



Rapport final : Comparaison des performances économiques, environnementales et animales entre une ferme conventionnelle pour vaches laitières et une serre-étable

Dans le cadre du cours Projet d'ingénierie II : GAE-3009

Par :

Alexandre Blouin (111 156 518)

Eve-Marie Houde (111 159 298)

François Savard (111 150 519)

Superviseur de projet : M. Sébastien Fournel

Département des sols et de génie agroalimentaire

Faculté des sciences, de l'agriculture et de l'alimentation

Université Laval

30 avril 2020

Résumé

Les structures innovantes en acier dans le domaine de la production animale font l'objet d'un intérêt de plus en plus développé dans les conditions actuelles de production. Les Industries Harnois Inc. nous ont donc mandatés afin d'effectuer une comparaison entre un bâtiment de ferme conventionnel pour vaches laitières et un bâtiment innovant tel qu'une serre-étable. Le bâtiment conventionnel est en stabulation libre à logettes alors que la serre-étable comporte une aire de couchage sur litière compostée. Pour le contexte de l'étude, la ferme type comprend 100 vaches en lactation. La comparaison a été effectuée au niveau économique, environnemental et animal. Une revue de littérature a permis de sortir les éléments clés concernant les coûts de construction ainsi que les caractéristiques typiques des deux sortes de bâtiments. Le design d'une étable conventionnelle a également permis d'évaluer les coûts de construction pour ce type d'étable et, ainsi, effectuer une comparaison avec la serre-étable. En plus de s'appuyer sur la revue de littérature, l'aspect des conditions d'ambiance intérieures a été quantifié à l'aide de divers instruments dans des étables réelles des deux types. Des visites de ces étables ont permis de se familiariser avec celles-ci au préalable.

Pour la partie économique, les coûts de construction se sont basés sur le design typique des deux modèles de bâtiment et des structures associées à la régie d'élevage utilisée. Les coûts moyens de construction d'une étable conventionnelle, soit $412 \text{ \$}/\text{m}^2$ ($38 \text{ \$}/\text{pi}^2$), sont plus élevés que ceux d'une serre-étable, soit $375 \text{ \$}/\text{m}^2$ ($35 \text{ \$}/\text{pi}^2$).

En ce qui concerne les environnements intérieurs des deux types d'étables, les données récoltées en conditions réelles d'élevage ont contribué à mettre l'accent sur les différences occasionnées par un toit solaire dans la serre-étable. Certains points principaux sont ressortis pour la serre-étable, notamment ses performances supérieures au niveau de la luminosité. Celle-ci était de 319 % plus élevée que dans l'étable conventionnelle. Cependant, la température était plus optimale à l'intérieur de cette dernière ($8,2^\circ\text{C}$ vs $2,3^\circ\text{C}$). La qualité de l'air était certainement supérieure dans une étable de type serre (en moyenne, 35 % moins de gaz). Dans la serre-étable, des indicateurs de la qualité de l'air tel le dioxyde de carbone et l'ammoniac avaient respectivement des concentrations de 41 % et 23 % inférieures à l'autre bâtiment d'élevage. La vitesse de l'air était

similaire dans les deux types de bâtiment. Des conditions initiales différentes à la prise de mesures doivent toutefois être considérées puisqu'elles peuvent influencer les résultats obtenus.

La partie des performances animales n'a été évaluée qu'au niveau du type de litière utilisé selon le mode de régie du troupeau. La comparaison s'est basée sur les données relevées de la littérature. De prime abord, la litière compostée diminue les blessures aux membres des vaches et augmente le temps de repos de ces dernières. Ainsi, la production laitière serait augmentée (1,4 kg/vache/jour). La somme dégagée par cette augmentation se chiffre à 39 964\$ par année.

