

LITIÈRE DE FUMIER RECYCLÉ EN PRODUCTION LAITIÈRE

ÉTAT DES CONNAISSANCES ET BALISES



Ce document a été rédigé dans le cadre du projet de recherche « *Développement de stratégies optimales pour l'utilisation de litières à base de fumier en production laitière* » et financé par Agriculture et Agroalimentaire Canada (**Programme canadien d'adaptation agricole, 2014-2019**). Il a été amendé suite à la disponibilité des résultats d'une 2^e étude réalisée par la Faculté de médecine vétérinaire (FMV) de l'Université de Montréal de 2017 à 2020.

Réalisé en partenariat avec plusieurs instituts universitaires¹ et centres de recherche², le projet initial visait à déterminer les meilleures pratiques pour fabriquer de la litière de fumier recyclé et l'utiliser en production laitière, tout en tenant compte de la santé des travailleurs et des animaux. La littérature a été examinée pour déterminer les pratiques prometteuses et un protocole a été élaboré pour les tester. Les travaux, qui se sont échelonnés de 2016 à 2019, ont été réalisés sur le site du Centre de recherche en science animale de Deschambault (CRSAD, Québec, Canada) avec des vaches en stabulation entravée. Divers aspects entourant la fabrication et la gestion de la litière de fumier recyclé ont été étudiés, notamment : la comparaison des équipements de séparation, les techniques de conditionnement des solides séparés, l'application de cette litière sous les vaches, l'identification d'indicateurs de contrôle (mécaniques, physico-chimiques, microbiologiques et comportementaux), l'évaluation

des propriétés agronomiques de la fraction liquide, l'évaluation économique, ainsi que les facteurs sociaux et technico-économiques, qui sont déterminants dans l'adoption de nouvelles pratiques en matière de litière.

Lors de la seconde étude réalisée par la FMV (en collaboration avec l'Université Laval), 27 fermes utilisant de la LFR ont été comparées à 61 fermes utilisant une litière de paille. Des analyses bactériologiques traditionnelles et métagénomiques ont été réalisées sur les échantillons de litière ainsi que sur le réservoir de lait. La charge parasitaire dans les troupeaux a aussi été comparée, de même que le niveau d'hygiène et de confort. L'innocuité et la qualité alimentaire du lait de ces troupeaux ont aussi fait l'objet d'analyses. Finalement, la santé de la glande mammaire des animaux logés sur cette litière a été suivie pendant une période d'un an.

Basé sur l'expertise ainsi développée, le présent document comprend trois parties distinctes :

- 1. Généralités** : contexte, définitions et principe général entourant la litière de fumier recyclé;
- 2. État des connaissances** : connaissances à jour provenant autant de la littérature que des résultats des projets de recherche;
- 3. Balises** : conclusions, recommandations et valeurs encadrant la pratique.

¹ Institut universitaire de cardiologie et de pneumologie de Québec (IUCPQ), Université Laval, Université de Montréal, Université du Québec à Rimouski

² Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD)



À LA MÉMOIRE DE ALAIN FOURNIER, AGR.

Monsieur Fournier, l'instigateur du projet, avait regroupé les experts qui ont été impliqués à différents niveaux dans ces travaux de recherche. Visionnaire, Alain avait un dévouement sans borne pour l'agriculture du Québec. Le présent document lui est dédié; en espérant que le milieu agricole québécois se souviendra longtemps de lui. Merci Alain.

L'utilisation de litière pour assurer le bien-être et la santé des vaches est une pratique reconnue et encouragée dans l'industrie laitière. Les matériaux habituellement utilisés comme litière (paille, résidus organiques, copeaux de bois et sable) peuvent toutefois être dispendieux et difficiles d'accès. Recycler le fumier et la litière souillée produits par le troupeau peut donc présenter des avantages. La faisabilité de l'utilisation de la litière de fumier recyclé en production laitière a donc été étudiée en partenariat avec plusieurs instituts universitaires et centres de recherche dans deux projets. Un premier projet était financé dans le cadre du Programme canadien d'adaptation agricole d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Le deuxième projet était financé par une subvention de Novalait-CRIBIQ³-FRQNT⁴-CRSNG⁵ et visait à étudier les effets de cette litière sur la santé des animaux et des travailleurs de la ferme dans un contexte de ferme commerciale.

Les défis techniques liés à la fabrication de cette litière ont été examinés. Dans un premier temps, une recherche sur le sujet a été faite dans la littérature pour sélectionner des équipements et procédés prometteurs et réaliser un projet. Au cours de ce projet, des tests ont été effectués sur des équipements de séparation du fumier et sur des processus de conditionnement des solides de fumier. Les propriétés physiques des différents types de litière ont été analysées et des indicateurs de contrôle ont été identifiés pour être en mesure de comparer la litière de fumier recyclé avec des litières de paille ou de copeaux de bois. Une évaluation agronomique de la fraction liquide produite lors de la séparation a été réalisée afin de la comparer au fumier non traité traditionnellement utilisé pour la fertilisation des cultures nécessaires à l'alimentation du troupeau. Les coûts et l'impact environnemental liés à l'adoption de la litière de fumier recyclé ont été comparés à ceux de litières traditionnelles.

Lors de l'étude sur les fermes commerciales, la santé des animaux a été étudiée sur plusieurs aspects : dynamique des mammites cliniques et sous-cliniques, hygiène, confort, présence de parasites et maladies



infectieuses dans les fèces et la litière. De plus, des analyses physico-chimiques et bactériologiques ont été réalisées avec des échantillons de litière prête à l'emploi et en fin d'utilisation. Finalement, le lait de réservoir a aussi fait l'objet d'analyses afin de valider les impacts de la litière sur la salubrité du lait, sur son microbiote et sur la production fromagère.

Il ressort de ce projet que les séparateurs à vis ou à rouleaux sont les équipements les plus intéressants pour la séparation de la fraction solide du fumier tant au niveau de la performance que du coût. Un conditionnement de la fraction solide doit être réalisé pour réduire la teneur en eau du produit et partiellement réduire la concentration en agents pathogènes responsables de certaines maladies chez la vache. Ce processus biologique aérobie de compostage peut être fait en andains retournés mécaniquement, en piles statiques aérées ou en enceintes fermées aérées. Le projet a permis de déterminer que dans les conditions canadiennes où des écarts de température importants surviennent au cours d'une année, le compostage en enceinte fermée (composteur rotatif) produit une litière plus uniforme. Cependant, les études sur

³ Consortium de recherche et innovations en bioprocédés industriels au Québec (CRIBIQ)

⁴ Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FRQNT)

⁵ Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG)

les fermes commerciales ont permis de démontrer que les méthodes de production de cette litière ne permettent pas, présentement, de contrôler les agents pathogènes, incluant les bactéries causant la mammite, les bactéries du genre *Salmonelle* et les parasites. Ces derniers peuvent aussi affecter l'humain.

Un confort optimal des vaches est assuré en tout temps par un recouvrement total des stalles par la litière. Le temps de repos des vaches était équivalent sur les deux types de litière. Durant le projet sur les fermes commerciales, aucune différence dans le nombre total de mammites cliniques n'a été notée entre ces deux types de litière (LFR vs paille). Cependant, le nombre de mammites cliniques par *Klebsiella pneumoniae* était sept fois plus élevé dans les fermes LFR. Il s'agit d'un type de mammite clinique très sévère entraînant souvent la réforme ou la mort de l'animal.

La valeur agronomique de la fraction liquide produite lors de la séparation demeure intéressante pour les cultures. Les émissions de gaz à effet de serre liées à ces résidus fertilisants de production laitière sont plus faibles avec la litière de fumier recyclé comparativement à ceux de la litière de paille. De plus, les émissions de gaz à effet de serre de l'étable étaient plus faibles avec la litière de fumier recyclé qu'avec une litière de copeaux de bois.

La production et l'utilisation de la litière de fumier recyclé deviennent intéressantes financièrement dans les cas où ce système remplace une litière de paille appliquée à un taux d'au moins 6,1 kg de paille par jour par vache et que le prix d'achat de la paille est de 0,22 \$ le kg ou plus. Les impacts négatifs sur la santé animale (ex. mammite clinique) n'ont cependant pas été pris en compte dans ces calculs.

Aussi, l'adoption de ce type de litière doit être accompagnée de changements de la part du producteur laitier. Le producteur laitier doit développer une expertise basée sur des mesures effectuées ainsi que sur ses observations lors du processus de conditionnement de la litière. La gestion et l'entretien de la litière de fumier recyclé sous les vaches sont aussi plus exigeants. Un taux d'humidité élevé de celle-ci entraîne des problèmes de compactage et pourrait affecter l'hygiène des vaches. De plus, l'utilisation de la litière de fumier recyclé peut entraîner une modification du microbiote du lait qui peut se répercuter sur sa qualité.

En conclusion, l'adoption de la litière de fumier recyclé peut s'avérer intéressante et avantageuse pour les producteurs laitiers. Cependant, ceux qui en font le choix doivent être prêts à relever les défis techniques et de santé animale lui étant rattachés.



Liste des illustrations	iv
Liste des tableaux	iv

Partie 1 – Généralités

Contexte	2
Programme pancanadien des Producteurs laitiers du Canada	2
Bien-être animal	2
Utilité de la litière	2
Litières	3
Types de matériaux.....	3
Critères de sélection	3
Litière de fumier recyclé (LFR)	4
Processus de fabrication	5
Séparation.....	6
Conditionnement	7
Application de la litière de fumier recyclé	8

Partie 2 – État des connaissances

Propriétés microbiologiques de la litière	10
Microorganismes	10
Impact de la séparation.....	10
Effets du conditionnement.....	11
Impact de l'épaisseur	12
Dangereux pour ma santé?	13
Confort et santé des vaches	15
Type et surface de stalle	16
Temps de repos, blessures, boiterie et propreté.....	16
Santé mammaire	19
Qualité du lait	20

Analyse économique de la substitution de la paille par la LFR	21
Coût de la litière de fumier recyclé.....	22
Coût de la litière de paille	22
Seuil de rentabilité	22
Résultats de l'analyse économique.....	23
En bref.....	24
Intérêt agronomique : la fraction liquide.....	25
Propriétés physico-chimiques	25
Valeur fertilisante	26
Santé des sols	26
Et l'environnement dans tout cela?	27
L'agriculture, source importante d'émissions de GES et de polluants	27
Analyse environnementale.....	27
Impact environnemental lié aux litières.....	27
Émissions de GES et d'ammoniac de l'étable.....	28
Perception et expériences des agriculteurs.....	29
Changements majeurs	29
Maîtriser les procédés	29
Conditionnement	30
Lit douillet	30
Considérations liées au bien-être animal	30
Équilibre entre confort et santé animale.....	30
Encore plusieurs questions.....	30
Partie 3 – Balises entourant la pratique	
Gestion des risques	34
Réduction de la teneur en eau.....	34
Réduction de la charge microbienne.....	35
Stabilisation de la matière organique	36
Outils de contrôle du conditionnement de la litière	36
Gestion du risque à la ferme.....	37
Points à retenir (étude et littérature)	38
Références	41

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Étapes de la production d'une litière de fumier recyclé.....	5
Figure 2 : Exemples de séparateur à vis (a), à rouleaux (b) et centrifuge (c)	6
Figure 3 : Proportion des observations pour lesquelles les vaches ont été classifiées sales (% des observations effectuées) dans le projet du CRSAD	17
Figure 4 : Scores d'hygiène des différentes zones des vaches recrutées dans l'étude sur les fermes commerciales	17
Figure 5 : Scores des jarrets des vaches recrutées dans l'étude sur les fermes commerciales.....	17
Figure 6 : Comptage de cellules somatiques lactationnel moyen selon le type de litière	17
Figure 7 : Croissance d'Enterococcus faecalis non protéolytiques (gauche) et protéolytiques (droite) sur gélose de lait.....	20
Figure 8 : Points à retenir – Application de la LFR.....	18
Figure 9 : Thermomètres pour mesurer la température (a : cadran, b : digital)	36
Figure 10 : Procédés physiques pour concentrer les résidus solides.....	38
Figure 11 : Processus de conditionnement dans la production de la LFR.....	38
Figure 12 : Application de la LFR.....	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Risque d'exposition aux bioaérosols lié à la manipulation et à l'entreposage selon la méthode de compostage de la LFR.....	14
Tableau 2 : Détail du calcul du coût de fabrication de la LFR selon le séparateur utilisé	21
Tableau 3 : Évaluation du gain ou de la perte si la LFR est substituée à la paille selon la quantité de paille appliquée et le séparateur utilisé	23
Tableau 4 : Quantité de paille au-delà de laquelle il est rentable de substituer la LFR à la litière de paille selon la variation du prix d'achat de la paille et le séparateur utilisé pour produire la LFR.....	23
Tableau 5 : Ratios C/N, $(N-NH_4 + N-NO_3)/NTK$, N/P et $K/(Ca + Mg)$ de la fraction liquide produite par la centrifugeuse (C), le séparateur à rouleaux (SR) et le séparateur à vis (SV)	25
Tableau 6 : Coefficient d'efficacité de N, contenus en N, P_2O_5 et K_2O , taux d'application de N efficace et K_2O pour 40 kg de P_2O_5 des fractions liquides produites par la centrifugeuse (C), le séparateur à rouleaux (SR) et celui à vis (SV)	25
Tableau 7 : Émissions des scénarios de litière de paille et de LFR	28



PARTIE 1

GÉNÉRALITÉS

CONTEXTE

LITIÈRES

PROCESSUS DE FABRICATION

APPLICATION DE LA LITIÈRE

LITIÈRE

Définition : *La litière consiste en un lit de paille ou d'autres matières végétales, souple, isolant et absorbant, qu'on étend dans les bâtiments d'élevage pour servir de couche aux animaux* (Larousse, 2019).

En agriculture, elle est couramment employée pour différents types d'élevage comme chez les bovins laitiers, les chèvres, les moutons, la volaille et dans certains élevages porcins alternatifs.

