Carrillo, C., & Guembe, M. (2017). Comparison of the XTT and resazurin assays for quantification of the metabolic activity of *Staphylococcus aureus* biofilm. *Journal of Microbiological Methods*, 139, 135–137.
- Antezana, W., De Blas, C., García-Rebollar, P., Rodríguez, C., Beccaccia, A., Ferrer, P., Cerisuelo, A., Moset, V., Estellés, F., Cambra-López, M., & Calvet, S. (2016). Composition, potential emissions and agricultural value of pig slurry from Spanish commercial farms. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 104(2), 159–173.
- Apedo, K. L., Montgomery, P., Serres, N., Fond, C., & Feugeas, F. (2016). Geometrical roughness analysis of cement paste surfaces using coherence scanning interferometry and confocal microscopy. *Materials Characterization*, 118, 212–224.
- Azeredo, J., Azevedo, N. F., Briandet, R., Cerca, N., Coenye, T., Costa, A. R., Desvaux, M., Di Bonaventura, G., Hébraud, M., Jaglic, Z., Kačániová, M., Knøchel, S., Lourenço, A., Mergulhão, F., Meyer, R. L., Nychas, G., Simões, M., Tresse, O., & Sternberg, C. (2017). Critical review on biofilm methods. *Critical Reviews in Microbiology*, 43(3), 313–351.
- Aziz A., Driouch A., Bellil A., Ali M. B., Mabtouti S. E.L., Felaous K., Achab M., Bouari A. E., Optimization of new eco-material synthesis obtained by phosphoric acid attack of natural Moroccan pozzolan using Box-Behnken Design, *Ceramics International*, 47 (23), 2021, 33028-33038.
- Baker, W., C. Bitar, M. Génier, C. Ha, J. Hickey, J. Lynch, S. McKibbin, F. Neitzert, S. Smyth, K. Tracey, Chapter 3 energy (CRF sector 1). 2015. Natl. Invent. Rep. 1990–2013- Greenh. Gas Sources Sink. Canada, Environment Canada, Gatineau QC, pp. 68–90.
- Bogan, A. L., Fong, K., Trmcic, A., Wang, S., & Frostad, J. M. (2020). Evaluation of non-traditional visualization methods to detect surface attachment of biofilms. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 196, 111320.
- Boon, C. R., & Wray, C. (1989). Building design in relation to the control of diseases of intensively housed livestock. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 43(C), 149–161.
- Brajkovic, D., Antonijevic, D., Milovanovic, P., Kistic, D., Zelic, K., Djuric, M., & Rakocevic, Z. (2014). Surface characterization of the cement for retention of implant supported dental prostheses: In vitro evaluation of cement roughness and surface free energy. *Applied Surface Science*, 311, 131–138.
- Brisson, Y. (2014). Évolution de l'industrie porcine canadienne - Un coup d'œil sur l'agriculture canadienne. *Statistique Canada*, 11. <http://www.statcan.ca>.
- Burfoot, D., & Middleton, K. (2009). Effects of operating conditions of high pressure washing on the removal of biofilms from stainless steel surfaces. *Journal of Food Engineering*, 90(3), 350–357.
- Busscher, H.J.; Norde, W.; van der Mei, H.C. Specific Molecular Recognition and Nonspecific Contributions to Bacterial In-teraction Forces Downloaded From. *Applied and environmental microbiology* 2008, 74, 2559–2564.

- Chen, B., Abdallah, M., Campistron, P., Moulin, E., Callens, D., Khelissa, S. O., Debreyne, P., Chihib, N. E., & Delaplace, G. (2021). Detection of biofilm formation by ultrasonic Coda Wave Interferometry. *Journal of Food Engineering*, 290, 110219.
- Cheng, Y., Feng, G., & Moraru, C. I. (2019). Micro-and nanotopography sensitive bacterial attachment mechanisms: A review. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 10, Issue FEB, p. 191). Frontiers Media S.A.
- CRAAQ. 2007. Caractéristiques des effluents d'élevage – Valeurs références pour les volumes et pour les concentrations d'éléments fertilisants, Production Porc (Lisiers). 7 pages.
- CRAAQ. 2018. AGDEX 740/825, Machinerie - Coûts d'utilisation et taux à forfaits suggérés avec système d'autoguidage. 17 pages.
- De Foy, C. (2005). Évaluation des matériaux en fonction de la contamination bactérienne de surface, des émissions d'odeurs et des caractéristiques physiques afin de réduire la dérive sanitaire des bâtiments porcins. Université Laval.
- Environnement Canada. 2022. Rapport d'inventaire national 1990-2020: sources et puits de gaz à effet de serre au Canada. 269 pages et annexes.
- Ferrer, P., Calvet, S., Garcíá-Rebollar, P., De Blas, C., Jiménez-Belenguer, A. I., Hernández, P., Piquer, O., & Cerisuelo, A. (2020). Partially defatted olive cake in finishing pig diets: Implications on performance, faecal microbiota, carcass quality, slurry composition and gas emission. *Animal*, 14(2), 426–434.
- Fysun, O., Kern, H., Wilke, B., & Langowski, H. C. (2019). Evaluation of factors influencing dairy biofilm formation in filling hoses of food-processing equipment. *Food and Bioproducts Processing*, 113, 39–48.
- Grymak, A., Aarts, J.M., Ma, S., Waddell, J.N. and Choi, J.J.E. (2022), Wear Behavior of Occlusal Splint Materials Manufactured By Various Methods: A Systematic Review. *Journal of Prosthodontics*, 31: 472-487.
- Gharechahi, M.; Moosavi, H.; Forghani, M. Effect of Surface Roughness and Materials Composition. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology* 2012, 03, 541–546.
- González-Rivas, F., Ripolles-Avila, C., Fontecha-Umaña, F., Ríos-Castillo, A. G., & Rodríguez-Jerez, J. J. (2018). Biofilms in the Spotlight: Detection, Quantification, and Removal Methods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(5), 1261–1276.
- Gorman, C.; Turnbull, J.E. PLAN M-3003: Construction et Installations Techniques Des Porcheries; 1988; Vol. 01
- Gupta, K.K.; Devi, D. Characteristics Investigation on Biofilm Formation and Biodegradation Activities of *Pseudomonas Aeruginosa* Strain ISJ14 Colonizing Low Density Polyethylene (LDPE) Surface. *Heliyon* 2020, 6, e04398.
- Hansen, M. J., Chwalibog, A., & Tauson, A.-H. (2007). Influence of different fibre sources in diets for growing pigs on chemical composition of faeces and slurry and ammonia emission from slurry. *Animal Feed Science and Technology*, 134(3–4), 326–336.
- Harimawan, A.; Rajasekar, A.; Ting, Y.P. Bacteria Attachment to Surfaces - AFM Force Spectroscopy and Physicochemical Analyses. *Journal of Colloid and Interface Science* 2011, 364, 213–218.
- Hathroubi, S. Rôle des polysaccharides de surface dans la formation des biofilms et rôle du biofilm d'*actinobacillus pleuropneumoniae* dans la pathogénicité, Thesis, Université de Montréal, Canada, 2016.
- Hurnik, D. (2005). Investigation into optimal washing and disinfection techniques for pig pens. London Swine Conference - Production at the Leading Edge, April, 135–138.

- Jun, W., Kim, M. S., Cho, B. K., Millner, P. D., Chao, K., & Chan, D. E. (2010). Microbial biofilm detection on food contact surfaces by macro-scale fluorescence imaging. *Journal of Food Engineering*, 99(3), 314–322.
- Z. Karaca, N. Günes Yılmaz, R.M. Goktan (2012) Abrasion wear characterization of some selected stone flooring materials with respect to contact load, *Construction and Building Materials*, 36, 520-526.
- Katsikogianni, M., & Missirlis, Y. F. (2004). Concise review of mechanisms of bacterial adhesion to biomaterials and of techniques used in estimating bacteria-material interactions. *European Cells and Materials*, 8, 37–57.
- Keeratipibul, S., Techaruwichit, P., & Chaturongkasumrit, Y. (2009). Contamination sources of coliforms in two different types of frozen ready-to-eat shrimps. *Food Control*, 20(3), 289–293.
- Kragh, K. N., Alhede, M., Kvich, L., & Bjarnsholt, T. (2019). Into the well—A close look at the complex structures of a microtiter biofilm and the crystal violet assay. *Biofilm*, 1, 100006.
- Kymäläinen, H.-R., Määttä, J., Puumala, M., Kaustell, K. O., Mattila, T., Joutsen, B.-L., Kuisma, R., Hurme, K.-R., Uusi-Rauva, A., & Sjöberg, A.-M. (2008). A laboratory study of the effect of coating on cleanability of concrete flooring for use in piggeries. *Biosystems Engineering*, 99(1), 88–98.
- Les Éleveurs de porcs du Québec. (2011). Fédération des producteurs de porcs du Québec - Guide de lavage, désinfection et séchage des porcheres.
- Li, G., Wu, Y., Li, Y., Hong, Y., Zhao, X., Reyes, P. I., & Lu, Y. (2020). Early-stage detection of *Staphylococcus epidermidis* biofilm formation using MgZnO dual-gate TFT biosensor. *Biosensors and Bioelectronics*, 151, 111993.
- Loza-Correa, M., & Ramírez-Arcos, S. (2017). Detection of bacterial adherence and biofilm formation on medical surfaces. In *Biofilms and Implantable Medical Devices: Infection and Control* (pp. 181–193). Elsevier Inc.
- Madushan, R., Vidanarachchi, J. K., Prasanna, P. H. P., Werellagama, S., & Priyashantha, H. (2021). Use of natural plant extracts as a novel microbiological quality indicator in raw milk: An alternative for resazurin dye reduction method. *LWT*, 144, 111221.
- Maes, S., Vackier, T., Nguyen Huu, S., Heyndrickx, M., Steenackers, H., Sampers, I., Raes, K., Verplaetse, A., & De Reu, K. (2019). Occurrence and characterisation of biofilms in drinking water systems of broiler houses. *BMC Microbiology*, 19(1), 77.
- Manohar, M., Joseph, J., Selvaraj, T., & Sivakumar, D. (2013). Application of Box Behnken design to optimize the parameters for turning Inconel 718 using coated carbide tools. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 4(4), 620–642.
- Massabie, P., H. Roy, A.L. Boulestreau-Boulay et A. Dubois. 2014. La consommation d'eau en élevage de porcs - Des leviers pour réduire la consommation d'eau en élevage de porcs. IFIP-Institut du porc. 16 pages.
- Melmer, D.J.; O'Sullivan, T.L.; Poljak, Z. A Descriptive Analysis of Swine Movements in Ontario (Canada) as a Contributor to Disease Spread. *Preventive Veterinary Medicine* 2018, 159, 211–219.
- Meshref A. A., Mazen A. A., El-Giushi M. A., Ali W. Y. (2020) Wear behavior of hybrid composite reinforced with titanium dioxide nanoparticles. *Journal of Advanced Engineering Trends*, 39, 89-100.
- Montgomery, D. C. (2001). *Design and Analysis of Experiments: Second Edition*. In D. C. Montgomery (Ed.), *Design and Analysis of Experiments* (Fifth, Vol. 1). John Wiley & Sons.
- Moral, R., Perez-Murcia, M. D., Perez-Espinosa, A., Moreno-Caselles, J., Paredes, C., & Rufete, B. (2008). Salinity, organic content, micronutrients and heavy metals in pig slurries from South-eastern Spain. *Waste Management*, 28(2), 367–371.