Table des matières

Résumé.....	i
Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures	vii
Liste des abréviations et des symboles	ix
1. Introduction.....	1
2. Synthèse des connaissances.....	3
2.1 Étable en stabulation libre	3
2.2 Serre-étable.....	3
2.2.1 Structure, ventilation et luminosité.....	3
2.2.2 Aire de couchage sur litière compostée	5
3. Visites d'étables.....	7
3.1 Ferme Rodajean Inc.....	8
3.2 Ferme Dubois C.R.A.R Inc.	10
3.3 Ferme Majestein Inc.	12
4. Aménagement	14
4.1 Objectifs.....	14
4.2 Informations utiles	14
4.2.1 Aménagement des logettes de l'étable conventionnelle.....	14
4.2.2 Aménagement de l'aire de couchage de la serre-étable	16
4.2.3 Laiterie pour une étable comportant un robot de traite	17
4.3 Plans d'aménagement intérieur.....	17
4.3.1 Aménagement du bâtiment conventionnel	17
4.3.2 Aménagement de la serre-étable	19
5. Conception des étables.....	20
5.1 Objectifs.....	20
5.2 Informations utiles	20
5.2.1 Principe de ventilation naturelle	20
5.2.2 Ouvrages spécialisés nécessaires pour la conception des bâtiments agricoles	22
5.2.3 Dimensionnement du bâtiment conventionnel	23
5.2.4 Dimensionnement de la serre-étable	24
5.3 Calculs de structure pour l'étable conventionnelle	25

5.3.1 Dimensionnement du système de ventilation du bâtiment conventionnel	25
5.3.2 Calculs des charges	26
5.3.3 Combinaison de charges	29
5.3.4 Axes porteurs et largeurs tributaires	29
5.3.5 Fermes de toit	30
5.3.6 Colombages	30
5.3.7 Lisse basse	32
5.3.8 Linteaux, poteaux courts et poteaux longs	33
5.3.9 Poteaux d'acier	34
5.3.10 Soulèvement	35
5.3.11 Béton intérieur	35
5.3.12 Contreventement	37
5.3.13 Éléments nécessaires pour l'étable conventionnelle	37
5.4 Plans des étables	39
5.4.1 Plans de l'étable conventionnelle	39
5.4.2 Plans de la serre-étable	39
6. Analyse économique	39
6.1 Objectif	39
6.2 Informations utiles	40
6.2.1 Matériaux de construction et autres équipements	40
6.2.1 Gestion des fumiers	43
6.3 Discussion de l'analyse économique	45
7. Prise de mesures	46
7.1 Objectifs	46
7.2 Informations utiles	47
7.2.1 Température et humidité relative	47
7.2.2 Ventilation	47
7.2.3 Luminosité et photopériode	47
7.2.4 Qualité de l'air	49
7.3 Sélection des appareils	50
7.3.1 Température et humidité	50
7.3.2 Vitesse de l'air	51
7.3.3 Luminosité	52

7.3.4 Qualité de l'air	52
7.3.5 Instrumentation	53
7.4 Matériels et méthodes	56
7.4.1 Lieux	56
7.4.3 Prise de mesures	57
7.5 Résultats	58
7.6 Discussion	60
8. Comparaison	63
8.1 Objectif	63
8.2 Analyse et discussion	63
8.2.1 Comparaison économique	63
8.2.2 Comparaison environnementale	64
8.2.3 Comparaison animale	65
8.2.4 Résumé des comparaisons	65
9. Conclusion	66
Bibliographie	68
Annexe A - Questionnaires pour les visites de fermes laitières	75
Annexe B - Photos des fermes visitées	77
Ferme Rodajean Inc.	77
Ferme Dubois C.R.A.R. Inc.	80
Ferme Majestein Inc.	81
Annexe C - Plans de l'étable conventionnelle	83
Annexe D – Plans de la serre-étable	89
Annexe E – Tableaux résumés des coûts	92
Annexe F – Protocole et horaire de la prise de mesures	95
Horaire projeté de la journée	95
Prise de mesures	95