CONTEXTE

PROGRAMME PANCANADIEN DES PRODUCTEURS LAITIERS DU CANADA

Au Canada, l'industrie laitière dispose d'un Code de bonnes pratiques pour le soin et la manipulation des bovins laitiers (CNSAE, 2009) et d'un programme d'évaluation du bien-être des animaux à la ferme. Ces deux dispositions préconisent l'utilisation de litière. Dans le Code de pratiques du CNSAE, il est convenu que la plupart des étables sont munies de logettes qui contiennent une litière offrant aux animaux une surface sèche, isolante et moelleuse qui favorise le repos, le confort et l'adoption de postures naturelles. **ProAction® est le programme de certification obligatoire pancanadien initié par les Producteurs laitiers du Canada**, dont l'un des six volets principaux porte sur le bien-être des animaux. L'un des principes généraux de ce volet spécifie que :

« [...] le logement des vaches soit conçu et entretenu de façon à assurer le confort et la santé des animaux. La propreté des animaux témoigne de la propreté des lieux, qui contribue à la santé du pis et à des comptes de cellules somatiques plus bas. »

BIEN-ÊTRE ANIMAL

Au-delà du programme de certification pancanadien, l'utilisation de la litière va de pair avec au moins trois des Cinq Libertés qui définissent le bien-être animal et qui sont énoncées par le *Farm Animal Welfare Council*. **Une bonne litière procure du confort, réduit le risque de blessures et peut permettre l'expression de comportements naturels propres à l'espèce**. De nombreuses études nord-américaines ont aussi démontré l'importance d'utiliser une quantité suffisante de litière sèche pour le logement des vaches, quel que soit le revêtement de sol, afin de favoriser le temps de repos et de limiter les risques de blessures et de boiterie.

UTILITÉ DE LA LITIÈRE

La litière utilisée pour le logement des vaches laitières remplit plusieurs rôles :

- Assurer le **confort** et la **propreté** des animaux;
- Absorber et **retenir l'urine** des animaux;
- **Diminuer l'humidité**;
- **Diminuer la friction** des membres de l'animal au repos sans empêcher la traction;
- Améliorer la **mollesse** de la surface de la stalle ou de la logette.

LES LITIÈRES

TYPES DE MATÉRIAUX

Plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés comme litière par un producteur laitier : la paille de céréales, les copeaux de bois, le panic érigé, la mousse de tourbe, les résidus de culture (lin, maïs, soya et canola) et le sable ou le fumier recyclé. Certains matériaux sont meilleurs que d'autres, mais aucun n'est parfait.

CRITÈRES DE SÉLECTION

Une litière de qualité est entre autres : facilement disponible, d'un coût abordable, peu poussiéreuse, exempte d'agents pathogènes, apte à maintenir un bon recouvrement de la stalle ou de la logette et compatible avec les équipements de manutention du fumier.

Lors du choix de la litière à utiliser, un producteur laitier doit prendre en considération non seulement les **caractéristiques spécifiques de chaque type de matériau**, mais aussi les **contraintes d'utilisation** et la gestion qui sont propres à sa ferme. Par exemple, la quantité de litière requise varie selon le type de matériau utilisé, la fréquence de distribution et la surface à couvrir.

Plus la surface est dure, plus la quantité de litière nécessaire sera importante. Du point de vue du confort, il n'y a jamais trop de litière.

Selon des études récentes, la paille et les copeaux de bois sont les deux types de litières les plus utilisés au Canada. Au cours des dernières années, leur disponibilité et leur coût ont cependant amené certains producteurs à explorer l'adoption de **litières alternatives**, comme la litière de fumier recyclé (LFR).



LITIÈRE DE FUMIER RECYCLÉ (LFR)

Parmi les options de litières, **la LFR suscite l'intérêt de nombreux producteurs en raison de sa disponibilité théoriquement illimitée et la possibilité de la produire directement à la ferme**, et ce, tant pour des étables à stabulation libre qu'entravée.

LITIÈRE DE FUMIER RECYCLÉ

Définition : *Le terme « litière de fumier recyclé » (LFR) peut englober les produits de fumier préparés à partir d'une variété de procédés différents. Ces procédés commencent généralement par la séparation physique pour obtenir une fraction solide (lorsqu'il y a biométhanisation du fumier, la séparation est faite à la suite du procédé de digestion).*

Les propriétés de la LFR varieront selon la méthode de production. Dans le présent document, le terme « litière de fumier recyclé » est généralement utilisé pour désigner des **produits qui ont subi une séparation physique suivie d'un conditionnement**. Ce conditionnement (compostage) vise à réduire, sans nécessairement les éliminer complètement, la quantité d'agents pathogènes dans la litière et à augmenter son contenu en matière sèche. Malheureusement, une définition claire n'est pas toujours donnée dans les différents documents traitant de la LFR, ce qui conduit à une certaine ambiguïté.

La LFR est **compatible avec les systèmes de gestion des fumiers en place à la ferme** puisqu'elle est produite à partir du fumier récolté dans le même établissement où elle est utilisée. La fraction solide utilisée pour fabriquer la LFR se compose principalement de fibres non digérées par les vaches, d'aliments servis que les vaches n'ont pas consommés et de litière provenant des parcs de vêlage et de sujets de remplacement. Lorsqu'elle est adéquatement fabriquée et utilisée dans l'étable, la LFR possède plusieurs attributs physiques attendus d'une litière qui permettront un confort et une propreté satisfaisante des vaches. Elle est non abrasive et facilement disponible. De plus, la fraction liquide engendrée par la séparation peut être entreposée et utilisée comme fertilisant organique sur les champs en culture.



PROCESSUS DE FABRICATION

De façon générale, mais non exclusive, le processus de fabrication comprend deux étapes maîtresses, soit la séparation solide-liquide et le conditionnement (Figure 1). La première étape permet de concentrer les résidus solides, alors que la seconde permet une hygiénisation partielle et une réduction de la teneur en eau afin de stabiliser davantage le produit.



FIGURE 1. Étapes de la production d'une litière de fumier recyclé

SÉPARATION

La séparation solide-liquide en vue de la production de LFR peut s'effectuer mécaniquement à l'aide de différents types d'équipement :

- Les séparateurs à **tamis** (stationnaires, vibrants ou rotatifs);
- Les séparateurs à **pression** à vis ou à rouleaux;
- Les séparateurs **centrifuges**.

Les séparateurs à tamis sont très répandus. Toutefois, ils sont peu utilisés en production laitière au Canada, car ils se colmatent facilement par temps froid avec un lisier à teneur élevée en matière sèche. De leur côté, les séparateurs à vis, à rouleaux et centrifuges (Figure 2) présentent des efficacités de séparation satisfaisantes avec le lisier de bovins laitiers. Cependant, les séparateurs centrifuges sont peu intéressants pour le traitement des lisiers en raison de leur faible capacité de séparation, de leur coût d'achat et de leur consommation énergétique. Le choix entre les séparateurs à vis et à rouleaux dépend **du type d'intrant** et de ce que le producteur souhaite sur le plan de la **capacité de traitement et des caractéristiques pour la litière de fumier recyclé**.



FIGURE 2. Exemples de séparateurs à vis (A), à rouleaux (B) et centrifuge (C)

Le **taux de matière sèche** et la **granulométrie** de la fraction solide sont les éléments les plus importants à surveiller pour produire une LFR qui sera acceptable d'un point de vue de compactibilité.

Un fumier recyclé composé de beaucoup de particules fines se compacte facilement sous la vache et retient davantage l'humidité. Il est ainsi recommandé de **privilégier une fraction solide ayant un nombre limité de particules d'un diamètre inférieur à 1 mm** (Fournel et coll., 2019a).

CONDITIONNEMENT

Après la séparation, le conditionnement de la fraction solide est la seconde étape dans le processus de fabrication de LFR.

CONDITIONNEMENT

Définition : Dans le présent document, le terme « conditionnement » désigne l'ensemble des opérations pour le traitement aérobie de la fraction solide obtenue lors de la séparation du lisier. Ce conditionnement inclut une élévation **de température supérieure à 55 °C durant la phase thermophile** qui résulte d'une activité microbienne intense et qui permet de produire une matière partiellement asséchée.

Le conditionnement avec élévation de la température est réalisé grâce aux processus biologiques aérobies qui s'apparentent aux procédés de compostage. Ces procédés peuvent être regroupés en deux grandes catégories :

- Les **pires** et **andains** retournés mécaniquement pour aérer ou sans retournement avec aération forcée;
- Les **enceintes fermées** aérées (bioréacteur) en continu ou en lots, dont :
 - les cylindres rotatifs (« *drum composting* »);
 - les conteneurs fermés (« *in-vessel* »);
 - les silos horizontaux avec retournements mécanisés.

La production à l'année d'une litière aux caractéristiques constantes exige un suivi rigoureux des procédures de conditionnement et des paramètres d'opération. Ce suivi est facilité par l'implantation de procédés mécaniques automatisés. Le retournement mécanique des piles et les andains exigent plus de manipulations et de temps ainsi qu'une discipline rigoureuse. Par conséquent, **les techniques de conditionnement en enceintes fermées, ventilées et isolées sont particulièrement intéressantes, car elles permettent un contrôle rigoureux des paramètres de conditionnement.**

*L'utilisation de procédé de conditionnement mécanisé et automatisé de la fraction solide du fumier s'inscrit dans une optique de **bonne gestion des risques** en favorisant un traitement thermophile uniforme et la production à l'année d'une LFR de qualité constante.*

APPLICATION DE LA LFR

Une fois conditionnée, la LFR est appliquée sous les vaches de façon manuelle ou mécanique selon la taille du troupeau. Les quantités appliquées par jour et par vache peuvent varier beaucoup en fonction de la régie du producteur. Compte tenu des différences importantes de masse volumique entre les différentes litières, la masse journalière à ajouter par vache ou l'épaisseur à maintenir doivent être adaptées selon la régie.

La masse volumique de la LFR est approximativement de 340 kg/m³. Un ajout de 10 à 40 kg de LFR par jour représente donc l'addition de 29 à 118 litres de litière par jour par vache. L'épaisseur de LFR sous les vaches variera alors de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres.

La régie choisie et le confort recherché pour les vaches ainsi que les performances de production visées détermineront les quantités à ajouter. De façon générale, la LFR n'est pas utilisée dans les parcs de vêlage ni sous les sujets de remplacement.

GESTION DE LA LITIÈRE

En matière de **gestion des risques liés à la santé animale et à l'incidence de cas de mammite clinique**, il est reconnu que la gestion de la litière à l'étable et sous les animaux est un élément tout aussi important que la qualité initiale du matériau utilisé comme litière. La raison étant qu'après 24 heures, toutes les litières, aussi propres soient-elles à l'application, deviennent rapidement souillées par les déjections de l'animal. Pour cette même raison, **on recherchera un matériau et un environnement qui ne favorisent pas le développement microbien dans la litière sous les animaux. Un entretien deux fois par jour permet d'enlever les déjections fraîches et la litière trop humide et d'appliquer de la nouvelle LFR. La litière dans la stalle ou la logette doit aussi être nivelée pour assurer une surface uniforme et le confort de la vache.**





PARTIE 2

ÉTAT DES CONNAISSANCES

PROPRIÉTÉS MICROBIOLOGIQUES DE LA LITIÈRE

DANGEREUX POUR MA SANTÉ ?

CONFORT ET SANTÉ DES VACHES

SANTÉ MAMMAIRE

ANALYSE ÉCONOMIQUE DE LA SUBSTITUTION DE LA LITIÈRE
DE PAILLE PAR LA LFR EN PRODUCTION LAITIÈRE

INTÉRÊT AGRONOMIQUE : LA FRACTION LIQUIDE

L'ENVIRONNEMENT DANS TOUT CELA ?

PERCEPTION ET EXPÉRIENCES DES AGRICULTEURS

PROPRIÉTÉS MICROBIOLOGIQUES DE LA LITIÈRE



Les matériaux utilisés comme litière, que ce soit le fumier recyclé ou d'autres matières, peuvent contenir des microorganismes potentiellement pathogènes pour les humains et les animaux. La présence de ceux-ci dans l'environnement des vaches peut augmenter l'incidence de maladies comme les mammites cliniques. Afin de minimiser les risques, il importe de connaître la dynamique des populations microbiennes au cours des différentes étapes de gestion de la LFR. Il faut aussi connaître le potentiel des différents types de litières à supporter la croissance des microorganismes suivant la contamination par les déjections des animaux. Pour ce faire, lors de l'étude réalisée au CRSAD, des échantillons de lisier avant la séparation, de fractions solides et liquides après la séparation et de litières ont été prélevés à toutes les phases du projet pour y dénombrer les populations de cinq types de microorganismes indicateurs de la flore intestinale bovine et de la présence possible d'agents pathogènes. Lors de l'étude réalisée par la FMV, les analyses bactériologiques des litières ont été réalisées à deux moments dans le cycle d'utilisation, c'est-à-dire lorsque la litière était prête à l'emploi et en fin d'utilisation. Pour les analyses parasitologiques, des échantillons de litière ont été prélevés à chaque étape de production. Des fèces ont aussi été récoltées.

MICROORGANISMES

Comme il existe plusieurs types de microorganismes pathogènes, il serait fastidieux et coûteux de vérifier la présence de chacun d'eux dans les matières fécales des vaches ou dans la litière. Durant l'étude réalisée à la ferme expérimentale de Deschambault en 2017 et 2018, les populations de **microorganismes indicateurs** suivants ont été suivies dans le lisier brut et les litières : *Escherichia coli* (*E. coli*), *Klebsiella* spp., *Enterococcus* spp., *Streptococcus* spp. et *Staphylococcus* spp. Ceux-ci font partie de la flore intestinale normale des bovins, mais certains types peuvent entraîner des problèmes de santé animale ou humaine s'ils sont en quantités suffisantes pour causer l'infection.

Durant l'étude de la FMV, un dénombrement de la flore bactérienne totale a été effectué, ainsi que des analyses spécifiques sur les populations de *Staphylococcus* spp, *Streptococcus* spp, *E. coli*, *Klebsiella* spp, *Salmonella* spp et *Listeria monocytogenes*. De plus, des analyses parasitologiques ont été effectuées dans les échantillons de litière et de fumier afin de déterminer la présence de cryptosporidies et de coccidies.