- Mueller, R. F., Characklis, W. G., Jones, W. L., & Sears, J. T. (1992). Characterization of initial events in bacterial surface colonization by two *Pseudomonas* species using image analysis. *Biotechnology and Bioengineering*, 39(11), 1161–1170.
- Muhlauer, R.V., L.B. Moody, R.T. Burns, J. Harmon et K. Stalder. 2010. Water consumption and conservation techniques currently available for swine production. National Pork Board. Des Moines, IA, USA. 32 pages.
- MWPS-8 Midwest Plan Service - Swine Housin and Equipment Handbook; Fourth.; Midwest Plan Service: Iowa, 1983; ISBN 0-8937-054-8.
- Nakanishi, E. Y., Palacios, J. H., Godbout, S., & Fournel, S. (2021). Interaction between Biofilm Formation, Surface Material and Cleanability Considering Different Materials Used in Pig Facilities—An Overview. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 5836, 13(11), 5836.
- Nantel-Fortier, N.; Lachapelle, V.; Letellier, A.; L’Homme, Y.; Brassard, J. (2019) Kobuvirus Shedding Dynamics in a Swine Production System and Their Association with Diarrhea. *Veterinary Microbiology* 2019, 235, 319–326,
- Nekkaa A., Benaissa K., Lalaouna A. E. D., Mutelet F., Canabady-Rochelle L. (2021) Optimization of the extraction process of bioactive compounds from *Rhamnus alaternus* leaves using Box-Behnken experimental design, *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 25, 2021, 10034.
- Omidbakhsh, N., Ahmadpour, F., & Kenny, N. (2014). How reliable are ATP bioluminescence meters in assessing decontamination of environmental surfaces in healthcare settings? *PloS One*, 9(6).
- Ommen, P., Zobek, N., & Meyer, R. L. (2017). Quantification of biofilm biomass by staining: Non-toxic safranin can replace the popular crystal violet. *Journal of Microbiological Methods*, 141, 87–89.
- Pelletier, F. (2003). Mesure des émissions gazeuses et odorantes produites par les matériaux utilisés dans les porcheries. Université Lava.
- Predicala, B. Z., & Alvarado, A. C. (2014). Alternatives for animal drinking and barn cleaning to reduce water use in swine facilities. *Canadian Biosystems Engineering*, 56, 5.7-5.15.
- Predicala, B. Z., Alvarado, A. C., & Cabahug, J. (2015). ATP Bioluminescence a Means for Assessing Trailer Cleanliness.
- Rong, H., Zhang, S., Ma, G., Zheng, X., Qian, C., Zhang, L., Zhang, Y., & Xu, R. (2020). Formation, growth and corrosion effect of sulfur oxidizing bacteria biofilm on mortar. *Construction and Building Materials*, 121218.
- Ruiz-Llacsahuanga, B., Hamilton, A., Zaches, R., Hanrahan, I., & Critzer, F. (2021). Utility of rapid tests to assess the prevalence of indicator organisms (Aerobic plate count, Enterobacteriaceae, coliforms, *Escherichia coli*, and *Listeria* spp.) in apple packinghouses. *International Journal of Food Microbiology*, 337, 108949.
- Santos, P. M. D., & Júlio, E. N. B. S. (2013). A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces. *Construction and Building Materials*, 38, 912–923.
- Snyder, C. S., T.W. Bruulsema, T.L. Jensen, P.E. Fixen, Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. 2009. *Agric. Ecosyst. Environ.* 133. 247–266.
- Sommer, S. G., Hjorth, M., Leahy, J. J., Zhu, K., Christel, W., Sørensen, C. G., & Sutaryo, S. (2015). Pig slurry characteristics, nutrient balance and biogas production as affected by separation and acidification. *Journal of Agricultural Science*, 153(1), 177–191.
- Statistique Canada. (2021a). Tableau 32-10-0160-01 Statistiques de porcs, nombre de porcs dans les fermes à la fin d’une période semestrielle (x 1 000). <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210016001>

- Statistique Canada. (2021b). Tableau 32-10-0202-01 Statistiques de porcs, nombre de fermes déclarantes et nombre moyen de porcs par ferme, semi-annuel. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210020201&pickMembers%5B0%5D=1.1&cubeTimeFrame.startYear=2011&cubeTimeFrame.endYear=2021&referencePeriods=20110101%2C20210101>
- Tabarsa, T.; Ashori, A.; Gholamzadeh, M. Evaluation of Surface Roughness and Mechanical Properties of Particleboard Panels Made from Bagasse. *Composites: Part B* 2011, 42, 1330–1335.
- Tršan, M., Vehovc, M., Seme, K., & Srčič, S. (2020). Evaluation of ATP bioluminescence for monitoring surface hygiene in a hospital pharmacy cleanroom. *Journal of Microbiological Methods*, 168, 105785.
- Turcotte, S., J.G. Turgeon, P. Gagnon et V. Caron Simard. 2018. Évaluation de l'impact de différents systèmes d'abreuvement sur le gaspillage, les performances de croissance et le comportement d'abreuvement des porcs en engraissement. Rapport final. CDPQ. 33 pages.
- USDA The United States Department of Agriculture - Foreign Animal Disease Preparedness and Response Plan; Washington, 2011.
- VIDO. 1998. Washing Water Survey by VIDO Swine Technical Group. Veterinary Infectious Diseases Organization, Saskatoon, Saskatchewan.
- Wu, Y., Li, J., Chen, H., Yang, Z., Guo, Y., Liang, M. (2022) Study on the impact wear mechanism and damage modes of compacted graphite cast iron. *Journal of materials research and technology*, 21 : 4002-4011.
- Yi, S. W., Cho, A., Kim, E., Oh, S. I., Roh, J. H., Jung, Y. H., Choe, C., Yoo, J. G., & Do, Y. J. (2020). Evaluation of adenosine triphosphate testing for on-farm cleanliness monitoring compared to microbiological testing in an empty pig farrowing unit. *Journal of Animal Science and Technology*, 62(5), 682–691.

## ANNEXE A – TABLEAUX D'IDENTIFICATION DE LA PRESSION D'IMPACT

Tableau A.1. Estimations de la pression d'impact pour la buse rotative selon la pression de la laveuse et la distance entre la buse et la surface à laver

		Distance (cm)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Pression de la laveuse (psi)	1000	22,00	19,66	17,33	15,00	12,66	10,33	8,00	5,66	3,33	1,00
	1200	23,31	20,98	18,65	16,31	13,98	11,65	9,31	6,98	4,65	2,31
	1400	24,63	22,30	19,96	17,63	15,30	12,96	10,63	8,30	5,96	3,63
	1600	25,95	23,61	21,28	18,95	16,61	14,28	11,95	9,61	7,28	4,95
	1800	27,26	24,93	22,59	20,26	17,93	15,59	13,26	10,93	8,59	6,26
	2000	28,58	26,24	23,91	21,58	19,24	16,91	14,58	12,24	9,91	7,58
	2200	29,89	27,56	25,23	22,89	20,56	18,23	15,89	13,56	11,23	8,89
	2400	31,21	28,88	26,54	24,21	21,88	19,54	17,21	14,88	12,54	10,21
	2600	32,53	30,19	27,86	25,53	23,19	20,86	18,53	16,19	13,86	11,53
	2800	33,84	31,51	29,17	26,84	24,51	22,17	19,84	17,51	15,17	12,84
	3000	35,16	32,82	30,49	28,16	25,82	23,49	21,16	18,82	16,49	14,16
	3200	36,47	34,14	31,81	29,47	27,14	24,81	22,47	20,14	17,81	15,47
	3400	37,79	35,46	33,12	30,79	28,46	26,12	23,79	21,46	19,12	16,79
	3600	39,11	36,77	34,44	32,11	29,77	27,44	25,11	22,77	20,44	18,11
	3800	40,42	38,09	35,75	33,42	31,09	28,75	26,42	24,09	21,75	19,42
4000	41,74	39,40	37,07	34,74	32,40	30,07	27,74	25,40	23,07	20,74	