Liste des tableaux

Tableau 1 - Avantages et inconvénients des étables à stabulation libre à aires de couchage (Adapté de MAAARO, 2018, et de BEWLEY, 2016)	5
Tableau 2 - Comparaison des conditions idéales pour le compostage et des conditions de la litière compostée (Tiré de MAAARO et adapté de RUSSEL ET AL., 2017)	6
Tableau 3 - Dimensions recommandées pour les logettes en stabulation libre (Adapté de VALACTA, 2014)	14
Tableau 4 - Dimensions recommandées pour l'espace à la mangeoire (CNSAE, 2009)	15
Tableau 5 - Dimensions intérieures des sections de l'étable conventionnelle	23
Tableau 6 - Résultats du calcul du système de ventilation naturelle pour les cheminées de ventilation (Calculé à partir de CHOINIÈRE, 1994)	26
Tableau 7 - Charges mortes à utiliser pour le dimensionnement des éléments structuraux (Calculé à partir du CNBC 2010)	27
Tableau 8 - Charges de neige non pondérées (Calculé à partir du CNBC 2010)	28
Tableau 9 - Charges de vent non pondérées (Calculé à partir du CNBC 2010)	28
Tableau 10 - Combinaisons de charges critiques – ELU (Calculé à partir du CNBC 2010)	29
Tableau 11 - Combinaisons de charges critiques – ELS (Calculé à partir du CNBC 2010)	29
Tableau 12 - Largeurs tributaires pour chaque axe porteur	30
Tableau 13 - Éléments structuraux et non structuraux composant l'étable conventionnelle	38
Tableau 14 - Composition type d'un mur d'une étable conventionnelle et d'une serre-étable	40
Tableau 15 - Composition type d'un plafond d'une étable conventionnelle et d'une serre-étable ...	40
Tableau 16 - Composition type d'une fondation d'une étable conventionnelle et d'une serre-étable	41
Tableau 17 - Coûts totaux des matériaux de l'étable conventionnelle	41
Tableau 18 - Coûts totaux des équipements de l'étable conventionnelle	42
Tableau 19 - Coûts totaux des équipements de la serre-étable par Les Industries Harnois Inc. pour 60 vaches en lactation	42
Tableau 20 - Résumé des coûts sur les étables en stabulation libre à logettes et à aire de couchage	45
Tableau 21 - Intensité lumineuse pour les étables à logettes et leurs dépendances (Adapté de FORTIER ET AL., 2005)	49
Tableau 22 - Valeurs d'exposition (Adapté de GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2019)	50
Tableau 23 - Spécifications Kimo® AMI 110	54
Tableau 24 - Conditions extérieures lors de la prise de mesures	58
Tableau 25 - Mesures moyennes intérieures des étables	59
Tableau 26 - Résumé des comparaisons économique, environnementale et animale	65
Tableau 27 - Coût de chaque matériau utilisé pour l'étable conventionnelle	92
Tableau 28 - Coût de chaque équipement dans l'étable conventionnelle	94