IMPACT DE LA SÉPARATION

La séparation des phases liquides et solides du lisier est la première étape de traitement de la LFR. En général, les microorganismes s'associent aux particules solides de leur milieu, mais plusieurs paramètres influencent leur propension à rejoindre l'une ou l'autre des fractions. La première étape de l'étude consistait donc à comparer trois **équipements de séparation du lisier**, soit le séparateur à vis, le séparateur à rouleaux, ainsi que la centrifugeuse. Les populations des microorganismes indicateurs ont été dénombrées dans les fractions liquides et solides issues de chacun de ces équipements de séparation.

Dans les conditions de l'étude, les solides issus du même lisier présentaient un contenu en microorganismes indicateurs similaire (Fournel et coll., 2019a). Peu importe l'équipement, la séparation n'a pas d'effet sur la distribution des microorganismes dans les fractions solides et liquides. Lors des analyses parasitologiques réalisées dans la 2^e étude, la séparation ne permettait pas non plus de réduire la teneur en parasites dans le lisier.

EFFETS DU CONDITIONNEMENT

Dans la seconde étape du projet, l'impact de quatre **méthodes de conditionnement de la fraction solide** a été évalué à une échelle expérimentale, soit : 1) pile statique (non retournée) pendant 10 jours; 2) pile retournée quotidiennement sur une période de 10 jours; 3) 24 heures de traitement en composteur rotatif suivi d'un entreposage en pile statique pendant 10 jours; 4) 72 heures de traitement en composteur rotatif suivi d'un entreposage en pile statique pendant 10 jours. Le passage au composteur rotatif durant 24 heures a entraîné une réduction des populations d'*E. coli* et de *Klebsiella* de 74 % et de 43 %, respectivement. Les populations de ces deux types de bactéries sont demeurées stables durant les 10 jours d'entreposage qui ont suivi le traitement.

Dans les conditions de l'étude, un traitement de 24 heures en composteur rotatif a mené à des populations d'*E. coli* comparables à celles résultant d'un entreposage de 10 jours en pile retournée ou non.

Dans les conditions de l'étude, un traitement de 24 heures en composteur rotatif a mené à des populations de microorganismes indicateurs comparables à celles résultant d'un entreposage de 10 jours en pile retournée ou non.

En effet, alors que les populations d'*E. coli* et de *Klebsiella* sont demeurées stables au cours de l'entreposage suivant un compostage de 24 heures, elles ont augmenté à la suite du compostage de 72 heures.

Bien que les populations de staphylocoques aient augmenté à la suite du passage dans le composteur rotatif, elles ont atteint le même niveau après 5 jours d'entreposage dans tous les traitements et se sont maintenues ainsi jusqu'à à la fin de l'essai. Finalement, alors qu'il y avait 10 fois moins d'entérocoques à la fin de l'essai qu'au début, celles de streptocoques se sont maintenues et étaient semblables dans tous les traitements.

Dans la seconde étude, la LFR analysée avant son introduction sous les vaches présentait généralement plus de bactéries que la paille, à l'exception de *Klebsiella* qui était en concentration plus élevée dans la paille.

Les fermes LFR présentaient aussi significativement plus de salmonelles, de *Listeria monocytogenes*, de cryptosporidies et de coccidies que les fermes sur paille.



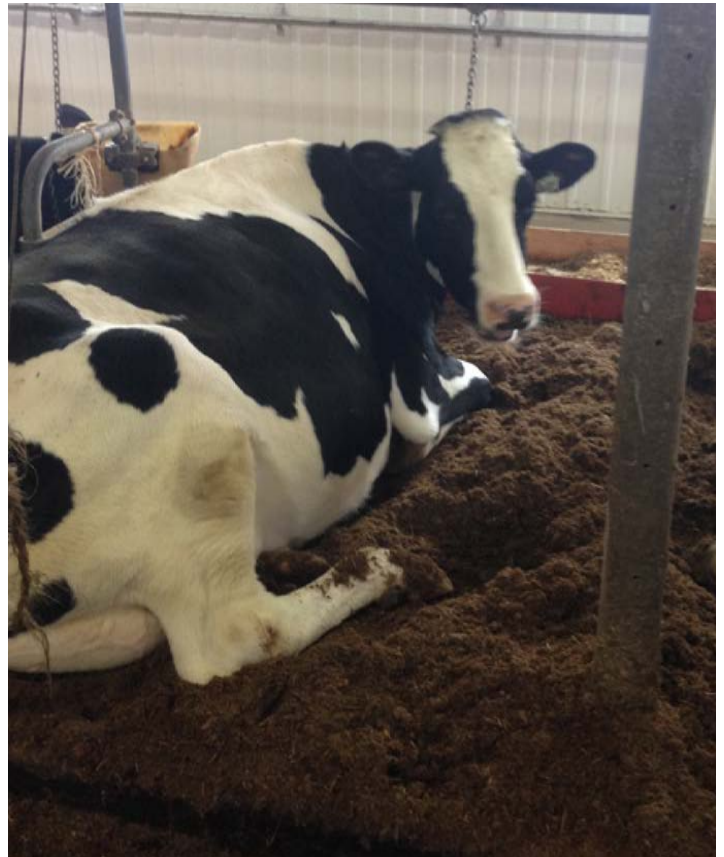
Il est important de noter que le volume de la pile peut modifier le potentiel d'hygiénisation. Par conséquent, ces résultats doivent être validés à l'échelle de la ferme.

L'étude n'a pas révélé d'avantages à augmenter le temps de séjour dans le composteur rotatif de 24 à 72 heures.

IMPACT DE L'ÉPAISSEUR

Dans la troisième étape du projet, les conditions issues de deux épaisseurs de LFR (2 et 6") ont été comparées à celles d'une étable utilisant de la litière de paille durant 21 jours. Avant son introduction dans l'étable, la LFR a été préalablement traitée pendant 24 h au composteur rotatif. Des échantillons de litières propres et souillées ont été prélevés à six reprises durant l'essai pour dénombrer les populations des microorganismes indicateurs.

Les litières souillées prélevées sous les vaches avaient un contenu similaire en *bactéries* et reflétaient davantage la contamination des stalles peu importe le type de litière utilisé.



Les matériaux utilisés comme litière peuvent présenter un contenu élevé de certains microorganismes indicateurs ou potentiellement pathogènes et ce, avant même leur application sous les animaux. À ces quantités initiales s'ajoute la contamination provenant des excréments des animaux. Les conditions environnementales (c.-à-d. température et humidité) et les propriétés physico-chimiques de la litière (c.-à-d. éléments nutritifs disponibles) au sein même de la litière font en sorte que la prolifération de certains types de microorganismes nuisibles sera favorisée. À titre d'exemple, les cryptosporidies, qui causent des diarrhées sévères chez les jeunes animaux, sont particulièrement résistantes à la chaleur et elles ne sont pas du tout contrôlées par les procédés actuellement utilisés dans la production de LFR. De même, les litières, incluant la LFR, peuvent bien supporter la croissance des bactéries du genre *Klebsiella*.

Étant donnée la présence de multiples agents pathogènes dans la litière prête à l'emploi, la LFR ne devrait pas être utilisée sous les jeunes animaux (moins de 6 mois d'âge) ou dans les aires de vêlage.

DANGEREUX POUR MA SANTÉ?

Les producteurs laitiers sont exposés à d'importantes quantités de particules organiques dans l'air, appelées bioaérosols, qu'ils peuvent respirer. La distribution de la nourriture et de la litière (Kullman et coll., 1998) relâche des bioaérosols qui sont composés de microorganismes, vivants ou morts, mais également de fragments de cellules de plantes ou d'animaux (Donham, 1986). Dans nos conditions de production, les fermes laitières sont des bâtiments fermés dans lesquels les bioaérosols se concentrent et peuvent représenter un risque pour la santé respiratoire des producteurs (Donham, 1986; Schenker et coll., 1998).

Lors de notre projet, la qualité de l'air dans l'étable a varié selon la méthode de compostage employée (Tableau 1). En effet, un compostage de 72 heures en composteur rotatif augmentait la quantité de poussières ainsi que le nombre de bactéries et de moisissures dans l'air lors de la manipulation de la litière. À l'inverse, un compostage statique ou retourné quotidiennement semblait présenter le moins de risques pour la santé respiratoire des producteurs. Il est à noter que lors de la manipulation des LFR, la concentration de poussières dans l'air n'a jamais dépassé les valeurs limites d'exposition (VLE) recommandées. Cependant, les concentrations en bactéries et moisissures excédaient les VLE lors de la manipulation de la LFR compostée pendant 72 heures (composteur rotatif) (Fournel et coll., 2019b).

La qualité de l'air a été évaluée en mesurant les quantités de poussière, de bactéries et de moisissures dans l'étable du CRSAD. Un compteur DustTrak™ DRX Aerosol Monitor (TSI) a mesuré en temps réel les poussières. Les bactéries et les moisissures ont été aspirées et impactées dans une solution à l'aide d'un échantillonneur Coriolisµ Biological Air Sampler (Bertin Corp.). La solution a ensuite été étalée sur des milieux de culture afin de faire croître les bactéries et les moisissures. Les concentrations obtenues ont été comparées aux valeurs limites d'exposition (VLE) de poussières imposées par Loi sur la santé et la sécurité du travail du Gouvernement du Québec (10 mg/m³ poussières) ou à celles de bactéries et de moisissures suggérées dans la littérature scientifique (104 UFC/m³ bactéries, 5×10⁴ UFC/m³ moisissures).



De plus, la qualité de l'air variait selon la méthode de distribution utilisée. L'utilisation d'équipements comme un hachoir à paille ou un convoyeur génère beaucoup de bioaérosols comparativement aux méthodes manuelles. La quantité de bioaérosols dans l'air était d'autant plus élevée lors de la saison froide, car la ventilation dans l'étable était réduite.

Lors de l'étude réalisée sur les fermes commerciales, des agents pathogènes tels que *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* et les cryptosporidies ont été retrouvés dans la LFR avant son utilisation. Tous ces agents pathogènes sont des zoonoses, c'est-à-dire qu'ils sont transmissibles à l'humain. Les symptômes peuvent être assez banals,

mais peuvent aussi mener à des hospitalisations. Certains de ces agents pathogènes sont également très dommageables pour les bovins laitiers, ils peuvent entraîner des pertes de production importante et des maladies sévères, surtout chez les jeunes animaux.

Il est recommandé aux producteurs laitiers de porter un masque protecteur efficace contre les particules grossières et plus fines lors de la distribution de la litière, peu importe la saison ou la méthode utilisée. Les travailleurs de la ferme devraient aussi porter des gants lors de la manipulation de la litière et bien laver leurs mains suite au contact avec cette dernière.

TABLEAU 1. Risque d'exposition aux bioaérosols lié à la manipulation et à l'entreposage selon la méthode de compostage de la LFR

BIOAÉROSOLS MESURÉS	RISQUE LORS DE LA MANIPULATION		RISQUE LORS DE L'ENTREPOSAGE	
	Le plus faible	Le plus élevé	Le plus faible	Le plus élevé
Poussières	TW ¹	DC72 ²	DC72	SW ³
Bactéries	SW	DC72 [*]	SW	DC72
Moisissures	TW	DC72 [*]	TW	DC72

¹ TW = Compostage statique retourné quotidiennement

² DC72 = Compostage 72 h en composteur rotatif

³ SW = Compostage statique

^{*} Dépassement des valeurs limites d'exposition recommandées



CONFORT ET SANTÉ DES VACHES

L'effet de la LFR sur le confort des vaches gardées en stabulation entravée a été étudié lors d'une expérience en chassé-croisé à trois traitements : 5 cm de paille hachée, 5 cm de LFR, 15 cm de LFR. Au total, 18 vaches ont passé trois semaines sur chacun des traitements de litière durant l'hiver 2018. Les caractéristiques de la litière des stalles (propreté, épaisseur, humidité) ainsi que la propreté des vaches, le temps passé « couché », les blessures et les boiteries ont été suivis afin de comparer les trois traitements de litières. Lors de l'étude sur les fermes commerciales, 30 vaches par troupeau ont été évaluées pour la qualité de leur hygiène et l'état des jarrets, un aspect reflétant le confort des animaux.

Le type, la qualité, la quantité et la gestion de la litière utilisée pour les vaches sont des éléments pouvant affecter leur confort et leur santé au quotidien. Effectivement, ils peuvent influencer le temps de repos et la propreté des animaux ainsi que les risques de blessures, de boiterie et de maladies. Lors de l'évaluation d'une litière, l'état de la surface de celle-ci dans la stalle, le temps de repos des vaches ainsi que leur état physique et leur santé mammaire devraient être considérés.



TYPE ET SURFACE DE STALLE

La quantité et la fréquence d'application de la litière influencent le taux de recouvrement, la compressibilité et le taux d'humidité de la surface de la stalle. Ces éléments affectent aussi le confort des animaux.

- Viser un recouvrement complet de la surface de la stalle par la litière en tout temps afin d'éviter le frottement des genoux et des jarrets avec une surface abrasive.
- Maintenir une épaisseur de litière minimale de 5 cm (2 pouces) en stabulation entravée permet d'assurer un recouvrement complet et une certaine mollesse de la surface.
- La fréquence d'ajout de litière doit être ajustée en fonction du type de stalle utilisé, de la quantité de litière distribuée et de sa teneur en matière sèche. L'ajout fréquent de LFR fraîche à faible taux de matière sèche peut augmenter l'humidité de la stalle, surtout en condition de litière profonde.
- En stabulation entravée, un ajout minimum de 20 kg de litière par jour est nécessaire afin de conserver une épaisseur de litière de 10 cm. Cette épaisseur semble être un bon compromis entre le confort animal et une gestion quotidienne aisée.
- La présence d'excréments dans la stalle est un élément d'inconfort pour les vaches. Par conséquent, les excréments et la litière humide devraient être enlevés au moins deux fois par jour.
- Un entretien fréquent durant lequel la litière souillée est enlevée et la surface de couche est nivelée peut aider à augmenter la propreté et le confort des vaches.