Tableau A.2. Estimations de la pression d'impact pour la buse plait selon la pression de la laveuse et la distance entre la buse et la surface à laver

		Distance (cm)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Pression de la laveuse (psi)	1000	0,45	0,40	0,35	0,29	0,24	0,18	0,13	0,08	0,02	-0,03
	1200	0,48	0,42	0,37	0,32	0,26	0,21	0,15	0,10	0,05	-0,01
	1400	0,50	0,45	0,39	0,34	0,28	0,23	0,18	0,12	0,07	0,02
	1600	0,52	0,47	0,41	0,36	0,31	0,25	0,20	0,15	0,09	0,04
	1800	0,54	0,49	0,44	0,38	0,33	0,28	0,22	0,17	0,11	0,06
	2000	0,57	0,51	0,46	0,41	0,35	0,30	0,25	0,19	0,14	0,08
	2200	0,59	0,54	0,48	0,43	0,38	0,32	0,27	0,21	0,16	0,11
	2400	0,61	0,56	0,51	0,45	0,40	0,34	0,29	0,24	0,18	0,13
	2600	0,64	0,58	0,53	0,47	0,42	0,37	0,31	0,26	0,21	0,15
	2800	0,66	0,60	0,55	0,50	0,44	0,39	0,34	0,28	0,23	0,17
	3000	0,68	0,63	0,57	0,52	0,47	0,41	0,36	0,31	0,25	0,20
	3200	0,70	0,65	0,60	0,54	0,49	0,44	0,38	0,33	0,27	0,22
	3400	0,73	0,67	0,62	0,57	0,51	0,46	0,40	0,35	0,30	0,24
	3600	0,75	0,70	0,64	0,59	0,53	0,48	0,43	0,37	0,32	0,27
	3800	0,77	0,72	0,66	0,61	0,56	0,50	0,45	0,40	0,34	0,29
4000	0,80	0,74	0,69	0,63	0,58	0,53	0,47	0,42	0,37	0,31	

## ANNEXE B – ANALYSE D’OPTIMISATION PAR LA MÉTHODE BOX-BEHNKEN

### LAVAGE AVEC LA BUSE ROTATIVE

#### *Analyse des plaques en PVC*

Afin de garantir l'adéquation du modèle utilisé et de la significativité statistique testée de la relation entre la variation quadratique moyenne due à la régression et l'erreur quadratique moyenne résiduelle, la méthode ANOVA a été utilisée. L'analyse de variance (ANOVA) du modèle de surface de réponse quadratique a prédit pour les plaques en PVC les valeurs de P-value de 0,03, 0,01 et 0,002 pour l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement. Les valeurs de P-value moindre que 0,05 démontre que les modelés sont significatifs ( $p < 0,05$ ). Pour décrire la variation des réponses (ATP1h, ATP24h et Consommation d'eau) en termes linéaires, quadratiques et cubiques, un modèle polynomial a été choisi. Ce modèle qui sera descriptif et représentatif des modèles, d'où la nécessité de choisir un modèle de second ordre. Les modèles mathématiques ne prennent en compte que les facteurs avec une valeur  $p < 0,05$ . Les modèles mathématiques s'écrivent comme suit :

$$\text{ATP1h} = 46,5 + 29,56V + 55,86T^2 \quad (R^2=0,86, R^2_{aj}=0,61) \quad \text{eq.1}$$

$$\text{ATP24h} = 432,83 + 68,94T + 31,29V - 25,67PI - 41,41T^2 - 48,16PI^2 \quad (R^2=0,96, R^2_{aj}=0,89) \quad \text{eq.2}$$

$$\text{Consommation d'eau} = 1,03 - 0,18T - 0,42V*PI + 0,72PI^2 \quad (R^2=0,96, R^2_{aj}=0,88) \quad \text{eq.3}$$

Les résultants ont montré que les coefficients de régression pour les réponses ( $R^2$ ) sont satisfaisants pour le modèle obtenu à partir de l'analyse de régression concernant l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau. Les valeurs  $R^2$  ajustées ( $R^2_{aj}$ ) de 0,61; 0,89 et 0,88 pour l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau signifient que le modèle explique respectivement environ 61%, 89% et 88% de l'écart. De plus, ce résultat suggère que le modèle établi correspond bien aux informations expérimentales.

Sur la base de l'équation de régression, qui est dérivée de modèles quadratiques, les représentations graphiques de surface de réponse sont formées pour comprendre les effets des variables indépendantes sur les réponses et également pour évaluer le changement des surfaces de réponse. Selon les graphiques de surface de réponse, la réduction de la vitesse de lavage a favorisé un meilleur nettoyage, c'est-à-dire, une moindre valeur en RLU pour l'analyse ATP à 1h et à 24h. Par contre, cette réduction a causé une augmentation de la consommation d'eau. De plus, il est observé que l'augmentation de la température et la pression d'impact a favorisé le nettoyage.

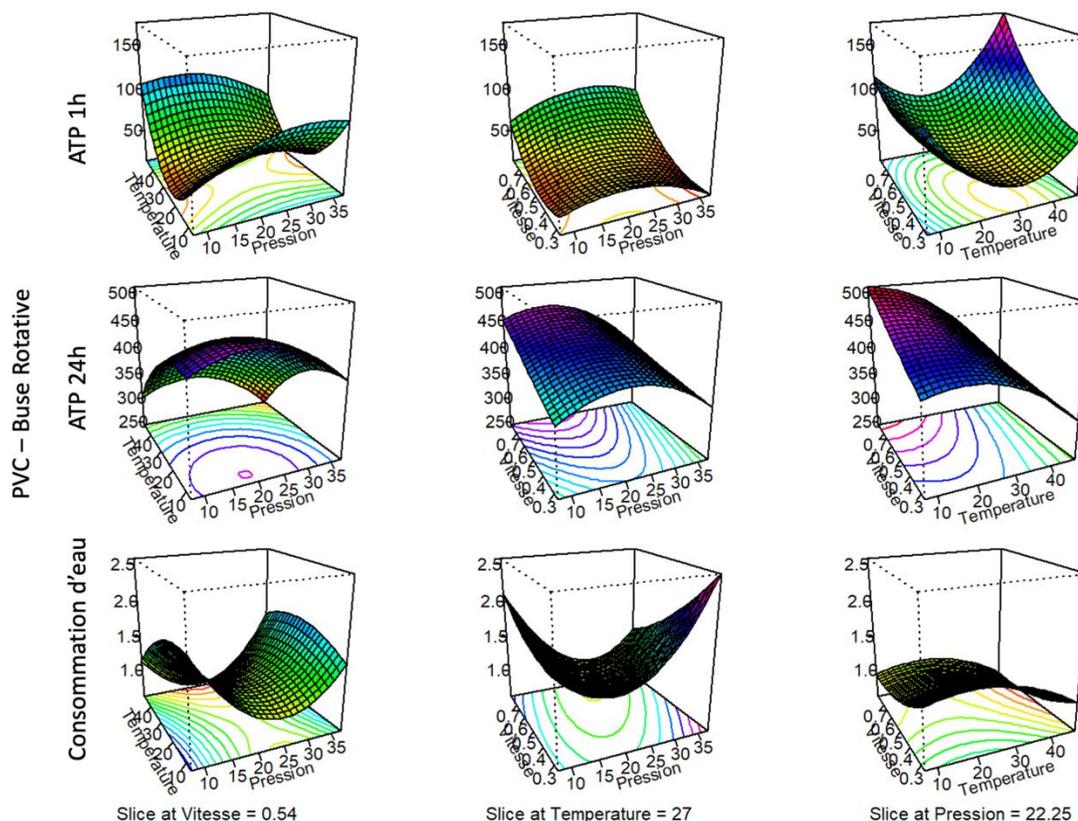


Figure 1. Représentations graphiques de surface de réponse des plaques en PVC lavées avec la buse rotative.

### Analyse des plaques en HDPE

Pour le lavage des plaques en HDPE, l'analyse de variance (ANOVA) du modèle de surface de réponse quadratique a prédit les P-values de 0,11; 0,0007 et 0,15 pour l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement. Seulement le modèle de surface de réponse quadratique de l'ATP 24h a été significatif ( $p < 0,05$ ). Les modèles mathématiques pour les réponses s'écrivent comme suit :

$$\text{ATP1h} = 57,00 + 47,24T^2 \quad (R^2=0,77, R^2_{aj}=0,37) \quad \text{eq.4}$$

$$\text{ATP24h} = 186,50 + 47,30T + 194,87T^2 \quad (R^2=0,96, R^2_{aj}=0,89) \quad \text{eq.5}$$

$$\text{Consommation d'eau} = 0,96 - 0,43T*V \quad (R^2=0,86, R^2_{aj}=0,61) \quad \text{eq.6}$$

Les coefficients de régression pour les réponses ( $R^2$ ) sont satisfaisants pour le modèle obtenu à partir de l'analyse de régression concernant l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau. Les valeurs  $R^2$  ajustées ( $R^2_{aj}$ ) expliquent environ 37%, 89% et 61% de l'écart pour l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement. Conforme aux représentations graphiques de surface de réponse, le lavage a été plus efficace, c'est-à-dire les valeurs en RLU plus petit, quand la température a été entre 20 à 30 °C pour les analyses d'ATP 1h et 24h.