Liste des figures

Figure 1 - Vue intérieure de l'étable et des ventilateurs à débit élevé et à vitesse faible	8
Figure 2 - Litière compostée	9
Figure 3 - Allée d'alimentation	10
Figure 4 - Aménagement intérieur	11
Figure 5 - Bâtiment vu de l'extérieur	12
Figure 6 - Toiles, ouvertures d'entrée d'air, ventilateurs à débit élevé et à vitesse faible et vaches en gestation	13
Figure 7 - Dimensions recommandées pour les logettes en stabulation libre (Tirée de VALACTA, 2014)	15
Figure 8 - Premier aménagement intérieur considéré	18
Figure 9 - Deuxième aménagement intérieur considéré	18
Figure 10 - Troisième aménagement intérieur considéré	19
Figure 11 - Aménagement intérieur de la serre-étable	20
Figure 12 - Mouvement d'air en ventilation naturelle selon plusieurs conditions météorologiques extérieures différentes (Tirée de DAIRYLAND INITIATIVE, 2019a)	21
Figure 13 - Vue de dessus de l'aménagement intérieur de l'étable conventionnelle	24
Figure 14 - Vue de dessus de l'aménagement intérieur de la serre-étable	25
Figure 15 - Kimo® AMI 310 (SAUERMAN, 2020)	54
Figure 16 - Luxmètre Sper Scientific® 840020 (SPER SCIENTIFIC DIRECT, 2020)	55
Figure 17 - GASMET DX4040 FTIR Gas analyser (GASMET, 2020)	55
Figure 18 - Positionnement des points de mesures à la Ferme Majestein	56
Figure 19 - Positionnement des points de mesures à la Ferme Rodajean	57
Figure 20 - Ventilation avec corniche	77
Figure 21 - Module de contrôle Harnois	77
Figure 22 - Station météo	78
Figure 23 - Système de contrôle de l'éclairage	78
Figure 24 - Compost en maturation	79
Figure 25 - Raclette	79
Figure 26 - Emplacement du système de géothermie	80
Figure 27 - Système de ventilation	80
Figure 28 - Tracteur pour ramasser les fumiers liquides	81
Figure 29 - Système de contrôle Maximus dans l'étable conventionnelle	81
Figure 30 - Litière compostée, allée de raclette et allée d'alimentation	82
Figure 31 - Allée de raclette	82
Figure 32 - Plans d'aménagement	84
Figure 33 - Vue en coupe avec des murs fermés au niveau des logettes	85
Figure 34 - Vue en coupe avec les ouvertures d'entrée d'air de la ventilation naturelle au niveau des logettes	86
Figure 35 - Vue en coupe du béton et de l'acier d'armature pour la moitié de l'étable conventionnelle	86
Figure 36 - Vues en coupe éloignée et rapprochées des matériaux pour les murs, le plafond et les fondations	88

Figure 37 - Vue isométrique de la serre-étable.....	89
Figure 38 - Structure d'acier composant la serre-étable	90
Figure 39 - Aménagement intérieur de la serre-étable	91

Liste des abréviations et des symboles

ACC - Association Canadienne du Ciment

CCB - Conseil canadien du bois

CCN - Conseil canadien des normes

CNCBA - Code national de construction du bâtiment agricole

CNBC - Code national du bâtiment du Canada

CNRC – Conseil national de recherches du Canada

CNSAE - Conseil national pour les soins aux animaux d'élevage

CRAAQ - Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec

ELU - État limite ultime

ELS - État limite en service

IRDA – Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

MAAARO - Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario

ppm - Partie par million

WDM - Wood Design Manual

1. Introduction

L'idée d'intégrer le concept d'élevage d'animaux à celui d'une serre est principalement apparue à la fin des années 1980 et au début des années 1990 en Amérique du Nord (KAMMEL, D. ET AL, 1997). En tant qu'entreprise qui innove au niveau des structures d'acier dans le domaine agricole, Les Industries Harnois Inc. ont récemment proposé des modèles d'étables laitières basés sur ce concept : les serre-étables (HARNOIS, 2019a).

La serre-étable est un type de bâtiment peu répandu au Québec. Il n'y a donc qu'une infime quantité de données précises sur les bienfaits potentiels qu'elles peuvent procurer aux animaux ainsi qu'à la rentabilité de l'entreprise. Les Industries Harnois Inc. ne peuvent donc pas se baser sur des données quantifiées pour exprimer les avantages possibles en termes de bien-être animal, d'environnement intérieur et de rentabilité procurés par les serre-étables ainsi que pour mettre en valeur les structures qu'elles offrent dans le domaine de la production animale.