TEMPS DE REPOS, BLESSURES, BOITERIE ET PROPRETÉ

Une aire de couchage qui offre un confort adéquat, incluant une litière sèche, absorbante et moelleuse, favorise le temps de repos des vaches et minimise les risques de blessures et de boiterie. Selon la littérature récente, le temps de repos quotidien adéquat pour des vaches laitières se situe entre 11 et 14 heures selon le stade de lactation et le type de stabulation utilisé (Solano et coll., 2016; Charlton et coll., 2016). Lorsque le temps de repos des vaches laitières est insuffisant, leurs performances laitières sont affectées.

Le temps de repos des vaches gardées sur la LFR est équivalent à celui d'autres types de litière.

La propreté des vaches est un indicateur de bien-être animal et de conditions d'hygiène du troupeau. Le code de pratique demande d'utiliser une litière qui favorise le maintien des conditions sanitaires des installations utilisées par les vaches et de retirer le fumier fréquemment afin de maximiser la propreté des animaux (CNSAE, 2009). La quantité et la qualité de la litière utilisée peuvent influencer la propreté des animaux et l'entretien quotidien à l'étable.

Lors de l'étude en stabulation entravée pendant une période de trois semaines, aucune différence de temps de repos ou de prévalence de blessures et de boiterie n'a été observée lorsque les stalles contenaient 5 ou 15 cm de LFR ou 5 cm de paille hachée. Les vaches gardées sur LFR présentaient cependant des onglons plus mous que celles gardées sur la paille. La propreté des vaches gardées sur LFR était moindre que lorsque gardées sur une litière de paille, surtout au niveau des trayons (Figure 3). Les vaches gardées sur 15 cm de LFR étaient généralement plus sales que celles gardées sur 5 cm, possiblement en raison des difficultés à garder une surface de couchage sèche avec la LFR profonde.

Lors de l'étude sur les fermes commerciales, aucune différence dans le niveau de propreté des vaches logées sur LFR, comparées à celles logées sur paille, n'a pu être mise en évidence.

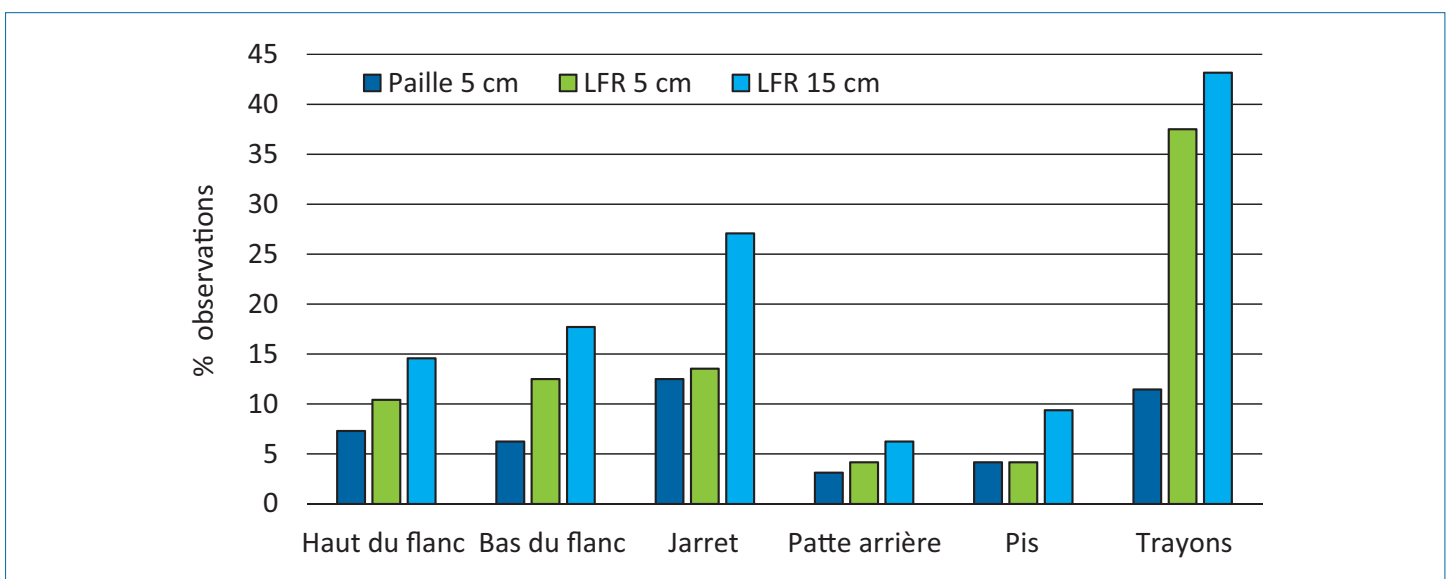


FIGURE 3. Proportion des observations pour lesquelles les vaches ont été classifiées comme sales (% des observations effectuées dans le projet du CRSAD)

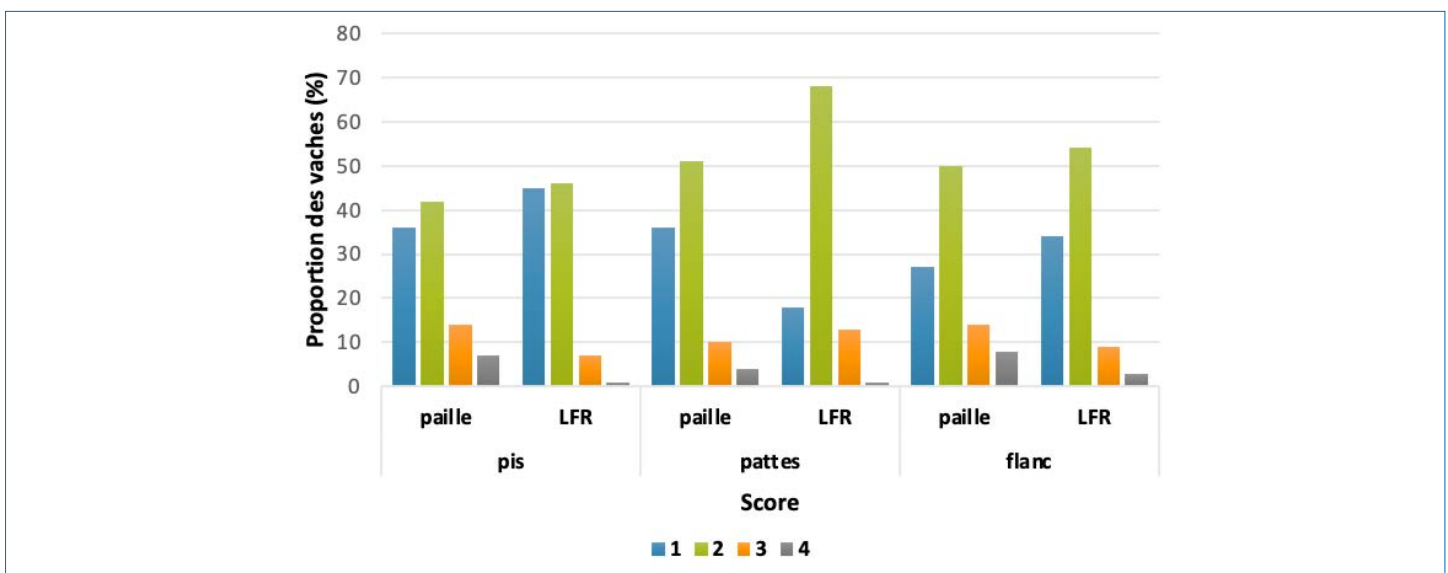


FIGURE 4. Scores d'hygiène des différentes zones des vaches recrutées dans l'étude sur les fermes commerciales

- Lors d'un test de préférence, les vaches ont choisi les stalles recouvertes de LFR comparativement aux litières de sable, de paille ou de ripe. Cette préférence était d'autant plus marquée lorsque la température ambiante de l'étable était plus froide (Adamski et coll., 2011).
- Dans des conditions de stabulation libre où la LFR était utilisée, un temps de repos plus long et une prévalence de boiterie et de blessures plus faibles ont été observés lorsque de la LFR profonde était offerte comparativement à une litière peu profonde recouvrant des matelas (Leach et coll., 2015 ; Husfeldt et Endres, 2012).
- En stabulation entravée et pendant une période de trois semaines, nous n'avons pas observé de différence de temps de repos ou de prévalence de blessures et de boiterie lorsque les stalles contenaient 5 ou 15 cm de LFR ou 5 cm de paille hachée. Les vaches gardées sur LFR présentaient cependant des onglons plus mous que celles gardées sur la paille.
- En stabulation entravée, la propreté des vaches gardées sur LFR était moindre que lorsque gardées sur une litière de paille, surtout au niveau des trayons (Figure 3). Les vaches gardées sur 15 cm de LFR étaient généralement plus sales que celles gardées sur 5 cm, possiblement en raison des difficultés à garder une surface de couchage sèche avec la LFR profonde.

Pour ce qui est du confort, la LFR offre une autre option aux litières conventionnelles. La quantité de litière utilisée doit permettre le recouvrement complet de la surface de la stalle afin d'offrir une certaine mollesse. La gestion quotidienne de la litière vise à enlever les déjections et la litière trop humide ainsi qu'à garder la surface de couche nivelée.

Lors de l'étude réalisée sur des fermes commerciales, les vaches logées sur LFR avaient des cotes de lésions aux jarrets semblables à celles logées sur paille, indiquant un niveau de confort comparable.

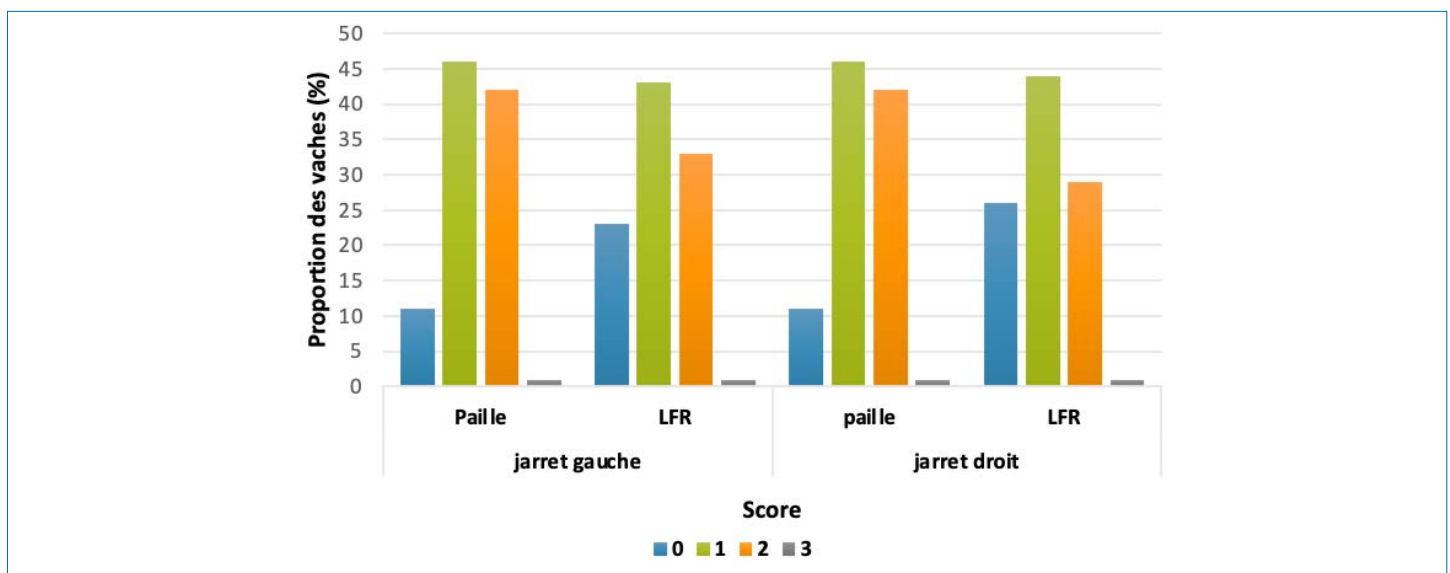


FIGURE 5. Scores des jarrets des vaches recrutées dans l'étude sur les fermes commerciales

SANTÉ MAMMAIRE

Lors de l'étude réalisée sur les fermes commerciales, 11 000 vaches ont été suivies sur une période d'un an afin d'évaluer les dynamiques de comptage de cellules somatiques (CCS), un indice utilisé afin de déterminer la présence de mammite sous-clinique. Il n'y avait pas de différence dans la moyenne de CCS lactationnelle que les vaches soient logées sur LFR ou paille.

De plus, il n'y avait pas de différence dans le nombre de cas de mammites cliniques total subies par les animaux selon la litière. Cependant, les agents pathogènes qui causaient les mammites cliniques étaient différents. Les vaches logées sur LFR avaient sept fois plus de risque de subir un épisode de mammite clinique causé par *Klebsiella pneumoniae* que celles logées sur paille.

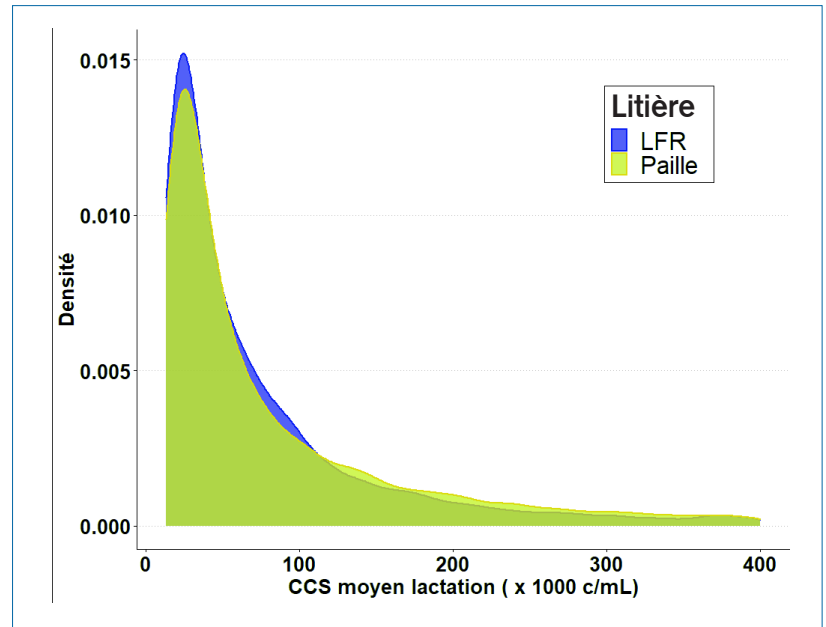


FIGURE 6. Comptage de cellules somatiques lactationnel moyen selon le type de litière.