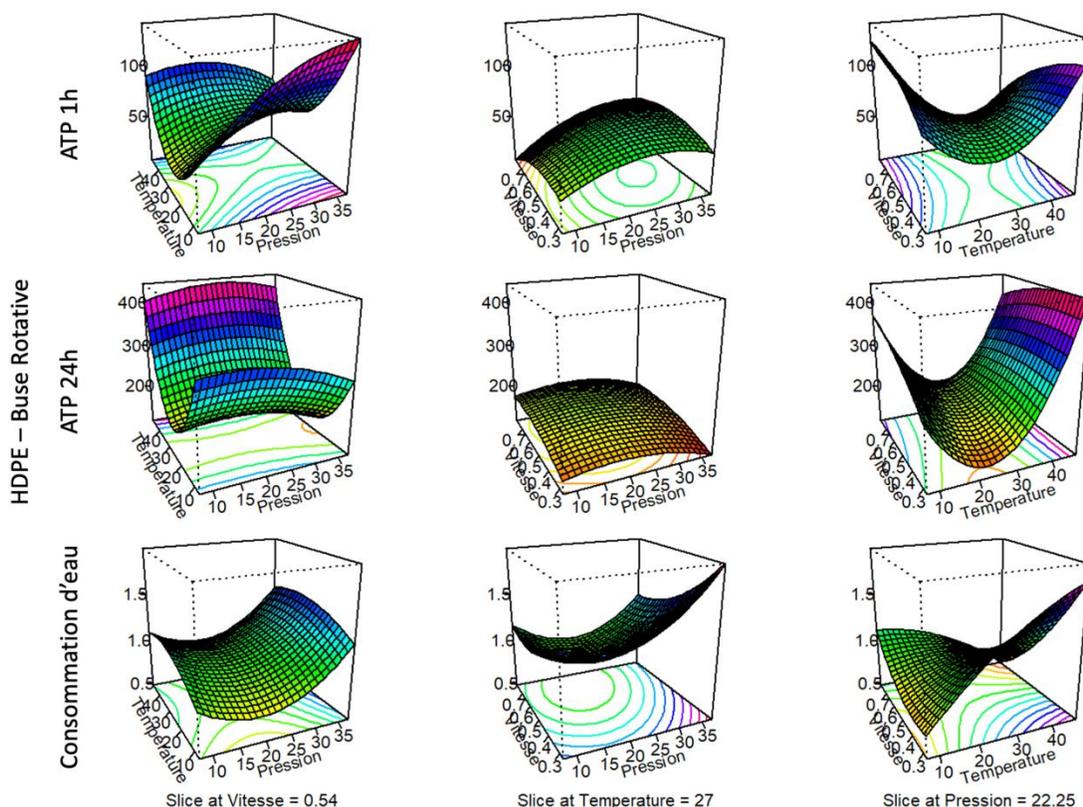


Figure 2. Représentations graphiques de surface de réponse des plaques en HDPE lavées avec la buse rotative.

### Analyse des plaques en acier inoxydable

Pour le lavage des plaques en acier inoxydable, l'analyse de variance (ANOVA) du modèle de surface de réponse quadratique a prédit les P-values de 0,17; 0,06 et 0,07 pour l'ATP1h, l'ATP24h et la Consommation d'eau, respectivement. Les modèles de surfaces de réponses quadratiques n'ont pas été significatifs ( $p > 0,05$ ). Les modèles mathématiques pour les réponses s'écrivent comme suit :

$$\text{ATP1h} = 124,83 - 56,09T^2 \quad (R^2=0,74, R^2_{aj}=0,27) \quad \text{eq.7}$$

$$\text{ATP24h} = 300,67 - 54,73T + 79,86T^2 \quad (R^2=0,85, R^2_{aj}=0,58) \quad \text{eq.8}$$

$$\text{Consommation d'eau} = 0,87 + 0,69P^2 \quad (R^2=0,78, R^2_{aj}=0,41) \quad \text{eq.9}$$

Les coefficients de régression pour les réponses ( $R^2$ ) sont satisfaisants pour le modèle obtenu à partir de l'analyse de régression concernant l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau. Les valeurs  $R^2$  ajustées ( $R^2_{aj}$ ) expliquent environ 27%, 58% et 41% de l'écart pour l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement.

Les représentations graphiques de surface de réponse des plaques en acier inoxydable montrent une tendance d'avoir de valeurs plus petites en RLU pour les analyses ATP quand la température est plus haute et la vitesse et la pression sont plus bas.

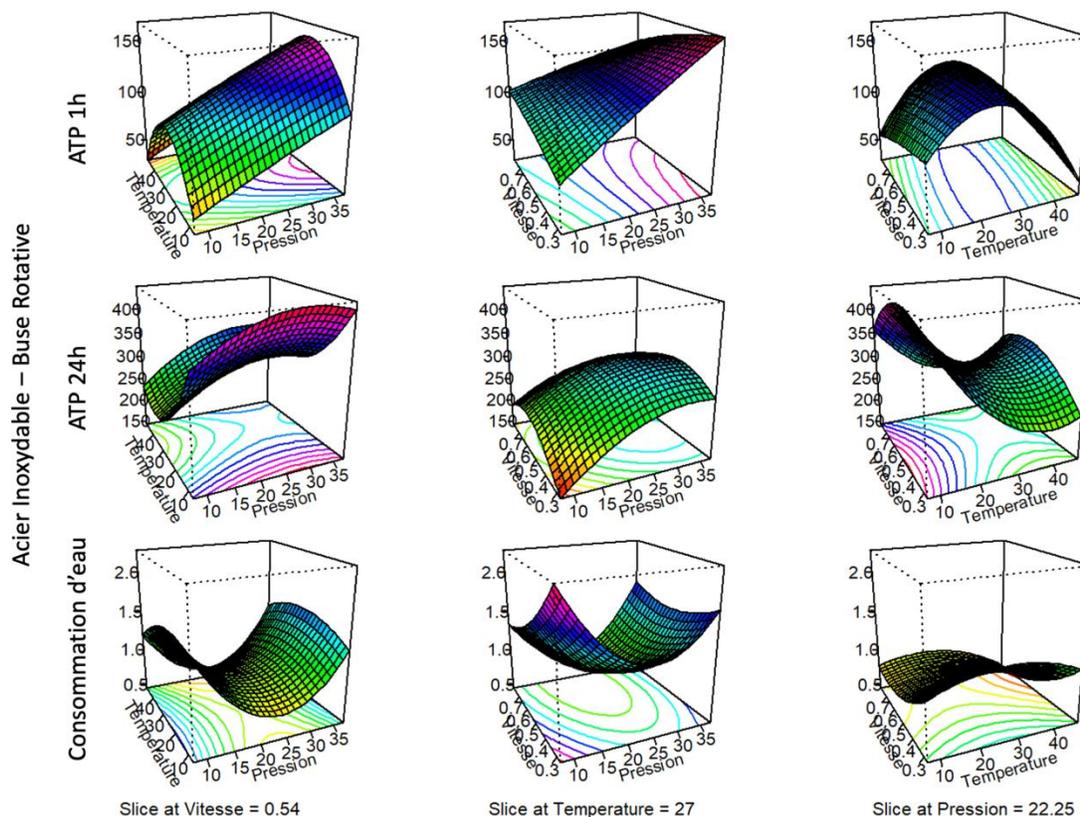


Figure 3. Représentations graphiques de surface de réponse des plaques en acier inoxydable lavées avec la buse rotative.

### Analyse de plaques en fonte

Pour le lavage des plaques en fonte, l'analyse de variance (ANOVA) du modèle de surface de réponse quadratique a prédit les P-values de 0,17; 0,54 et 0,005 pour l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement. Seulement le modèle de surface de réponse quadratique pour la consommation d'eau a été significatif ( $p < 0,05$ ). Les modèles mathématiques pour les réponses s'écrivent comme suit :

$$\text{ATP24h} = 88,67 - 48,58\text{PI}^2 \quad (R^2=0,79, R^2_{aj}=0,41) \quad \text{eq.10}$$

$$\text{Consommation d'eau} = 0,63 - 0,26\text{T} - 0,21\text{PI} + 0,27\text{T}*\text{PI} + 0,69\text{PI}^2 \quad (R^2=0,94, R^2_{aj}=0,85) \quad \text{eq.11}$$

Les coefficients de régression pour les réponses ( $R^2$ ) sont satisfaisants pour le modèle obtenu à partir de l'analyse de régression concernant l'ATP24h et la consommation d'eau. Les valeurs  $R^2$  ajustées ( $R^2_{aj}$ ) expliquent environ 41% et 85% de l'écart pour l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement.

Selon les représentations graphiques de surface de réponse, le lavage a été plus efficace, quand la température a été entre 20 à 30 °C. Une pression d'impact plus forte a tendance à réduire les valeurs en RLU. Par contre, une consommation d'eau moindre a été observée en augmentant la température avec une pression d'impact entre 20 et 30 MPa.