Les Industries Harnois Inc. nous ont donc mandatés afin de procéder à la comparaison économique, des conditions d'ambiance intérieure ainsi que du bien-être animal pour une étable conventionnelle et une serre-étable. Le mandat se divise en plusieurs sous-objectifs : (1) réaliser une revue de littérature sur, entre autres, les bienfaits et les désavantages des deux bâtiments; (2) réaliser des visites d'étables types (3) effectuer la conception d'une étable conventionnelle et d'une serre-étable; (4) calculer les coûts de construction des structures préalablement élaborées; (5) effectuer des prises de mesures de l'ambiance intérieure (température-humidité relative, vitesse du vent, luminosité et qualité de l'air) dans les deux types de bâtiments ayant les mêmes types de litière, de ventilation et le même mode de logement pour les vaches afin d'évaluer l'effet d'un toit solaire; (6) réaliser une comparaison entre l'étable conventionnelle et la serre-étable à partir des informations relevées et des données fournies par les Industries Harnois Inc.

Les fermes considérées pour la comparaison logent 100 vaches en lactation en stabulation libre. L'étable dite conventionnelle est à logettes alors que la serre-étable est sur litière compostée. Pour fin d'évaluation de l'impact d'un toit solaire sur les conditions intérieures, les étables dans lesquelles des données seront récoltées sont toutes deux en stabulation libre sur litière compostée. Ce projet ne considère pas les vaches tarées et les sujets de relève. Une autre limite du projet

consiste en la courte période de temps sur laquelle l'étude est réalisée (saison hivernale). Les effets du toit solaire ne seront donc pas appréciés sous plusieurs conditions météorologiques.

2. Synthèse des connaissances

2.1 Étable en stabulation libre

L'étable en stabulation libre est un bâtiment agricole ayant normalement une charpente de bois et un toit de tôle d'acier. Le bâtiment peut être qualifié de chaud ou de froid et il peut être muni de plusieurs types de systèmes de ventilation. La particularité des étables à stabulation libre est la liberté de mouvement des animaux. Les vaches peuvent se déplacer à leur aise. Elles vont s'alimenter à l'allée d'alimentation et peuvent se coucher à l'emplacement de leur choix dans l'espace prévu à cet effet.

Un bâtiment chaud est un mode de logement qui comporte de l'isolation au niveau des murs et du plafond et qui est muni d'un système de ventilation mécanique (LAROCHE, 2006). La chaleur produite par les animaux est donc conservée à l'intérieur du bâtiment. Il peut ainsi être plus agréable pour les employés de travailler dans ce type de bâtiment en hiver, mais des problèmes d'humidité sont généralement présents dans les bâtiments agricoles isolés.

Un bâtiment d'élevage froid n'a pas d'isolation ou en comporte parfois un peu au niveau du toit. Cette isolation sert généralement à minimiser la condensation durant les temps très froids et à contrer l'effet du rayonnement solaire en été. La température à l'intérieur d'une étable froide est légèrement plus élevée qu'à l'extérieur, mais elle varie en fonction de la température extérieure. Le mince écart de température entre l'intérieur et l'extérieur réduit les problèmes d'humidité dans le bâtiment. Dans des climats rigoureux, la température peut descendre en dessous du point de congélation. Ceci peut occasionner des problèmes d'alimentation en eau et de machineries tels les racleurs. Ce type d'étable serait avantageux d'un point de vue économique (LEBLANC, 2014).

2.2 Serre-étable

La serre-étable est une sous-catégorie de l'étable froide. Ce type d'étable a vu le jour dans les années 1980 et est encore très peu répandu, surtout au Québec.

2.2.1 Structure, ventilation et luminosité

La principale caractéristique des serre-étables est son recouvrement qui est composé d'une à deux toiles de polyéthylène translucide (70 % opacité) ou blanche (13 % opacité). Cette toile a une

épaisseur d'environ 6 mm (0,24 po) et doit habituellement être changée aux trois à six ans (KAMMEL, D. ET AL, 1997; GUIDE DES BOVINS LAITIERS, 2014). Il est important de considérer le risque de bris occasionnels de la toile. La structure du bâtiment est faite d'acier galvanisé de 50,8 mm (2 po) à 76,3 mm (3 po) de diamètre.