Les mammites cliniques causées par *Klebsiella pneumoniae* sont sévères et peuvent compromettre la vie de l'animal affecté. Si les vaches y survivent, leur production laitière sera grandement affectée et les placent ainsi à un risque de réforme élevé.



QUALITÉ DU LAIT

Il est reconnu par la communauté scientifique que l'environnement de la ferme module dans une certaine mesure les microorganismes retrouvés dans le lait. Considérant que le pis de la vache est en contact direct avec la litière, les microorganismes de celles-ci sont susceptibles de se retrouver dans le lait de réservoir. Comme mentionné précédemment, la qualité microbiologique de la litière est importante, mais de surcroît, le pourcentage d'humidité influence la capacité de celle-ci à contaminer le pis (Robles et coll., 2020). En effet, plus une litière est humide, plus elle est susceptible de contaminer le pis et par le fait même le lait. Une attention particulière lors de la traite doit donc être portée au nettoyage du pis, afin de limiter la contamination du lait par la litière de fumier recyclé lors de la traite.

Les résultats disponibles dans la littérature sur les impacts de l'utilisation de LFR sur la qualité microbiologique du lait sont variables entre les différentes études. Cela est attribuable en partie aux différentes pratiques de gestion à la ferme pouvant être employées, ainsi qu'aux différentes méthodes de fabrication de la LFR. Dans l'étude sur les fermes commerciales, Gagnon et coll. (2020) ont démontré que la quantité de bactéries résistantes à la chaleur était similaires entre les laits de réservoirs de fermes utilisant la LFR et celles utilisant la paille. Cependant, en termes de proportions, sept fois plus de *Streptococcus spp.* et deux fois plus d'*Enterococcus faecalis* ont été retrouvés dans les laits des fermes utilisant la LFR. Ces bactéries thermorésistantes sont donc susceptibles de se retrouver dans des productions fromagères en résistant au traitement de chaleur appliqué au lait comme la pasteurisation. Lors de la production modèle de cheddar frais, les auteurs n'ont cependant pas observé d'impact négatif des bactéries associées à la litière de fumier recyclé. En revanche, il est plausible que les *Enterococcus faecalis*, par la protéolyse du lait (figure 7), affectent le goût du fromage lors de l'affinage.

L'optimisation de la fabrication de la LFR pour limiter la quantité d'*Enterococcus* et de *Streptococcus spp.* est une avenue intéressante. Zigo et coll. (2020) ont comparé l'utilisation de la paille à une litière alternative composée de poudre de calcaire, de paille et de fumier recyclé. L'analyse microbiologique des litières a démontré que la litière alternative contenait moins de coliformes et de streptocoques fécaux que la paille.



FIGURE 7. Croissance d'*Enterococcus faecalis* non protéolytiques (gauche) et protéolytiques (droite) sur gélose de lait. Crédit Mérielie Gagnon

ANALYSE ÉCONOMIQUE DE LA SUBSTITUTION DE LA PAILLE PAR LA LFR

L'analyse économique réalisée dans le cadre de la présente étude visait à évaluer le seuil de rentabilité du remplacement de la litière de paille par la LFR pour une ferme de taille moyenne. Les calculs sont basés sur l'emploi d'un séparateur à vis ou d'un séparateur à rouleaux pour obtenir la fraction solide. Ce seuil de rentabilité est mesuré par la quantité de paille appliquée à partir de laquelle son remplacement par la LFR est de coût égal ou moindre.

Pour déterminer le seuil de la rentabilité de la substitution, les coûts annuels par vache de l'utilisation de la LFR et de la paille ont été évalués. L'analyse économique a été faite en considérant une ferme de taille moyenne au Québec, soit 65 vaches. Les sujets de remplacement ne sont pas considérés dans la présente analyse. Aussi, les impacts négatifs de la LFR sur la santé des animaux n'ont pas été considérés (ex. réformes secondaires à une mammite clinique à *Klebsiella*; une vache par an dans un troupeau de cette taille).

COÛT DE LA LFR

Le coût annuel de fabrication de la LFR est fonction du coût de possession des équipements et des coûts de fonctionnement (voir Tableau 2). Le coût d'application de la LFR dans l'étable n'a pas été comptabilisé. Ce coût total annuel, CTA_{LFR} par vache (\$/vache), se calcule ainsi : $CTA_{LFR} = (CAPE + CAMO_{LFR} + CAE)/65$.

TABLEAU 2. Détail du calcul du coût de fabrication de la LFR selon le séparateur utilisé

	À VIS	À ROULEAUX
Acquisition des équipements (\$)	318 000	336 778
Durée de vie des équipements (ans)	15	15
Valeur du bâtiment (\$)	100 000	100 000
Durée de vie du bâtiment (ans)	25	25
CAPE : Coût annuel de possession des équipements (\$) ¹	33 324,84	34 838,01
Salaire horaire standardisé (\$/h)	18	18
Vérification quotidienne (minutes/jour)	10	5
Vérification hebdomadaire (minutes/semaine)	15	15
Nettoyage mensuel (minutes/mois)	60	15
Entretien mensuel (heure/mois)	1	1
Entretien annuel (heures/an)	0	2
CAMO_{LR} : Coût annuel de la main d'œuvre (\$)	1 761,00	1 087,50
Consommation du séparateur (kWh/m ³ litière produite)	0,38	0,13
Consommation du composteur (kWh/jour)	18	18
Quantité de LFR pour 65 vaches (m ³ ou kg)	3,8 ou 16,9	4 ou 17,7
CAE : Coût annuel de l'électricité ² (\$)	641,67	610,62
CTA_{LFR} : Coût total annuel (\$)	35 727,51	36 536,12
CTA_{LFR} par vache : Coût total annuel par vache (\$)	549,65	562,09

¹ Basé sur la méthode DIRTÀ

² Le coût du kilowattheure au tarif D, en vigueur depuis le 1^{er} avril 2018 est de 0,059\$ pour les 36 premiers kWh et de 0,0912\$ pour l'excédent.

COÛT DE LA LITIÈRE DE PAILLE

Le coût total annuel de la litière de paille est fonction des coûts annuels d'achat de la paille et de la main-d'œuvre pour l'application. Le coût total annuel de la litière de paille, CTA_{paille} par vache (\$/vache), a été calculé comme suit :

$$CTA_{\text{paille}} = CAA + CAMO_{\text{paille}}/65.$$

CAA : Coût annuel d'achat de la paille

- La quantité de paille à appliquer par vache par jour est en général de 3 kg (Adam, 2018). Pour les troupeaux en parc avec litière compostée ou accumulée, la quantité de paille varie entre 6 et 15 kg par jour (Adam, 2018). En sachant que 8,33 kg ont été appliqués par vache par jour dans le projet, les quantités choisies pour cette analyse sont 3, 6, 8,33 et 15 kg de paille par vache par jour.
- Le prix d'achat de la paille utilisé est de 0,22 \$/kg (un prix moyen pondéré pour la paille livrée à la ferme pour les quantités déclarées). Les valeurs médiane et moyenne (observées sur le site de transaction Haybec.com entre 2016 et 2018) des offres de vente sont de 0,15 \$/kg et la valeur maximale est de 0,26 \$/kg.

CAMO_{paille} : Coût annuel de la main-d'œuvre

- Pour un troupeau moyen de 65 vaches, il faut 30 minutes par jour pour appliquer la paille. Le temps d'application ne varie pas selon la quantité de paille appliquée par vache, mais plutôt selon la taille du troupeau.

SEUIL DE RENTABILITÉ

Pour qu'un producteur substitue la paille à la LFR, il faut que le coût de la litière de paille soit au moins égal au coût de la LFR. Connaissant le coût de la LFR, le prix d'achat de la paille et le coût de la main-d'œuvre pour l'application de la paille, la quantité seuil annuelle de paille pour une substitution rentable (SR) pour chacun des deux séparateurs est calculée comme suit : $SR = (CTA_{\text{LFR}} - CAMO_{\text{paille}}) / \text{Prix_achat}_{\text{paille}}$.

Pour obtenir un seuil de rentabilité journalier, la valeur de SR est divisée par 365 jours.

RÉSULTATS DE L'ANALYSE ÉCONOMIQUE

Le coût total annuel par vache de fabrication de la LFR s'élève à 550 \$ et à 562 \$ respectivement pour le séparateur à vis et le séparateur à rouleaux (Tableau 2). Le coût total annuel par vache de l'utilisation de la litière de paille varie quant à lui entre 296 \$ et 1278 \$ selon la quantité de paille appliquée pour un prix d'achat moyen de 0,22 \$/kg (Tableau 3).

Si le producteur d'un troupeau moyen applique 3 kg de paille par vache par jour et qu'il passe à l'utilisation de la LFR, ce changement engendrera un coût annuel supplémentaire de 254 \$ par vache s'il opte pour le séparateur à vis et un coût supplémentaire de 266 \$ par vache s'il opte pour le séparateur à rouleaux (Tableau 3). Dans le cadre du projet, où une quantité de 8,33 kg de paille par vache par jour était appliquée, une économie annuelle par vache de 183 \$ peut être réalisée si la LFR produite avec un séparateur à vis remplace la paille (Tableau 3).

En utilisant un prix d'achat moyen de paille de 0,22 \$/kg, le seuil de rentabilité de remplacement de la litière de paille par la LFR se situe à 6,1 kg de paille appliquée par vache par jour si le producteur opte pour le séparateur à vis et à 6,2 kg pour le séparateur à rouleaux (Tableau 4).

TABLEAU 3. Évaluation du gain ou de la perte si la LFR est substituée à la paille selon la quantité de paille appliquée et le séparateur utilisé

Quantité de paille (kg/j/vache)	Coût total annuel de la paille/vache	PERTE OU GAIN ANNUEL/VACHE AVEC LA LFR	
		Séparateur à vis	Séparateur à rouleaux
3	296,05 \$	-253,60 \$	-266,04 \$
6	541,56 \$	-8,09 \$	-20,53 \$
8,33	732,51 \$	182,86 \$	170,42 \$
15	1 278,09 \$	728,44 \$	716,00 \$

Le coût d'achat de la paille étant sujet à des fluctuations relativement importantes selon le format utilisé lors de la récolte, la région de production et le coût de transport, une analyse de sensibilité a aussi été effectuée. Cette analyse démontre qu'avec le prix médian des offres de vente de paille de 0,15 \$/kg, la substitution de la LFR à la paille ne serait rentable que pour les entreprises qui appliquent au moins 9,2 kg de paille par vache par jour, quel que soit le type de séparateur (Tableau 4).

TABLEAU 4. Quantité de paille au-delà de laquelle il est rentable de substituer la LFR à la litière de paille selon la variation du prix d'achat de la paille et le séparateur utilisé pour produire la LFR

	PRIX D'ACHAT DE LA PAILLE (\$/kg)		
	0,15 \$	0,22 \$	0,26 \$
Séparateur à vis (kg de paille/vache par jr)	9,18	6,10	5,20
Séparateur à rouleaux (kg de paille/vache par jr)	9,41	6,25	5,33

EN BREF

Le coût total annuel par vache de l'utilisation de la LFR est moins élevé lorsqu'on opte pour le séparateur à vis, soit 550 \$ par vache. En considérant un prix d'achat moyen de la paille de 0,22 \$/kg, il faut que le producteur laitier d'un troupeau de taille moyenne au Québec applique au moins 6,1 kg de paille par vache par jour, pour que l'adoption de la LFR soit rentable pour lui.

Il est important de mentionner que d'autres facteurs peuvent influencer le seuil de rentabilité et ainsi rendre intéressante la substitution de LFR à la litière de paille pour de plus petites quantités d'utilisation de paille. Ces facteurs comprennent, entre autres, l'évolution de la technologie de production de la LFR qui en réduirait le coût, l'augmentation de la taille du troupeau pour atteindre la pleine capacité des équipements de production de LFR ou encore la production d'une litière plus sèche qui offre une meilleure absorption donc moins de litière doit être appliquée. Évidemment, les impacts négatifs sur la santé des vaches sont plus difficiles à compiler, mais devraient aussi être considérés. À titre d'exemple, les coûts d'une mammite clinique typique ont été évalués à 744\$/cas (Aghamohammadi et coll., 2018). Cependant, il est bien connu que les mammites cliniques causées par les *Streptococcus spp.* sont beaucoup plus coûteuses qu'une mammite clinique typique, puisqu'elles entraînent souvent la mort de l'animal ou un arrêt de production.



INTÉRÊT AGRONOMIQUE : LA FRACTION LIQUIDE

PROPRIÉTÉS PHYSICO-CIMIQUES

Selon le type de séparateur, le changement dans les propriétés de la fraction liquide peut être majeur ou négligeable. Dans le projet réalisé, la fraction liquide produite par le séparateur à rouleaux avait les ratios C/N les plus élevés (moyenne de 6,18) comparativement aux deux autres séparateurs, suivait ensuite ceux du séparateur à vis (moyenne de 5,08) et de la centrifugeuse (moyenne de 4,38). De plus, la fraction liquide du séparateur à rouleaux était caractérisée par le plus faible ratio $(N-NH_4^+ + N-NO_3)/NTK$ (moyenne de 0,39; $P < 0,001$; Tableau 5).

TABLEAU 5. Ratios C/N, $(N-NH_4^+ + N-NO_3)/NTK$, N/P et $K/(Ca + Mg)$ de la fraction liquide produite par la centrifugeuse (C), le séparateur à rouleaux (SR) et le séparateur à vis (SV)

PARAMÈTRE	SEMAINE 1			SEMAINE 2		
	C	SR	SV	C	SR	SV
C/N	4,47 ^c	5,87 ^a	5,23 ^b	4,3 ^b	6,5 ^c	4,93 ^b
$(N-NH_4^+ + N-NO_3)/NTK$	0,47 ^a	0,39 ^b	0,46 ^a	0,48 ^a	0,39 ^a	0,48 ^a
N/P	11,02 ^a	5,82 ^c	6,08 ^b	11,65 ^b	5,65 ^a	6,33 ^b
$K/(Ca + Mg)$	1,39 ^a	1,02 ^b	0,96 ^c	1,38 ^c	0,96 ^a	1,04 ^b

^{a-c} Une lettre différente indique un écart significatif entre les deux valeurs à l'intérieur d'une même semaine et d'un même paramètre ($P < 0,05$).