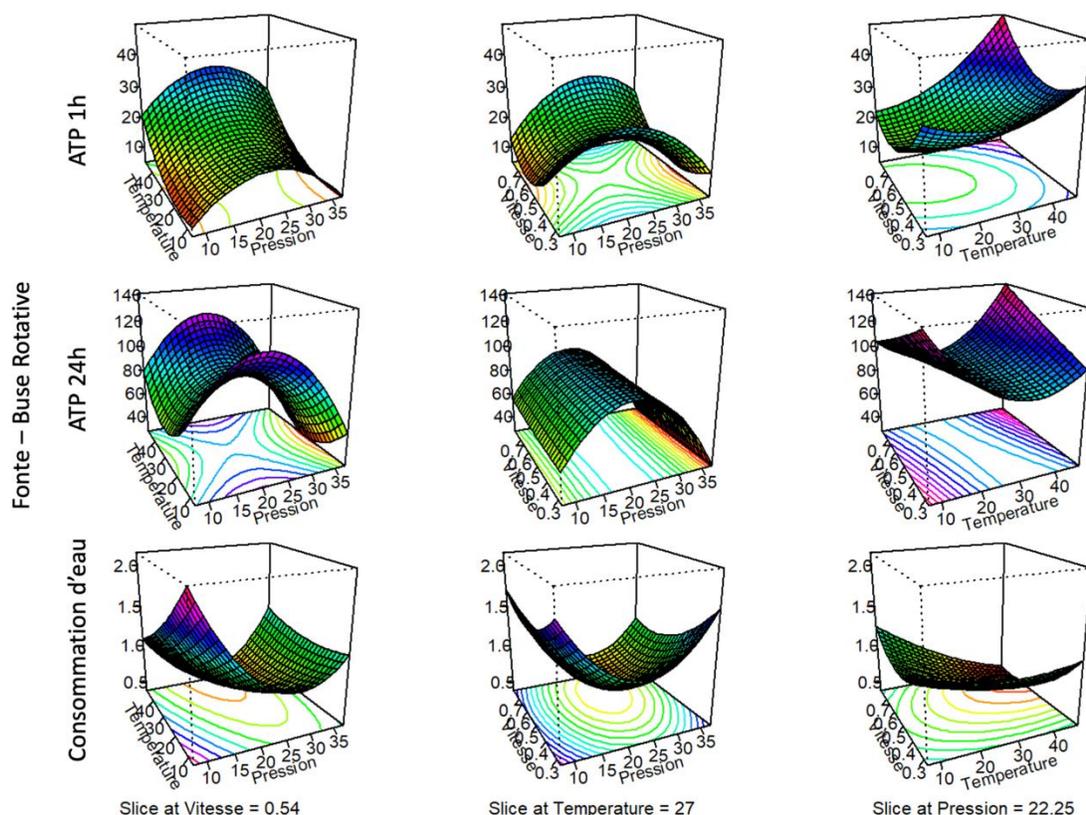


Figure 4. Représentations graphiques de surface de réponse des plaques en fonte lavées avec la buse rotative.

### Analyse des plaques en béton coulé sur place

Pour le lavage des plaques en béton coulé sur place (BCP), l'analyse de variance (ANOVA) du modèle de surface de réponse quadratique a prédit les P-values de 0,12; 0,01 et 0,02 pour l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement. Les modèles de surfaces de réponses quadratiques pour l'ATP24h et la consommation d'eau ont été significatifs ( $p < 0,05$ ). Les modèles mathématiques pour les réponses s'écrivent comme suit :

$$\text{ATP1h} = 154,16 + 103,67V \quad (R^2=0,84, R^2_{aj}=0,56) \quad \text{eq.12}$$

$$\text{ATP24h} = 148,33 + 48,41V + 64,57PI + 134,00T^2 \quad (R^2=0,93, R^2_{aj}=0,79) \quad \text{eq.13}$$

$$\text{Consommation d'eau} = 0,96 - 0,31V - 0,59V \cdot PI + 0,28V^2 + 0,67PI^2 \quad (R^2=0,97, R^2_{aj}=0,92) \quad \text{eq.14}$$

Les coefficients de régression pour les réponses ( $R^2$ ) sont satisfaisants pour le modèle obtenu à partir de l'analyse de régression concernant l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau. Les valeurs  $R^2$  ajustées ( $R^2_{aj}$ ) expliquent environ 56%, 79% et 92% de l'écart pour l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement.

Conforme aux représentations graphiques de surface de réponse, il est possible d'observer une réduction des valeurs en RLU en réduisant la vitesse et la pression d'impact avec une température entre 20 et 30 °C. De plus, la

consommation d'eau a été influencée par la vitesse et la pression d'impact, dont une vitesse plus élevée avec une pression entre 20 et 30 MPa réduit la consommation d'eau.

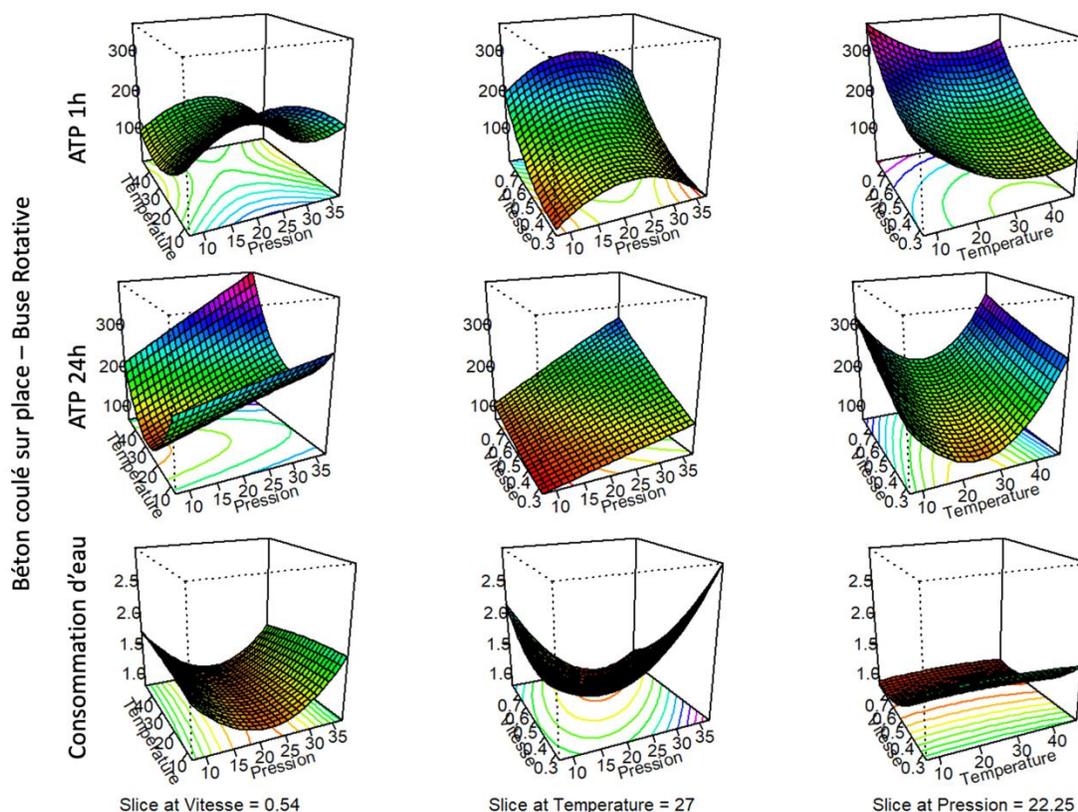


Figure 5. Représentations graphiques de surface de réponse des plaques en béton coulé sur place lavées avec la buse rotative.

### Analyse des plaques en béton vibré pressé

Pour le lavage des plaques en béton vibré pressé (BVP), l'analyse de variance (ANOVA) du modèle de surface de réponse quadratique a prédit les P-values de 0,50; 0,01 et 0,005 pour l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement. Également à l'analyse pour les plaques en BCP, les modèles de surfaces de réponses quadratiques ont été significatif ( $p < 0,05$ ) pour l'ATP24h et la consommation d'eau. Les modèles mathématiques pour les réponses s'écrivent comme suit :

$$\text{ATP24h} = 718,50 - 166,96V^2 - 270,77 PI^2 \quad (R^2=0,90, R^2_{aj}=0,73) \quad \text{eq.15}$$

$$\text{Consommation d'eau} = 1,07 - 0,27V - 0,25T^2 + 0,54PI^2 \quad (R^2=0,94, R^2_{aj}=0,84) \quad \text{eq.16}$$

Les coefficients de régression pour les réponses ( $R^2$ ) sont satisfaisants pour le modèle obtenu à partir de l'analyse de régression concernant l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau. Les valeurs  $R^2$  ajustées ( $R^2_{aj}$ ) expliquent environ 73% et 84% de l'écart pour l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement.

Les représentations graphiques de surface de réponse montrent pour l'analyse d'ATP 24h que des valeurs plus petites sont obtenues dans deux situations : 1) en réduisant la température, la vitesse et la pression ou 2) en augmentant la pression d'impact et réduisant la température et la vitesse. Une consommation d'eau plus petite est toutefois observée quand la vitesse est augmentée et la pression d'impact utilisée se situe entre 15 et 25 MPa.