Un bâtiment de la sorte est ventilé naturellement. Il possède des ouvertures sur les côtés longitudinaux ainsi qu'au plafond. Ces ouvertures sont ajustables en fonction des paramètres de l'environnement intérieur de la serre-étable. La ventilation naturelle doit être gérée comme tout autre type d'étable froide et même avec plus d'attention. Une gestion rigoureuse est nécessaire, car la radiation solaire passant au travers des toiles crée un effet de serre (KAMMEL, D. ET AL, 1997; LEBLANC ET DUSSAULT, 2014; EILEEN, 2019). Cela apporte un risque de stress thermique lors de temps chauds et ensoleillés. Il est recommandé de mettre des toiles d'ombrage pour les périodes ensoleillées pour limiter les effets négatifs des serre-étables. Cela augmente les coûts du bâtiment. Par temps froids, il y a aussi un risque de givre sur les toiles (LEBLANC ET DUSSAULT, 2014). Le contrôle de l'environnement des serre-étables est un gros défi et demande des connaissances spécifiques (KAMMEL, D. ET AL, 1997).

La serre-étable est reconnue pour la clarté à l'intérieur du bâtiment et des coûts relativement bas de construction (EILEEN, 2019 ; FISCHER, 1998). En effet, une serre-étable comporte une faible quantité de matériaux différents comparativement à une étable conventionnelle. De plus, un tel bâtiment est très facile à agrandir en largeur et en longueur (GALAMA, 2011). Le manque d'informations à propos des serre-étables est souvent soulevé dans la littérature (KAMMEL, D. ET AL, 1997; FISCHER, 1998; EILEEN, 2019).

Un type de serre-étable est l'étable solaire. La différence avec la serre-étable est que l'entièreté du bâtiment est recouverte de polyéthylène. Pour une étable solaire, le toit et les côtés laissent passer la lumière grâce à des panneaux rigides translucides de fibre de verre ou par une toile de polyéthylène (LEBLANC ET DUSSAULT, 2014). Le reste de la structure du bâtiment est conventionnel, soit en bois ou en acier.

2.2.2 Aire de couchage sur litière compostée

Les serre-étables sont généralement sur litière compostée. Ces étables ressemblent à celles en stabulation libre sur logettes, mais la litière occupe toute la surface dédiée aux logettes sans comporter de séparation. Les vaches peuvent donc se coucher où elles le veulent et dans la position de leur choix. Cette litière compostée doit être remuée deux fois par jour sur une profondeur de 304,8 mm (12 po) à 457,2 mm (18 po) pour conserver un milieu aérobie en vue de son compostage (BLAIS, 2018). Les aires de couchage sur litière profonde comportent certains avantages et inconvénients présentés au Tableau 1.

Tableau 1 - Avantages et inconvénients des étables à stabulation libre à aires de couchage (Adapté de MAAARO, 2018, et de BEWLEY, 2016)

Avantages	Inconvénients
Les vaches peuvent s'allonger dans la position de leur choix	Il existe des risques pour la santé des pis
La litière accumulée est très confortable	La meilleure litière est la sciure de bois, mais c'est la plus dispendieuse
Les étables avec aire de couchage sur litière compostée peuvent être transformées en étable à stabulation libre à trois rangs de logettes	Le concept oblige à gérer le fumier sous deux formes, soit sous forme liquide et sous forme solide selon le type de litière utilisée
Les vaches ont accès à une aire de couchage total de 14 m ² (150 pi ²) /vache	
Augmentation de la production de lait (1,4 kg (3 lbs) de lait/vache/jour)	
Accroissement de la longévité des vaches	
Diminution des blessures aux jambes	
Diminution du temps passé sur le béton	