Le coefficient d'utilisation de l'azote est en relation inversement proportionnelle au ratio C/N et linéairement proportionnel au ratio $(N-NH_4^+ + N-NO_3)/NTK$. Dans notre étude, il était 10 % plus élevé pour le séparateur à vis et la centrifugeuse (moyenne de 0,65) comparativement au séparateur à rouleaux (Tableau 6). Cette différence, bien que faible, peut devenir importante lorsque combinée avec l'effet des séparateurs sur le contenu en phosphore. Puisque la centrifugeuse produisait une quantité en phosphore moins importante dans la fraction liquide que les autres types de séparateurs, le ratio N/P résultant était plus élevé ($P < 0,001$; Tableau 5).

TABLEAU 6. Coefficient d'efficacité de N, contenus en N, P_2O_5 et K_2O , taux d'application de N efficace et K_2O pour 40 kg de P_2O_5 des fractions liquides produites par la centrifugeuse (C), le séparateur à rouleaux (SR) et celui à vis (SV).

PARAMÈTRE	SEMAINE 1			SEMAINE 2		
	C	SR	SV	C	SR	SV
Coefficient d'efficacité de N ¹	0,66	0,59	0,64	0,66	0,59	0,65
N efficace [kg/t]	2,17	2,05	2,28	2,38	2,26	2,49
P_2O_5 [kg/t] ²	0,62	1,23	1,2	0,64	1,4	1,24
K_2O [kg/t] ³	2,81	2,83	2,77	3,11	3,07	3,11
N efficace pour 40 kg de P_2O_5 [kg/ha] ⁴	140,41	66,81	75,9	149,57	64,81	79,96
K_2O ³ pour 40 kg de P_2O_5 [kg/ha] ⁴	181,63	92,03	92,52	195,26	88,01	100,1

¹ Coefficient d'efficacité de N pour le printemps et l'été, sol G2-G3, culture annuelle (CRAAQ, 2010)

² Efficacité estimée à 90 % (CRAAQ, 2010)

³ Efficacité estimée à 100 % (CRAAQ, 2010)

⁴ Dose recommandée pour un sol de saturation P/AI Mehlich-3 intermédiaire (5,1 à 10 %) pour la culture du maïs à ensilage (CRAAQ, 2010)

La séparation mécanique altère la valeur agronomique de la fraction liquide en modifiant :

- Le contenu en N, P et K et les ratios C/N et $(N-NH_4 + N-NO_3)/NTK$ (Tableau 6), ce qui détermine l'efficacité de fertilisation de l'azote total.
- La quantité de matière organique et la balance en cation (Tableau 6), lesquels affectent la qualité du sol à long terme.

VALEUR FERTILISANTE

Dans ce contexte, la fraction liquide produite par la centrifugeuse peut fournir une plus grande part du besoin en azote des cultures si l'épandage des fumiers est limité par la concentration en phosphore des sols. À titre d'exemple, pour une culture de maïs à ensilage sur un sol de contenu moyen en phosphore et une recommandation de 40 kg de P_2O_5 /ha (CRAAQ, 2010), la fraction liquide obtenue de la centrifugeuse peut fournir environ 145 kg d'azote disponible plutôt qu'un maximum de 80 kg d'azote efficace pour les fractions liquides produites par les deux types de séparateurs (Tableau 6).

D'autre part, le taux d'application en K_2O correspondant de la fraction liquide de la centrifugeuse représente le double de la dose recommandée (90 kg/ha), alors que la limite serait généralement respectée pour les fractions liquides provenant des deux séparateurs. Cet excès en K_2O dans la fraction liquide de la centrifugeuse est d'autant plus problématique, car le déséquilibre existant du ratio $K/(Ca + Mg)$ (qui diffère de 1,00 : Tableau 5) pourrait causer une diminution du prélèvement du Ca et du Mg par les plantes. Ces cultures, si vouées à l'alimentation des vaches, pourraient entraîner des carences en Ca et Mg, et respectivement mener à une fièvre vitulaire et une tétanie d'herbage (Thomas et Miner, 1996; Leduc et Robert, 1997).

SANTÉ DES SOLS

Puisque la préservation de la santé et de la fertilité des sols est liée à la balance en carbone, le séparateur à rouleaux offre un léger avantage par rapport au séparateur à vis et la centrifugeuse, car il produit une fraction liquide plus riche en carbone. Lorsque rapportée sur une base humide, la fraction liquide issue du séparateur à rouleaux contient 22,6 kg de C/t, alors que celles de la centrifugeuse et du séparateur à vis atteignent 15,1 et 18,7 kg de C/t respectivement.

Pour ce qui est de la fertilisation et de la santé des sols, il apparaît que les séparateurs à vis et à rouleau possèdent un avantage comparativement à la centrifugeuse en permettant d'obtenir une fraction liquide plus intéressante.

L'ENVIRONNEMENT DANS TOUT ÇA?

L'AGRICULTURE, SOURCE IMPORTANTE D'ÉMISSIONS DE GES ET DE POLLUANTS

L'agriculture est une source importante d'émissions de gaz à effet de serre (GES), ces dernières se chiffraient à 7,6 Mt CO₂e en 2016, ce qui représente 9,6 % des émissions totales de GES du Québec (MELCC, 2018). Ces émissions proviennent principalement de la fermentation entérique des ruminants (38,6 %), de la gestion des sols (29,5 %) et de la gestion des fumiers (26,7 %). Les activités agricoles émettent également d'autres polluants dans l'environnement, entre autres des particules fines et de l'ammoniac (NH₃). Le NH₃ est un gaz irritant qui est toxique lorsqu'inhalé en trop grande quantité et qui contribue à l'acidification et l'eutrophisation des cours d'eau. Certaines pratiques doivent donc être améliorées afin de réduire l'empreinte environnementale de l'agriculture.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL LIÉ AUX LITIÈRES

L'utilisation de la LFR en production laitière a été évaluée de manière théorique et d'un point de vue environnemental en comparant ses impacts à ceux d'un scénario traditionnel dans lequel la paille de blé est utilisée comme litière. L'approche préconisée suivant la méthodologie de l'analyse de cycle de vie (ACV) cible toutes les activités à la ferme ainsi qu'en amont. Conséquemment, les émissions considérées proviennent de la récolte de la paille (culture et sol), de la gestion du fumier, de la fabrication de LFR (séparation et conditionnement) et de l'épandage des fertilisants (opérations et sol).

Les émissions liées aux deux scénarios sont regroupées en trois catégories d'impacts (Tableau 7) : changements climatiques (équivalent en dioxyde de carbone : kg CO₂e/vache par an), potentiel d'eutrophisation (équivalent en phosphate : kg PO₄³⁻e/vache par an) et potentiel d'acidification (équivalent en dioxyde de soufre : kg SO₂e/vache par an). Globalement, les émissions de GES du scénario de LFR sont légèrement plus faibles (120,2 kg CO₂e/vache par an de moins) que les émissions du scénario de litière de paille. Lorsque mis en perspective, cette différence pour un troupeau de 65 vaches avantage la LFR par une réduction de 7814 kg CO₂e par an. Ceci équivaut à la plantation de 43 arbres selon Compensation CO₂ Québec (2018).

La principale différence se situe au niveau de la gestion du fumier, car les émissions du scénario de LFR sont plus faibles de 213 kg CO₂e/vache par an. Cette différence s'explique par le fait que la séparation solide/liquide du fumier permet de retirer les solides volatils de la fraction liquide qui est entreposée. Par conséquent, les émissions de CH₄ durant l'entreposage sont plus faibles.

La différence entre les deux scénarios relativement à l'acidification et à l'eutrophisation est négligeable. En effet, seul l'épandage des fertilisants est comptabilisé pour ces catégories d'impact et la dose d'éléments fertilisants appliquée est semblable dans les deux scénarios.

TABLEAU 7. Émissions des scénarios de litière de paille et de LFR

	LITIÈRE DE PAILLE	LFR
Changements climatiques	kg CO₂e / vache par an	
Récolte de la paille (opérations)	17,0	0,0
Récolte de la paille (sol)	54,2	91,5
Gestion du fumier	1232,5	1019,6
Fabrication de la LFR		52,7
Épandage des fertilisants	1344,7	1364,5
Total	2648,48	2528,27
Potentiel d'acidification	kg SO₂e / vache par an	
Épandage des fertilisants	231,1	243,6
Potentiel d'eutrophisation	kg PO₄e / vache par an	
Épandage des fertilisants	28,5	28,8

Dans cette analyse, l'impact du type de litière sur la productivité des vaches laitières n'a pas été considéré. S'il est démontré que l'utilisation de la LFR permet une augmentation de la productivité, cela pourrait contribuer à réduire davantage l'impact environnemental de ce scénario.

ÉMISSIONS DE GES ET D'AMMONIAC DE L'ÉTABLE

Dans le cadre du projet de recherche réalisé au CRSAD, les émissions de GES et d'ammoniac au bâtiment sur LFR ont été comparées aux émissions dans le même bâtiment sur litière de copeaux de bois. Les émissions de GES (CH₄, N₂O et CO₂) et de NH₃ ont été mesurées dans le bâtiment expérimental du CRSAD en multipliant la concentration des gaz (sortie - entrée) par le débit théorique des ventilateurs. Les résultats ont démontré que les émissions de GES provenant du bâtiment LFR (6,65 g CO₂e/min par vache) étaient légèrement plus faibles que lorsque la litière de copeaux de bois était utilisée (8,26 g CO₂e/min par vache). Cette différence se situe principalement au niveau des émissions de CH₄. Toutefois, les émissions de NH₃ mesurées étaient légèrement plus élevées avec la LFR (3,6 mg/min par vache) qu'avec la litière de copeaux de bois (2,7 mg/min par vache).

L'impact de la LFR sur les émissions de l'étable n'a pas été inclus dans l'analyse environnementale. Cependant, si des études supplémentaires peuvent démontrer que les émissions d'un bâtiment sur LFR sont plus faibles que sur litière traditionnelle, les facteurs d'émissions utilisés pour calculer les émissions de CH₄ associés à la gestion du fumier pourraient être modifiés afin de tenir compte du type de litière utilisée dans l'étable.

PERCEPTION ET EXPÉRIENCES DES AGRICULTEURS

L'adoption de la LFR dans les fermes laitières entraîne des changements pour les agriculteurs qui en font le choix. À ce sujet, une étude a été menée dans une perspective de sciences sociales afin de comprendre quelles en sont les répercussions.

CHANGEMENTS MAJEURS

Il semble que les producteurs laitiers profitent d'une opportunité de rénovation ou d'une nouvelle construction pour tester de nouveaux systèmes comme la LFR.

Les éleveurs estiment plus pratique et plus simple d'introduire la LFR au même moment où des changements globaux à leur étable sont réalisés. Ceux-ci sont imposés par le vieillissement de l'étable ou favorisés par un contexte financier personnel propice aux investissements.

L'adoption de la LFR dans leur étable suppose d'abord de rompre avec des idées préconçues quant à la nature du fumier.

Le recyclage de la litière souillée, qui est perçue comme étant « sale », impose maintenant de la considérer comme pouvant devenir hygiénique et réutilisable. De plus, le concept lié au fumier épandu comme fertilisant aux champs est maintenant à déconstruire. En effet, cet engrais organique traditionnel n'est pas complètement remplacé par un produit équivalent une fois que la fraction solide en est extraite.

MAÎTRISER LES PROCÉDÉS

Un élément qui ressort fortement de la recherche est que les producteurs qui adoptent la LFR ne peuvent éviter une phase intense d'apprentissages, pour comprendre et s'appropriier le nouveau système.

Le séparateur est un équipement technique que l'agriculteur doit comprendre et opérer lui-même. Le fournisseur va généralement ajuster la machine et guider le producteur. Toutefois de petits ajustements seront nécessaires au fil du temps pour optimiser le processus selon les conditions particulières de sa ferme, comme entre autres, lors du premier hiver ou d'un changement d'alimentation des vaches. Les essais-erreurs sont cruciaux, car ils développent différentes manières de faire. L'ajout d'eau au fumier avant séparation pour faciliter le traitement par la machine peut s'avérer nécessaire. Le producteur fera appel à la fois à un appareil pour mesurer le taux d'humidité et à ses sens pour sentir, toucher et observer la LFR en cours de fabrication.

Les producteurs expriment des incertitudes quant à la teneur en matière organique de la fraction liquide (issues de la séparation).

Leur raisonnement est lié à la fertilisation de la plante plutôt qu'à l'amendement du sol, et ils se questionnent parfois sur les effets à long terme d'une modification potentielle de la valeur fertilisante du lisier.

³ Recherche qualitative : 14 entretiens semi-dirigés avec des agriculteurs de 5 régions du Québec (Montérégie, Estrie, Centre-du-Québec, Chaudière-Appalaches, Mauricie), visite de leurs fermes laitières ayant adopté la LFR, et 11 entretiens complémentaires dans le réseau technique notamment auprès de chercheurs et de fournisseurs d'équipement.

CONDITIONNEMENT

L'opération de conditionnement est perçue comme essentielle à l'acceptation de la LFR, car les producteurs perçoivent qu'elle permet d'hygiéniser la fraction solide. Le conditionnement mène à concevoir qu'il y a de « bonnes bactéries » dans cette fraction qui facilitent le compostage et c'est un changement de mentalité important pour le producteur.

La gestion de la température dans le composteur semble être définie par les producteurs comme étant la clé de voute du système.