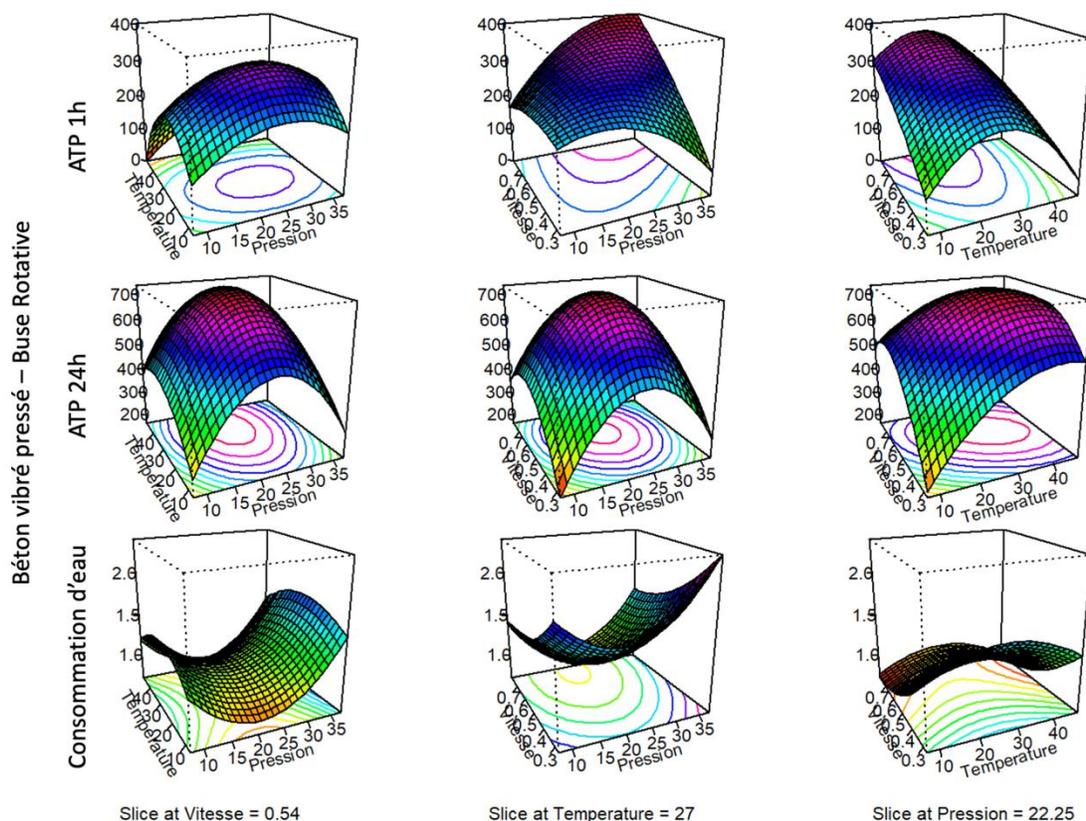


Figure 6. Représentations graphiques de surface de réponse des plaques en béton vibré pressé lavées avec la buse rotative.

## LAVAGE AVEC LA BUSE PLATE

### Analyse des plaques en PVC

Pour le lavage des plaques en PVC, l'analyse de variance (ANOVA) du modèle de surface de réponse quadratique a prédit les P-values de 0,03; 0,11 et 0,001 pour l'ATP1h, l'ATP24h et la Consommation d'eau, respectivement. Les modèles de surfaces de réponses quadratiques ont été significatifs pour l'ATP1h et la consommation d'eau ( $p < 0,05$ ). Les modèles mathématiques pour les réponses s'écrivent comme suit :

$$\text{ATP1h} = 74,67 + 34,52T^2 - 39,16P^2 \quad (R^2=0,84, R^2_{aj}=0,56) \quad \text{eq.17}$$

$$\text{ATP24h} = 470,50 - 62,95T - 94,33T^2 \quad (R^2=0,84, R^2_{aj}=0,56) \quad \text{eq.18}$$

$$\text{Consommation d'eau} = 1,2 + 0,32V - 1,78PI - 0,56V*PI + 1,44PI^2 \quad (R^2=0,97, R^2_{aj}=0,92) \quad \text{eq.19}$$

Les coefficients de régression pour les réponses ( $R^2$ ) sont satisfaisants pour le modèle obtenu à partir de l'analyse de régression concernant l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau. Les valeurs  $R^2$  ajustées ( $R^2_{aj}$ ) expliquent environ 56%, 56% et 92% de l'écart pour l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement.

Conformément aux représentations graphiques de surface de réponse, les valeurs d'ATP à 1h sont plus petites quand les plaques sont lavées en utilisant une température entre 20 et 30 °C. La consommation d'eau a été plus petite en utilisant une pression d'impact entre 0,35 et 0,5.

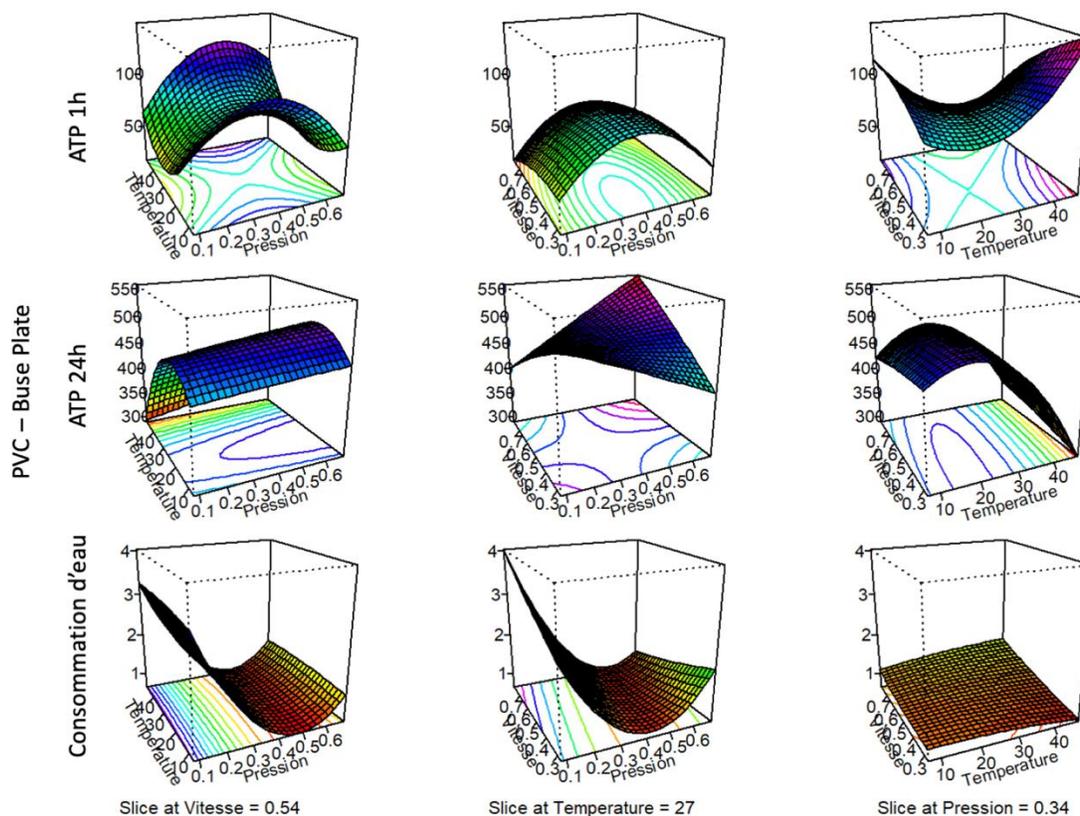


Figure 7. Représentations graphiques de surface de réponse des plaques en PVC lavées avec la buse plate.

### Analyse des plaques en HDPE

Pour le lavage des plaques en HDPE, l'analyse de variance (ANOVA) du modèle de surface de réponse quadratique a prédit les P-values de 0,22; 0,007 et 0,002 pour l'ATP1h, l'ATP24h et la Consommation d'eau, respectivement. Les modèles de surfaces de réponses quadratiques pour l'ATP24h et la consommation d'eau ont été significatifs ( $p < 0,05$ ). Les modèles mathématiques pour les réponses s'écrivent comme suit :

$$\text{ATP24h} = 195 + 197,96T^2 \quad (R^2=0,90, R^2_{aj}=0,73) \quad \text{eq.20}$$

$$\text{Consommation d'eau} = 1,4 - 0,81PI - 0,38V*PI - 0,20T^2 + 0,63PI^2 \quad (R^2=0,96, R^2_{aj}=0,91) \quad \text{eq.21}$$

Les coefficients de régression pour les réponses ( $R^2$ ) sont satisfaisants pour le modèle obtenu à partir de l'analyse de régression concernant l'ATP24h et la consommation d'eau. Les valeurs  $R^2$  ajustées ( $R^2_{aj}$ ) expliquent environ 73% et 91% de l'écart pour l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement.

Selon les représentations graphiques de surface de réponse, une température entre 20 et 30 °C a causé une réduction des valeurs en RLU à 24h. De plus, une pression d'impact entre 0,4 et 0,7 MPa a entraîné une consommation d'eau plus petite.