Évidemment, une régie sous litière compostée implique une certaine gestion. La gestion de la litière doit se faire de façon régulière et attentive pour que celle-ci continue de se composte. Une sciure sèche, telle que le bran de scie, est utilisée, car elle se décompose facilement par

compostage (MAAARO, 2018). Le bran de scie fonctionne très bien pourvu que son humidité soit inférieure à 18 % (BEWLEY ET AL, 2012). De la sciure de bois frais peut également être utilisée, mais un apport plus répétitif est nécessaire puisque sa teneur en humidité est plus élevée. Il peut y avoir un ajout de papier peint sec et haché pour faciliter l'absorption des déjections. Une faible teneur en humidité de la litière est importante, car elle absorbe ainsi les déjections de manière plus efficace. Il est à noter que la sciure de cèdre ne se composte pas puisqu'elle contient de l'huile et certains matériaux organiques qui empêchent l'activité microbienne participant à la décomposition des éléments (BEWLEY ET AL, 2012). D'autres types de litières existent : les épis de maïs, la paille de soya et la paille de lin. Ceux-ci performant bien, mais ils doivent être finement broyés dans un tamis de 19,05 mm (0,75 po) et peuvent être mélangés avec de la sciure de bois pour augmenter leur efficacité (BEWLEY ET AL, 2012).

Une autre méthode consiste à utiliser de la paille hachée finement. Ce type de litière ne se composte pas aussi facilement que la sciure. Des essais avec paille, paille de soya, rafles de maïs et tiges de maïs ont été effectués. La sciure de bois reste la meilleure option au compostage grâce à son absorption élevée (MAAARO, 2018). Au Québec, les types de litières les plus utilisées sont la paille, le bran de scie et la tourbe. La paille longue ou légèrement hachée est surtout utilisée en hiver pour sa bonne isolation thermique. La tourbe offre, quant à elle, une excellente absorption et est utilisée l'été, car elle ne chauffe pas et offre un bon contrôle des mouches (DANIEL GRISÉ, 2019, communication personnelle).

Afin d'illustrer les différences entre un compost régulier et les propriétés compostables de la litière, le Tableau 2 s'inspire des résultats d'une étude dirigée par RUSSEL ET AL (2017).

Tableau 2 - Comparaison des conditions idéales pour le compostage et des conditions de la litière compostée (Tiré de MAAARO et adapté de RUSSEL ET AL., 2017)

Condition	Plage idéale	Système de litière compostée
Rapport carbone/azote (C : N)	25/1 à 30/1	11/1 à 21/1
Teneur en eau (% à l'état humide)	50 - 60	63
pH	6,5 - 8,0	7,5
Température (°C)	54 – 60	43

Ces données montrent que la litière accumulée ne se composte pas comme un compost idéal, mais les chercheurs concluent qu'il y a tout de même assez de chaleur et d'activités biologiques dans ce type de litière pour détruire les bactéries responsables des mammites et éliminer les larves de mouches (MAAARO, 2018).

Pour obtenir un bon compost, trois éléments sont nécessaires : des éléments nutritifs, de l'humidité et de la chaleur. Malheureusement, les organismes provoquant les mammites ont aussi besoin de ces trois éléments (MAAARO, 2018). Il est donc indispensable que les bons organismes soient présents dans le compost. Il est important d'avoir en tout temps de la litière disponible à ajouter pour empêcher qu'elle ne devienne trop souillée d'excréments et trop humide, favorisant alors l'apparition d'organismes défavorables. Une quantité moyenne de litière de paille ou de résidus de bois à ajouter pour les aires de couchage sur litière accumulée est d'environ 3 kg/tête/jour (GODBOUT, 2017).

3. Visites d'étables

Les serre-étables étant peu communes au Québec, deux visites ont permis à l'équipe de se familiariser avec ces types de bâtiments. Ces visites, effectuées le 18 octobre 2019, ont été réalisées à la Ferme Rodajean Inc., une conception des Industries Harnois Inc., ainsi qu'à la Ferme Dubois C.R.A.R Inc.

Une troisième étable, mais conventionnelle à stabulation libre, a été visitée le 24 octobre 2019. Cette étable, la Ferme Majestein, sera utilisée afin de prendre des mesures de l'environnement intérieur et pouvoir établir un comparatif avec les conditions intérieures régnant dans une serre-étable.