Les producteurs disent devoir former un diagnostic sur l'atteinte d'un dégagement de chaleur jugé satisfaisant pour détruire les agents pathogènes lors du conditionnement de la LFR. Ils font appel à leurs sens et parfois à la mesure de la température. La présence de nombreux agents pathogènes dans les LFR évaluées dans cette étude semble cependant remettre en question cette évaluation des producteurs. Le médecin vétérinaire interviendra parfois, notamment lorsque certains producteurs font analyser la fraction solide et ensuite la LFR après compostage.

LIT DOUILLET

Les manières de distribuer la LFR sous les vaches dans les étables observées sont très diversifiées. Elles dépendent de plusieurs facteurs comme les habitudes de travail des producteurs (horaires des opérations et de repos des vaches), le type d'étable (stabulation libre/entravée, le type de stalles), le type de matériau utilisé précédemment (copeaux de bois/ripe, paille) ou encore des facteurs extérieurs à la ferme (changements saisonniers). Il ne semble pas y avoir de référence sur la façon de faire.

Cependant, l'application de la LFR est prise au sérieux par les agriculteurs interrogés. Selon eux, c'est lorsque la vache entre en contact avec la LFR que la maladie animale peut se développer et remettre en question les pratiques acquises.

CONSIDÉRATIONS LIÉES AU BIEN-ÊTRE ANIMAL

Un des principaux atouts de la LFR est l'amélioration du bien-être animal que les producteurs laitiers décrivent par des comportements de repos et un état général de leurs vaches.

Ils constatent que les vaches passent plus de temps couchées, qu'elles ont moins de blessures et qu'elles sont nettement plus propres. Soulignons que l'aspect économique, lié au fait de ne plus acheter de litière, mais de la produire soi-même, semble entraîner une distribution plus généreuse de litière sous l'animal, ce qui ajoute au confort des vaches.

Les agriculteurs situent d'ailleurs l'adoption de la LFR dans les fermes laitières dans un mouvement plus large (dans l'industrie et la société) de bien-être animal en agriculture, qui suit les demandes des consommateurs et des marchés. D'ailleurs, les producteurs qui adoptent la LFR ont le plus souvent délaissé la stabulation entravée pour la stabulation libre réalisant de grandes modifications de leur étable pour favoriser le bien-être animal. Les habitudes de travail des éleveurs sont, de fait, grandement changées en raison de ces transformations techniques.

Ils estiment néanmoins que la performance de la ferme peut être accrue en adoptant la LFR en raison de la réduction des coûts de litière, mais aussi de l'amélioration de la productivité des vaches.

ÉQUILIBRE ENTRE CONFORT ET SANTÉ ANIMALE

Les agriculteurs rencontrés ont une conscience aiguë de l'équilibre difficile qu'ils doivent maintenir depuis l'adoption de la LFR. Ils disent porter une attention quotidienne accrue à la santé de leurs vaches. Lorsque la LFR est utilisée dans l'étable, plusieurs situations anormales peuvent éventuellement être observées : comptages de cellules somatiques élevés, récurrence ou virulence des infections mammaires. Pour résoudre ce problème, des soins additionnels sont apportés aux vaches. Ceci peut s'avérer contraignant pour ce qui est des coûts, du bien-être animal et du temps alloué aux traitements, mais surtout en ce qui concerne la baisse de productivité de la vache affectée.

Le médecin vétérinaire est ici le principal soutien du producteur, puisqu'il va le guider dans les soins à donner aux vaches. Il va aussi aider dans l'analyse de la LFR pour découvrir les anomalies et les éléments potentiellement nocifs pouvant affecter le pis ou la santé de la vache. Des modifications peuvent alors être apportées à la fabrication et l'application de la LFR.

Pour certains, le problème de santé animale sera résolu, mais pour d'autres, la recherche de solutions n'aboutit pas et pourrait mener à l'abandon de la pratique. Dans l'étude sur les fermes commerciales, deux des 27 producteurs avaient abandonné cette pratique dans l'année suivant la fin de l'étude et ce, malgré des investissements coûteux et difficilement récupérables.

ENCORE PLUSIEURS QUESTIONS

L'utilisation de la LFR présente des atouts aux yeux des agriculteurs rencontrés : économies, amélioration du confort des animaux, réutilisation du fumier. Cependant, les personnes interrogées estiment que l'introduction de cette litière revêt parfois des enjeux quant à la santé animale, pouvant aller jusqu'à faire échec à l'adoption de la pratique dans les fermes. Adopter la LFR signifie aussi maîtriser de nouveaux équipements et gérer un processus de conditionnement microbiologique. La LFR va aussi de pair avec des considérations de bien-être animal dans la ferme, mais celles-ci se confrontent parfois à des conséquences sur la santé du troupeau.

L'ensemble des entretiens réalisés met en évidence la nécessité de faire de nouveaux apprentissages et de développer une expertise à la ferme. Un mode de transmission des connaissances particulier en découle. Un réseau s'établit de la base vers les concepteurs de machinerie et les scientifiques, puisque peu d'instructions claires existent dans ce domaine. L'expérimentation à la ferme génère des connaissances qui sont ensuite partagées au sein des réseaux de production laitière.

Il est clair que la LFR remet en question plusieurs idées préconçues, dont celles liées à la nature même du fumier. Il s'agit donc de changements conceptuels, sociaux et culturels importants dans le travail sur une ferme laitière.

Jusqu'à présent, l'utilisation de la LFR a un impact limité sur la qualité microbiologique du lait, mais son utilisation est relativement récente. De par sa fabrication, il est possible qu'une utilisation à long terme (sur plusieurs années) favorise les bactéries résistantes à chaleur dans le lait ce qui pourrait être problématique pour la transformation laitière.





PARTIE 3

BALISES ENTOURANT LA PRATIQUE

GESTION DES RISQUES

OUTILS DE CONTRÔLE DE QUALITÉ DE LA LFR

POINTS À RETENIR

GESTION DES RISQUES

Une fois appliquée sous les vaches, la litière devient rapidement souillée par les déjections animales. La LFR qui s'accumule sous les animaux ne doit pas devenir un environnement favorable au développement et à la prolifération de microorganismes et d'agents pathogènes. Les trois principales conditions qui encouragent ce développement et cette prolifération sont : **humidité, chaleur et nutriments**. Dans cette perspective, le conditionnement de la LFR devrait permettre :

- de **réduire la teneur en eau** de la fraction solide obtenue par séparation mécanique ;
- de **réduire la charge microbienne**, et particulièrement les agents pathogènes ;
- de **stabiliser la LFR** (réduire le caractère fermentescible du matériel organique).

RÉDUCTION DE LA TENEUR EN EAU

Tous les microorganismes ont besoin d'eau pour se développer et l'assèchement de la LFR est souhaitable pour limiter leur prolifération. **La LFR distribuée sous les vaches ne doit être ni trop humide, pour ne pas favoriser les maladies du pis, ni trop sèche, pour ne pas générer de poussières lors des manipulations**. Le **conditionnement** permet de réduire la teneur en eau selon le temps de résidence et le taux de ventilation de la LFR.

L'assèchement de la LFR avec un conditionnement aérobie constitue une pratique de bonne gestion des risques. Une LFR plus sèche adhère moins aux trayons et réduit les conditions qui favorisent le développement de microbes.



RÉDUCTION DE LA CHARGE MICROBIENNE

Les matériaux (végétaux ou fumier recyclé) utilisés comme litière devraient contenir le moins d'agents pathogènes possible afin de réduire au minimum le risque de maladie du troupeau. L'hygiénisation par l'élévation de la température découlant d'une activité microbienne intense lors du compostage est une pratique reconnue depuis longtemps. Plusieurs pays, comme les États-Unis, ont adopté des critères d'hygiénisation (combinaison de température et de temps de résidence en conditionnement) pour réduire la charge microbienne et ainsi encadrer l'usage sécuritaire des matières résiduelles et des composts.

HYGIÉNISATION PAR PROCÉDÉS DE COMPOSTAGE THERMOPHILE (É.-U.)

Les exigences **d'hygiénisation américaines** préconisées par le U.S. EPA [Agence de Protection de l'Environnement des É.-U.] (EPA, 2018) pour réduire la charge microbienne et la teneur en agents pathogènes des composts à base de boues municipales stipulent que la température dans le compost (lors du conditionnement) doit être :

- Maintenu à 55 °C ou plus pendant au moins trois jours consécutifs pour les procédés de compostage en piles statiques aérées ou en enceintes fermées ;
- Maintenu à 55 °C ou plus pendant au moins 15 jours avec cinq retournements pour les procédés de compostage en andains.

Par analogie, il est permis de croire que des opérations de conditionnement ne respectant pas les paramètres énumérés dans les conditions du « PFRP » (Environment Protection Agency, 2018) pourraient générer un produit dont la charge microbienne et la présence d'agents pathogènes sont plus élevées, ce qui pourrait lui conférer un niveau plus grand de risques liés à la santé.

Lors du conditionnement et sous des conditions d'opérations optimales, la température au sein d'un amas de solides (chambre, bioréacteur, silos, piles, andains) peut atteindre rapidement des températures entraînant un changement des populations microbiennes du substrat). La conservation de la chaleur produite par les bactéries est une clé importante au maintien des températures élevées et au succès du conditionnement. Conséquemment, **des conditions climatiques hivernales très froides pourraient nécessiter de réaliser le conditionnement dans une enceinte fermée et isolée.**

STABILISATION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

Le conditionnement de la fraction solide, tel qu'il est fait actuellement sur les fermes commerciales, est beaucoup trop court et ne permet pas à la population microbienne de consommer les sources d'énergie et de nutriments avant la distribution de la LFR sous les vaches. En effet, puisque ce processus est incomplet, la prolifération des bactéries survient lorsque la litière est sous les animaux. Cependant, un processus complet requerrait plus de trois semaines, ce qui semble difficilement réalisable dans les conditions actuelles de production.

OUTILS DE CONTRÔLE DU CONDITIONNEMENT DE LA LITIÈRE

Le conditionnement exige un suivi et le respect des conditions propices au compostage par le développement des microorganismes aérobies.

Les caractéristiques de la fraction solide à conditionner et les conditions lors de ce processus doivent être rigoureusement surveillées (humidité, structure, températures).

La mesure du contenu en matière sèche se fait à l'aide d'une étuve et d'une balance sous des conditions de températures contrôlées jusqu'à l'obtention d'un poids sec constant. Certains producteurs utilisent un appareil servant à évaluer l'humidité des fourrages servis aux animaux, comme le Koster® par exemple (Figure 4). Cet appareil ne remplace pas une analyse en laboratoire, mais il permet d'estimer la teneur en matière sèche assez rapidement.



FIGURE 4. Appareil Koster® pour mesurer le contenu en matière sèche

Pour mesurer la température d'une pile ou d'un andain en cours de conditionnement, un thermomètre à longue tige est indispensable afin de prendre des mesures au centre. Un thermomètre avec une tige de 48 po (120 cm) permet généralement de le faire adéquatement. Les thermomètres utilisés sont de type « à cadran avec ressort » avec lecture sur un cadran ou « digital » avec thermocouples (Figure 6).

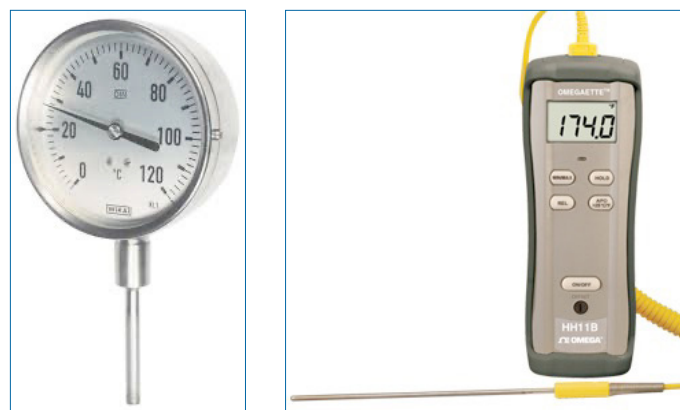


FIGURE 9. Thermomètres pour mesurer la température (a : cadran, b : digital)

GESTION DU RISQUE À LA FERME

Afin de minimiser les impacts potentiels de l'utilisation de LFR sur la santé des animaux, plusieurs points critiques peuvent être évalués avec le médecin vétérinaire et les intervenants à la ferme. En premier lieu, les vaches doivent avoir accès à une ration alimentaire de qualité et des conditions de régie qui minimisent le stress des animaux. Les procédures de traite doivent être optimales afin d'assurer un bon nettoyage des trayons, mais aussi afin d'éviter la surtraite, qui pourrait abîmer les bouts de trayons et ainsi compromettre la première barrière de défense contre l'introduction d'agents pathogènes. Finalement, un programme de vaccination pour la mammites clinique devrait être mis en place à la ferme.



POINTS À RETENIR (ÉTUDE ET LITTÉRATURE)

Séparation pour fabriquer la LFR

La séparation vise à extraire les solides du lisier/fumier qui sont composés de fibres non digérées, d'aliments non consommés, de litière de parcs de vêlage, etc. La fraction solide peut contenir des pathogènes responsables de certaines maladies chez la vache.

CRITÈRE À CONSIDÉRER POUR LA FRACTION SOLIDE

- **Granulométrie : Limiter particules < 1 mm**
(Une fraction solide trop fine LFR = une LFR trop fine)

TYPES DE SÉPARATEURS DISPONIBLES

- **Séparateur à tamis**
 - Peu commun, tendance à colmater en climat nordique.
- **Séparateurs à vis ou presse à rouleaux (recommandés dans la présente étude)**
 - Au choix selon la capacité de traitement, le type d'intrant et les caractéristiques du produit.
 - Seuil de rentabilité atteint si la LFR remplace 6,1 kg à 9,2 kg de paille (à un prix d'achat de 0,22 \$/kg à 0,15 \$/kg).
- **Centrifugeuse**
 - Dispendieux (à l'acquisition et en consommation d'énergie lors de l'opération).
 - Fraction solide à structure fine.
 - Fraction liquide moins intéressante.

SÉPARATION POUR FABRIQUER LA LFR



FIGURE 10. Procédés physiques pour concentrer les résidus solides

Conditionnement de la LFR

Le conditionnement par un procédé biologique aérobie nécessite un suivi rigoureux de la phase thermophile, du temps de résidence, des taux d'aération et de matière sèche.