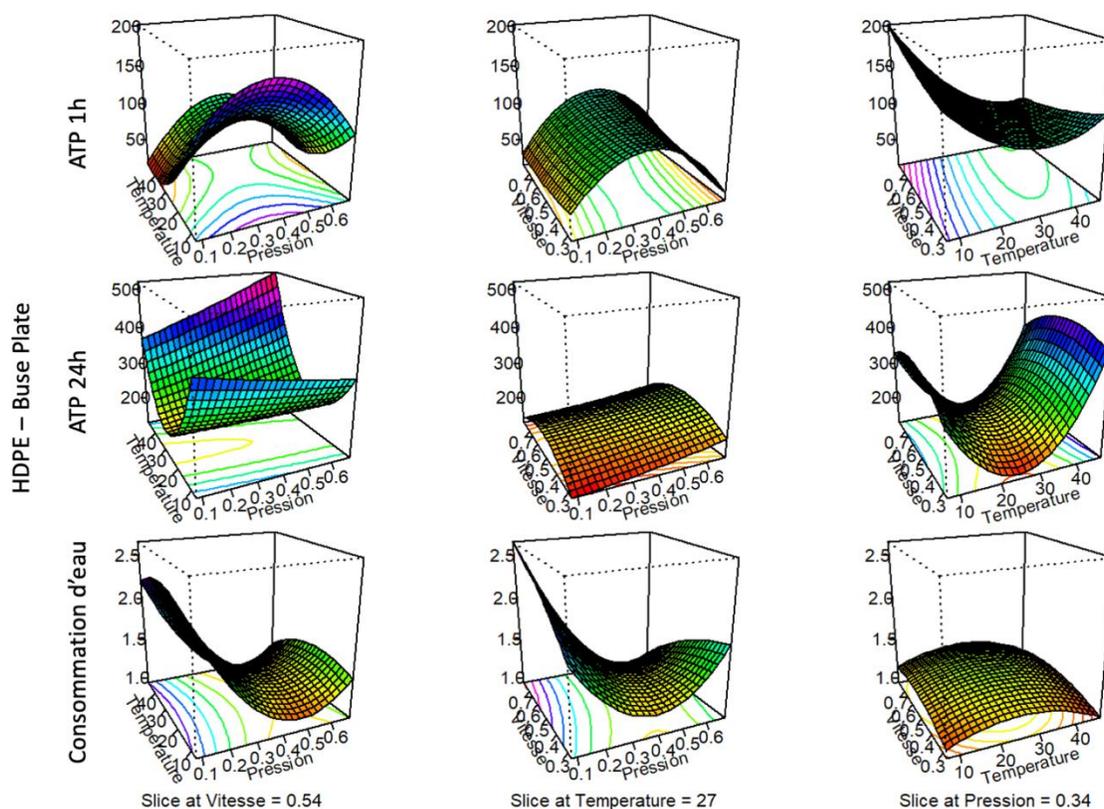


Figure 8. Représentations graphiques de surface de réponse des plaques en HDPE lavées avec la buse plate.

### Analyse des plaques en acier inoxydable

Pour le lavage des plaques en acier inoxydable, l'analyse de variance (ANOVA) du modèle de surface de réponse quadratique a prédit les P-values de 0,12; 0,79 et 0,0003 pour l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement. Seulement le modèle de surface de réponse quadratique pour la consommation d'eau a été significatif ( $p < 0,05$ ). Les modèles mathématiques pour les réponses s'écrivent comme suit :

$$\text{ATP1h} = 151,83 - 67,82T^2 \quad (R^2=0,74, R^2_{aj}=0,30) \quad \text{eq.22}$$

$$\text{ATP24h} = 358,67 + 267,31V * PI \quad (R^2=0,80, R^2_{aj}=0,46) \quad \text{eq.23}$$

$$\text{Consommation d'eau} = 0,93 + 0,22V - 1,01PI - 0,47V*PI + 0,33V^2 + 1,03PI^2 \quad (R^2=0,97, R^2_{aj}=0,94)$$

eq.24

Les coefficients de régression pour les réponses ( $R^2$ ) sont satisfaisants pour le modèle obtenu à partir de l'analyse de régression concernant l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau. Les valeurs  $R^2$  ajustées ( $R^2_{aj}$ ) expliquent environ 30%, 46% et 94% de l'écart pour l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement.

Les représentations graphiques de surface de réponse montrent que la consommation d'eau a été plus petite quand les lavages ont été faits utilisant une pression d'impact entre 0,35 et 0,55 MPa accompagné d'une vitesse entre 0,4 et 0,6 m/s.

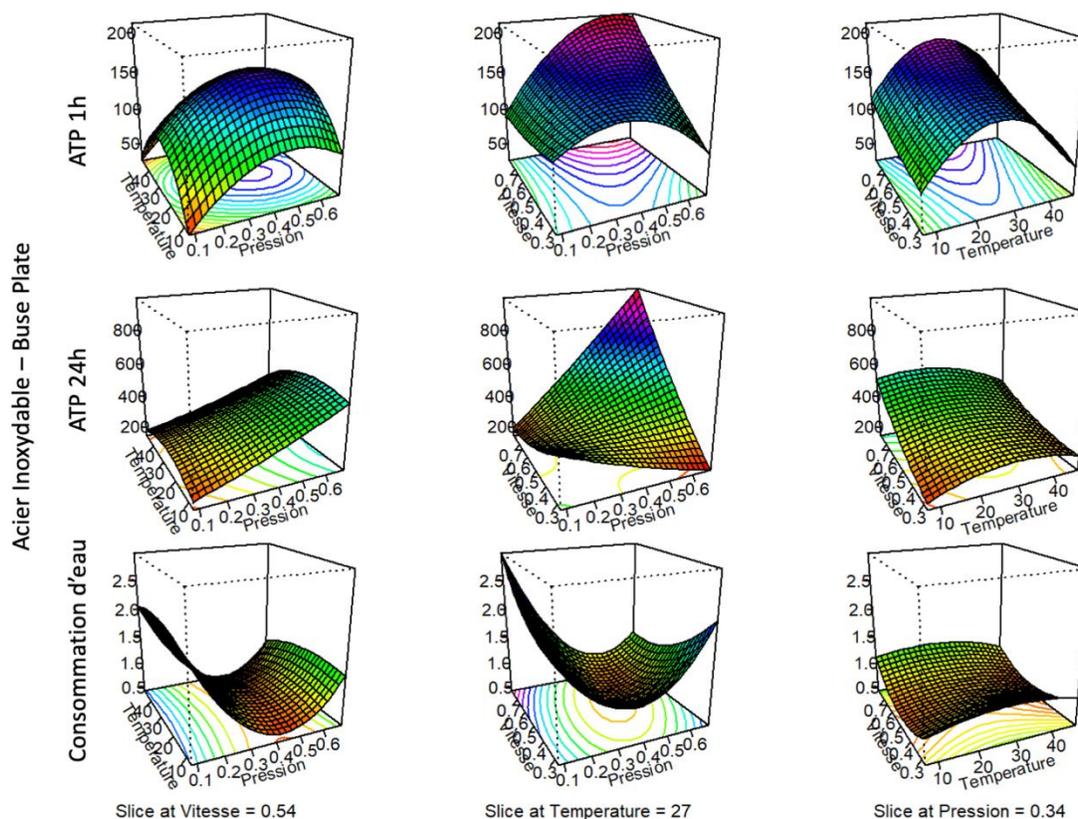


Figure 9. Représentations graphiques de surface de réponse des plaques en acier inoxydable lavées avec la buse plate.

### Analyse des plaques en fonte

Pour le lavage des plaques en fonte, l'analyse de variance (ANOVA) du modèle de surface de réponse quadratique a prédit les P-values de 0,05; 0,49 et 0,08 pour l'ATP1h, l'ATP24h et la Consommation d'eau, respectivement. Seulement le modèle de surface de réponse quadratique pour l'ATP 1h a été significatif ( $p < 0,05$ ). Les modèles mathématiques pour les réponses s'écrivent comme suit :

$$\text{ATP1h} = 15,67 + 7,52V - 8,03T*V + 7,68V*PI + 9,94PI^2 \quad (R^2=0,93, R^2_{aj}=0,82) \quad \text{eq.25}$$

$$\text{Consommation d'eau} = 2,9 - 2,42V + 1,15PI^2 \quad (R^2=0,92, R^2_{aj}=0,80) \quad \text{eq.26}$$

Les coefficients de régression pour les réponses ( $R^2$ ) sont satisfaisants pour le modèle obtenu à partir de l'analyse de régression concernant l'ATP1h et la consommation d'eau. Les valeurs  $R^2$  ajustées ( $R^2_{aj}$ ) expliquent environ 82% et 80% de l'écart pour l'ATP1h et la consommation d'eau, respectivement.

Selon les représentations graphiques de surface de réponse, la réduction de la vitesse avec une pression d'impact entre 0,3 et 0,6 a favorisé la réduction dans la valeur en RLU pour l'analyse ATP à 1h. Pour la consommation d'eau, il est possible d'observer une tendance d'avoir une réduction en augmentant la pression d'impact.

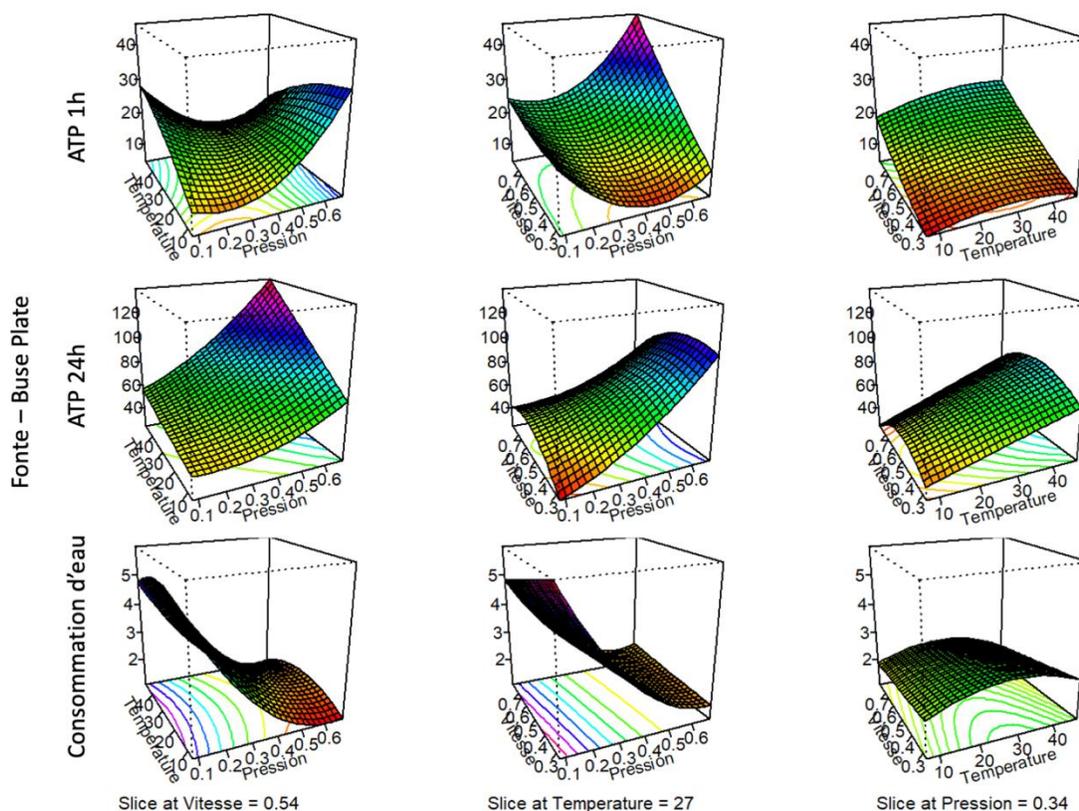


Figure 10. Représentations graphiques de surface de réponse des plaques en fontes lavées avec la buse plate