3 TECHNIQUES POUR LE PROCÉDÉ BIOLOGIQUE AÉROBIE

- **Andains retournés mécaniquement**
> 55°C, minimum 15 jours avec 5 retournements
 - Exige plus de manipulations et de temps.
 - Moins de risques pour la santé respiratoire : respect des valeurs limites d'exposition (VLE).
- **Piles statiques avec aération forcée**
> 55°C, minimum 3 jours
 - Moins de risques pour la santé respiratoire : respect des VLE.
- **Enceintes fermées aérées (cylindres rotatifs, conteneurs fermés, silos horizontaux)**
> 55°C, minimum 3 jours. Isoler pour maintenir la température élevée durant l'hiver
 - Permet de contrôler les paramètres d'opération, de maintenir une phase thermophile constante et d'obtenir un produit de qualité constante.
 - Un temps de résidence de 72 h en cylindre rotatif augmente la quantité de poussières (respect de la valeur limite d'exposition, VLE), de bactéries et moisissures (dépassement des VLE) pouvant être inhalées lors des manipulations.

CRITÈRES DE QUALITÉ APRÈS LE CONDITIONNEMENT

- **Granulométrie : Limiter particules < 1 mm**
(LFR plus grossière limite le compactage sous les vaches et la quantité de bioaérosols lors de sa manipulation).

CONDITIONNEMENT



FIGURE 11. Processus de conditionnement dans la fabrication de la LFR

Gestion et entretien de la LFR

La gestion et l'entretien de la LFR sont aussi importants que la qualité initiale de la litière.

Les procédés de conditionnement utilisés pour produire la litière ne permettent pas de contrôler la présence d'agents pathogènes dans la litière prête à l'emploi.

Un masque de protection respiratoire est recommandé pour la distribution de la LFR, de même que le port de gants.

RECOMMANDATIONS ET OBSERVATIONS

- **En général**
 - Recouvrir complètement et de manière égale la surface de la stalle en tout temps.
 - Entretenir la LFR au moins 2 fois par jour pour enlever les déjections fraîches, la brasser et en ajouter au besoin.
 - La quantité et la fréquence d'application influencent le recouvrement, la compressibilité et le taux d'humidité de la surface de la stalle, ainsi que le confort.
 - L'utilisation de LFR n'a pas fait augmenter le nombre total de cas de mammite sous-clinique ou de mammite clinique.
 - Le risque de mammite clinique à *Klebsiella pneumoniae* était nettement plus élevé chez les vaches logées sur cette litière.
 - Hygiène, confort et temps de repos (11-14 h) semblable pour la LFR et la paille.
 - Préférence pour la LFR par les vaches lorsque la température ambiante est plus froide (Adamski et coll., 2011).
 - Émissions de gaz à effet de serre à l'étable plus faibles avec la LFR qu'avec les copeaux de bois.
- **En général, la LFR prête à l'emploi contenait plus de bactéries que la paille, mais une fois utilisées, les litières étaient comparables.**
 - Les vaches logées sur LFR présentaient une fréquence plus élevée de parasites gastro-intestinaux (ex : cryptosporidies, coccidies) que celles logées sur paille. Le conditionnement du fumier ne permettait pas de détruire ces agents pathogènes.
 - La LFR ne devrait pas être utilisée sous les animaux de moins de six mois d'âge et dans les aires de vêlage.
- **Les travailleurs de la ferme devraient porter des gants lorsqu'ils manipulent la LFR.**
 - Un plan devrait être élaboré avec le médecin vétérinaire et les différents intervenants de la ferme afin de diminuer les risques pour la santé du troupeau associés à l'introduction de cette litière.



APPLICATION DE LA LFR

FIGURE 11. Processus de conditionnement dans la fabrication de la LFR

Valeur fertilisante de la fraction liquide

La fraction liquide demeure un fertilisant intéressant pour les cultures.

EFFET DE LA SÉPARATION SUR LA VALEUR AGRONOMIQUE DE LA FRACTION LIQUIDE

■ Séparateur à rouleaux

- Ratio C/N plus élevé et ratio $(N-NH_4 + N-NO_3)/NTK$ plus faible comparativement à ceux des fractions liquides provenant des deux autres séparateurs.
- La balance en carbone permet de mieux préserver la santé et la fertilité des sols.

■ Centrifugeuse

- Ratio N/P près du double de ceux des deux autres séparateurs. Peut fournir une plus grande part en azote aux cultures si l'épandage est limité par la concentration en phosphore des sols.
- Risque d'excès en K_2O .
- Le déséquilibre du ratio $K/(Ca + Mg)$ pourrait causer une diminution du prélèvement en Ca et Mg par les plantes. Par conséquent, ces cultures employées pour l'alimentation des vaches pourraient entraîner une fièvre vitulaire et une tétanie d'herbage.

■ Impacts environnementaux

- Impacts sur l'eutrophisation et l'acidification sont semblables avec la LFR et la litière de paille.
- Émissions de GES dues à l'entreposage de résidus fertilisants issus de l'utilisation de LFR sont plus faibles comparativement celles provenant de la litière de paille.

VALEUR FERTILISANTE DE LA FRACTION LIQUIDE



FIGURE 9. Fertilisation avec la fraction liquide issue de la fabrication de la LFR

RÉFÉRENCES

- Adam, S., Valacta. Communication personnelle, septembre 2018.
- Adamski, M.; Glowacka, K.; Kupczynski, R.; Benski, A. (2011). *Analysis of the possibility of various litter beddings application with special consideration of cattle manure separate*. Acta. Sci. Pol. Zootechnica. 10(4):5-12.
- Charlton, G. L.; Bouffard, V.; Gibbons, J.; Vasseur, E.; Haley, D.B.; Pellerin, D.; Rushen, J.; de Passillé, A.M. (2016). *Can automated measures of lying time help assess lameness and leg lesions on tie-stall dairy farms?* Appl. Anim. Behav. Sci. 175:14-22.
- Conseil national pour les soins aux animaux d'élevage (CNSAE) (2009). *Code de pratiques - Pour le soin et la manipulation des bovins laitiers*. Conseil national pour les soins aux animaux d'élevage, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 67p.
- Compensation CO₂ Québec (2018). Calculer et compenser vos émissions. [En ligne] <http://www.compensationco2.ca/calcul-emissions-co2/#compensationdirecte> (Page consultée le 10 décembre 2018).
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) (2010). *Guide de référence en fertilisation du Québec*. 2^e édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Ste-Foy, QC, Canada.
- Donham, K.J. (1986). *Hazardous agents in agricultural dusts and methods of evaluation*. Am. J. Ind. Med. 10 (3):205-220.
- Environment protection agency (EPA) (2018). Protection of Environment - Standards for the use or disposal of sewage sludge (Code of Federal Regulation, 40 part 502), United States Environmental Protection Agency, United States Government. [En ligne] <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2018-title40-vol32/xml/CFR-2018-title40-vol32-part503.xml>.
- Fávero, S.; Portilho, F.V.R.; Oliveira, A.C.R.; Langoni, H.; Pantoja, J.C.F. (2015). *Factors associated with mastitis epidemiologic indexes, animal hygiene, and bulk milk bacterial concentrations in dairy herds housed on compost bedding*. Livest. Sci. 181:220-230. [En ligne] <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2015.09.002>.
- Fournel, S.; Godbout, S.; Ruel, P.; Fortin, A.; Généreux, M.; Côté, C.; Landry, C.; Pellerin, D. (2019a). *Production of recycled manure solids for use as bedding on Canadian dairy farms: I. Solid-liquid separation*. J. Dairy Sci. 102(2):1832-1846.
- Fournel, S.; Godbout, S.; Ruel, P.; Fortin, A.; Duquette-Lozeau, K.; Létourneau, V.; Généreux, M.; Lemieux, J.; Potvin, D.; Côté, C.; Duchaine, C.; Pellerin, D. (2019b). *Production of recycled manure solids for use as bedding in Canadian dairy farms: II. Composting methods*. J. Dairy Sci. 102(2):1832-1846.
- Hauge, S.J.; Kielland, C.; Ringdal, G.; Skjerve, E.; Nafstad, O. (2012). *Factors associated with cattle cleanliness on Norwegian dairy farms*. J. Dairy Sci. 95:2485-2496. [En ligne] <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4786>.

- Husfeldt, A. W. et Endres, M.I. (2012). *Associations between stall surface and some animal welfare measurements in freestall dairy herds using recycle manure solids for bedding*. J. Dairy Sci. 95:5626-5634.
- Kullman, G.J.; Thorne, P.S.; Waldron, P.F.; Marx, J.J.; Ault, B.; Lewis, D.M.; Siegel, P.D.; Olenchock, S.A.; Merchant, J.A. (1998). *Organic dust exposures from work in dairy barns*. Am. Ind. Hyg. Assoc. J.59 (6):403-413.
- Leach, K.A.; Archer, S.C.; Breen, J.E.; Green, M.J.; Ohnstad, I.C.; Tuer, S.; Bradley, A.J. (2015). *Recycling manure as cow bedding: Potential benefits and risks for UK dairy farms*. The Vet. J. 206:123-130.
- Leduc, R. et Robert, L. (1997). *Alimentation : Spécial K. Le producteur de lait québécois*. Vol. Avril, pages 38-40.
- Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MELCC) (2018). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2016 et leur évolution depuis 1990*. Direction générale de la réglementation carbone et des données d'émission, 40 p. [En ligne] <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/>.
- Robles, I., Kelton, D. F., Barkema, H. W., Keefe, G. P., Roy, J. P., von Keyserlingk, M. A. G., et coll. (2020). Bacterial concentrations in bedding and their association with dairy cow hygiene and milk quality. *Animal* 14, 1052–1066. doi:10.1017/S1751731119002787.
- Rowbotham, R.F. et Ruegg, P.L. (2016a). *Association of selected bedding types with incidence rates of subclinical and clinical mastitis in primiparous Holstein dairy cows*. J. Dairy Sci. 99:4707-4717.
- Rowbotham, R. F. et Ruegg, P.L. (2016b). *Bacterial counts on teat skin and in new sand, recycled sand, and recycled manure solids used as bedding in freestalls*. J. Dairy Sci. 99:6594-6608.
- Sant'Anna, A. C. et Paranhos da Costa, M.J.R. (2011). *The relationship between dairy cow hygiene and somatic cell count in milk*. J. Dairy Sci. 94:3835–3844.
- Schenker, M.B.; Christiani, D.; Cormier, Y.; Dimich-Ward, H.; Doekes, G.; Dosman, J.; Douwes, J.; Dowling, K.; Enarson, D.; Green, F.; Heederik, D.; Husman, K.; Kennedy, S.; Kullman, G.; Lacasse, Y.; Lawson, B.; Malmberg, P.; May, J.; McCurdy, S.; Merchant, J.; Myers, J.; Nieuwenhuijsen, M.; Olenchock, S.; Saiki, C.; Schwartz, D.; Seiber, J.; Thorne, P.; Wagner, G.; White, N.; Xu, X.P.; Chan-Yeung, M. (1998). *Respiratory health hazards in agriculture*. Am. J. Respir. Crit. Care Med. 158 (5): S1-S76.
- Solano, L.; Barkema, H.W.; Pajor, A.E; Mason, S.; LeBlanc, S.J.; Nash, C.G.R; Haley, D.B.; Pellerin, D.; Rushen, J.; de Passillé, A.M.; Vasseur, E.; Orsel, K. (2016). *Associations between lying behavior and lameness in Canadian Holstein-Friesian cows housed in freestall barns*. J. Dairy Sci. 99:2086-2101.
- Thomas, E.D et Miner, W.H. (1996). *Fertilizing forages*. In Dairy Day at Miner Institute. The William H. Miner Agricultural Research Institute, Chazy, NY.



Comment citer ce document :

Godbout et coll., 2022. Litière recyclée en production laitière : État des connaissances et balises. CRSAD-IRDA, 43 pages.

Pour en savoir plus :

Stéphane Godbout
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

Équipe de réalisation et de rédaction :

- Steve ADAM, agr.
Valacta
- Luc BELZILE, M. Sc.
IRDA
- Patrick BRASSARD, ing. jr, Ph. D.
IRDA
- Geneviève BRISSON, LI. B., Ph. D.
Université du Québec à Rimouski
- Caroline CÔTÉ, agr., Ph. D.
IRDA
- Caroline DUCHAINE, Ph. D.
IUCPQ – Université Laval
- Simon DUFOUR, DMV, Ph. D.
FMV – Université de Montréal
- Karine DUQUETTE-LOZEAU, B. Sc., étudiante à la maîtrise
IUCPQ - Université Laval
- Gilles FECTEAU, Diplômé ACVIM
FMV - Université de Montréal
- Sébastien FOURNEL, ing., Ph. D
Université Laval
- Annie FRÉCHETTE, DMV, étudiante au Ph.D.
(FMV – Université de Montréal)
- Méricie GAGNON, Ph. D.
(Université Laval)
- Mylène GÉNÉREUX, M. Sc.
IRDA
- Stéphane GODBOUT, ing., agr., Ph. D.
IRDA
- Denise GODONOU, ing., M. Sc.
IRDA
- Christine LANDRY, agr., Ph. D.
IRDA
- Valérie LÉTOURNEAU, Ph. D.
IUCPQ – Université Laval
- Ariane LÉVESQUE, ing. jr, M. Sc.
IRDA
- Salma OUSLATI, étudiante à la maîtrise
Université Laval
- Denis POTVIN, agr., B. Sc.
IRDA
- Pierre RUEL, ing.
CRSAD
- Marianne VILLET AZ ROBICHAUD, agr., Ph.D.
FMV - Université de Montréal
- RÉVISION :
Liliane CHÉNARD, M. Sc.

Les fonds pour cette recherche proviennent du Programme canadien d'adaptation agricole d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les auteurs remercient tous les collaborateurs au projet, plus spécifiquement GEA et les fermes Hamelin et Fils, Boivert inc., Aston inc., Landrynoise inc., Barmlait inc. et Rufer inc. Les auteurs remercient également tous les techniciens et les ouvriers du CRSAD et de l'IRDA qui ont participé activement à la réalisation du projet.