### Analyse des plaques en béton coulé sur place

Pour le lavage des plaques en béton coulé sur place (BCP), l'analyse de variance (ANOVA) du modèle de surface de réponse quadratique a prédit les P-values de 0,13; 0,43 et 0,009 pour l'ATP1h, l'ATP24h et la Consommation d'eau, respectivement. Seulement le modèle de surface de réponse quadratique pour la consommation d'eau a été significatif ( $p < 0,05$ ). Les modèles mathématiques pour les réponses s'écrivent comme suit :

$$\text{ATP1h} = 620,83 - 1147,71PI \quad (R^2=0,79, R^2_{aj}=0,42) \quad \text{eq.27}$$

$$\text{ATP24h} = 315,00 - 156,54T \quad (R^2=0,79, R^2_{aj}=0,43) \quad \text{eq.28}$$

$$\text{Consommation d'eau} = 1,27 - 2,83PI + 2,18PI^2 \quad (R^2=0,94, R^2_{aj}=0,83) \quad \text{eq.29}$$

Les coefficients de régression pour les réponses ( $R^2$ ) sont satisfaisants pour le modèle obtenu à partir de l'analyse de régression concernant l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau. Les valeurs  $R^2$  ajustées ( $R^2_{aj}$ ) expliquent environ 42%, 43% et 83% de l'écart pour l'ATP1h, l'ATP24h et la consommation d'eau, respectivement.

Conforme aux représentations graphiques de surface de réponse, l'augmentation de la température et réduction de la vitesse entraîne une réduction des valeurs d'ATP. Tandis que la pression d'impact entre 0,4 et 0,6 MPa réduit la consommation d'eau.

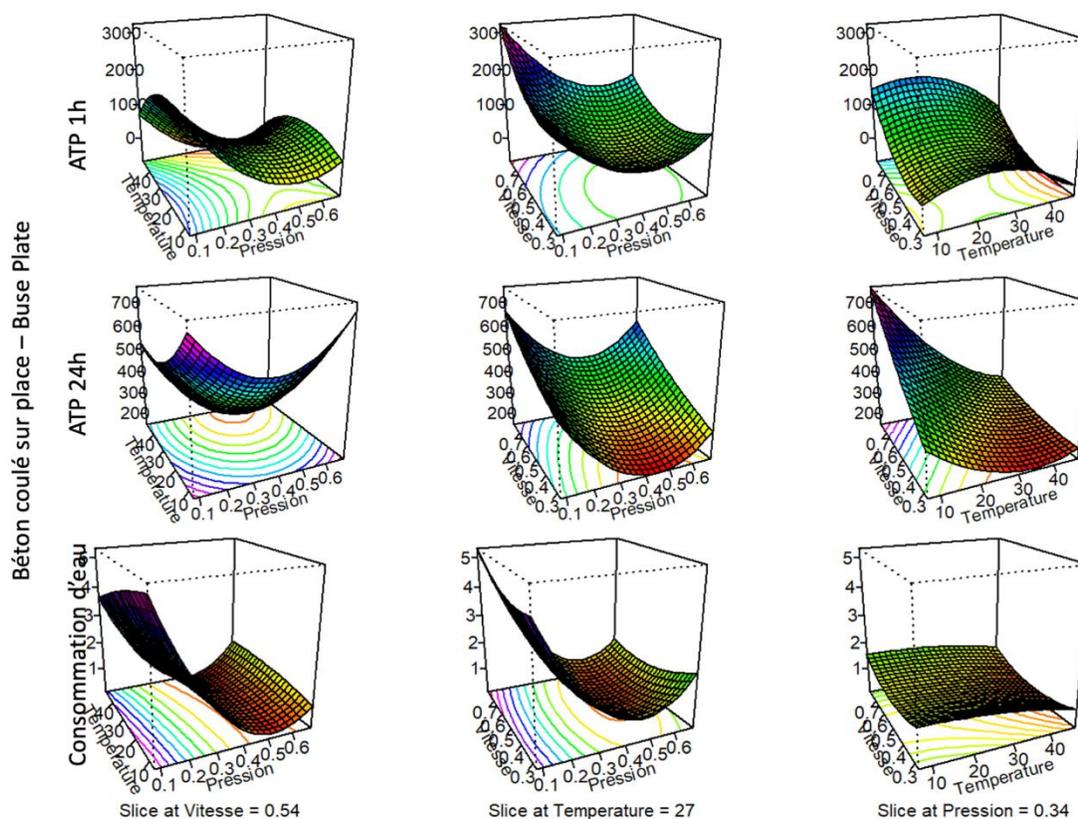


Figure 11. Représentations graphiques de surface de réponse des plaques en béton coulé sur place lavées avec la buse plate.

### Analyse des plaques en béton vibré pressé

Pour le lavage des plaques en béton pressé vibré, l'analyse de variance (ANOVA) du modèle de surface de réponse quadratique a prédit les P-values de 0,22; 0,24 et 0,001 pour l'ATP1h, l'ATP24h et la Consommation d'eau, respectivement. Seulement le modèle de surface de réponse quadratique pour la consommation d'eau a été significatif ( $p < 0,05$ ). Les modèles mathématiques pour les réponses s'écrivent comme suit :

$$\text{Consommation d'eau} = 0,70 - 2,18\text{PI} - 0,60\text{V}*\text{PI} + 2,01\text{PI}^2 \quad (R^2=0,98, R^2_{aj}=0,95) \quad \text{eq.30}$$

Le coefficient de régression ( $R^2$ ) pour le modèle obtenu à partir de l'analyse de régression concernant la consommation d'eau est satisfaisant. La valeur  $R^2$  ajustée ( $R^2_{aj}$ ) explique environ 95% de l'écart pour la consommation d'eau.

Les représentations graphiques de surface de réponse montrent une réduction dans la consommation d'eau quand les lavages ont été réalisés en utilisant une pression d'impact entre 0,35 et 0,55.

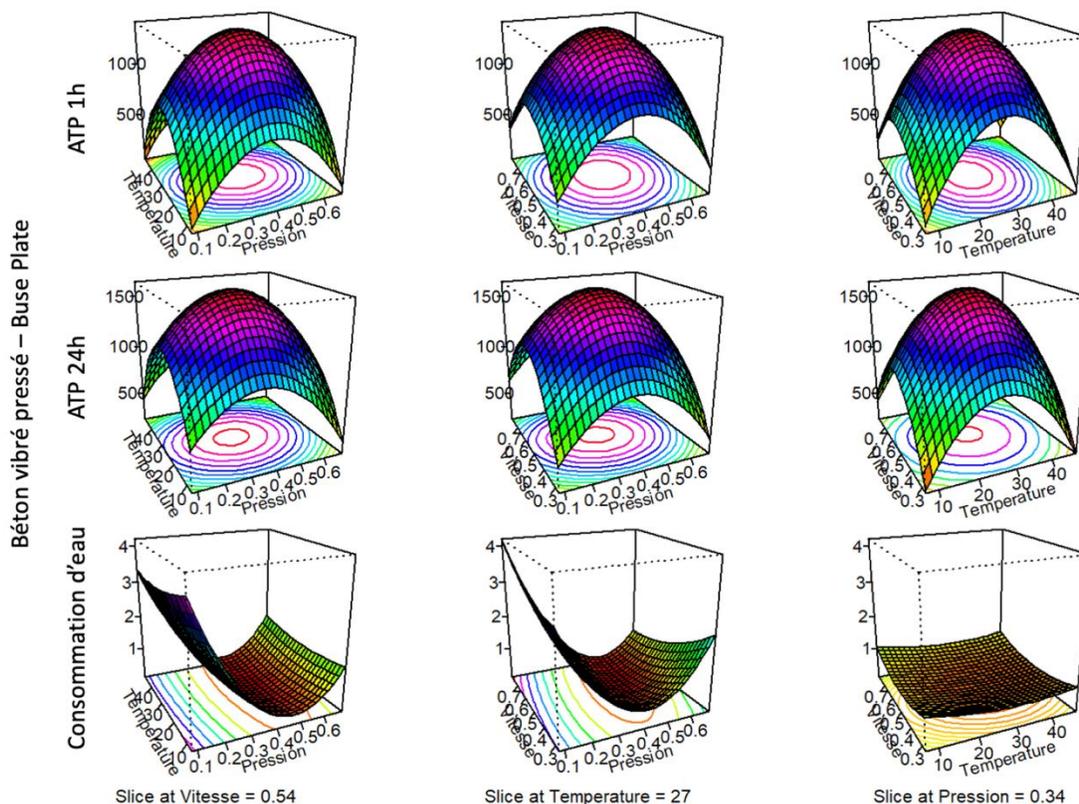


Figure 12. Représentations graphiques de surface de réponse des plaques en béton vibré pressé lavées avec la buse plate.