Les producteurs rencontrés au cours des visites des serre-étables et de l'étable à stabulation libre ont mentionné que l'ajout de litière se faisait de quelques fois par semaine à une fois aux deux semaines selon les conditions de propreté des animaux.

3.1 Ferme Rodajeau Inc.

La Ferme Rodajeau est située à St-Germain-de-Grantham. Elle comporte deux bâtiments d'élevage, soit une étable à stabulation entravée ayant plusieurs dizaines d'années pour les vaches taries et une serre-étable datant de l'hiver 2018. Environ 60 vaches en lactation sont présentes dans la serre-étable. Ce bâtiment est considéré comme une étable de type solaire intelligente ayant des dimensions de 30,48 m x 45,72 m (100 pi x 150 pi).

La ventilation de l'étable est de type naturel avec des panneaux doubles aux murs, des entrées d'air aux corniches (Annexe B, Figure 20) et de six ventilateurs à débit élevé et à vitesse faible (Figure 1). Tous ces éléments sont gérés grâce à un système automatisé des Industries Harnois Inc. (Annexe B, Figure 21) lié à une station météo (Annexe B, Figure 22) à l'extérieur et à des capteurs à l'intérieur du bâtiment. Le producteur n'a donc pas besoin de gérer les éléments de ventilation et de température. La température minimale enregistrée au cours de l'hiver 2019 a été de -18 °C.



Figure 1 - Vue intérieure de l'étable et des ventilateurs à débit élevé et à vitesse faible

La luminosité intérieure est elle aussi contrôlée par un système automatisé (Annexe B, Figure 23). L'éclairage artificiel démarre lorsque la luminosité est inférieure à 220 lux. La toile de polyéthylène recouvrant le toit a une durée de vie de 20 à 25 ans et laisse passer 30 % de la lumière. Lors de journées ensoleillées, la luminosité peut atteindre jusqu'à 600 lux.

Cette étable comporte une aire de couchage sur litière compostée (Figure 2). Le producteur utilise de la sciure de bois durant l'hiver et de la mousse de tourbe durant l'été. Il fait présentement des tests avec de l'ajout de paille de soya hachée provenant de ses champs pour diminuer les coûts reliés à l'achat de litière. Il change la litière trois fois par année et il effectue présentement des tests pour faire mûrir son compost dans le but de le commercialiser (Annexe B, Figure 24).



Figure 2 - Litière compostée

Une raclette est installée dans la zone annexe à l'allée d'alimentation (Figure 3; Annexe B, Figure 25) et passe deux fois par jour. Le dessous de la raclette est chauffé par un système de géothermie (Annexe B, Figure 26) qui est installé à l'extérieur du bâtiment dans un champ de foin.



Figure 3 - Allée d'alimentation

3.2 Ferme Dubois C.R.A.R Inc.

La deuxième ferme visitée durant la journée du 18 octobre 2019 est située dans la région de Plessisville. Cette serre-étable contient un total de 140 vaches dont 60 en lactation et un taureau. Le bâtiment a été construit à l'été 2016 et l'élevage est biologique depuis 1968. Les vaches ont accès aux pâturages l'été et restent à l'intérieur l'hiver. Cette serre-étable est vraiment de type serre (Figure 4), c'est-à-dire que la structure est complètement faite en polyéthylène transparent double épaisseur comme dans les serres tunnels. En effet, de l'extérieur, le bâtiment ressemble à trois serres tunnels mises côte à côte ayant une superficie totale de 30,48 m x 62,18 m (100 pi x 204 pi).



Figure 4 - Aménagement intérieur

Le type de ventilation est naturel avec des panneaux latéraux ajustables ainsi que de petits ventilateurs et des ballons (Figure 27, Annexe B). Le producteur a lui aussi un système de gestion automatisée du climat. La température minimale enregistrée dans l'étable est de -3 °C. La luminosité de cette étable fonctionne sur un cycle plus naturel : à 8 h du matin, les lumières ferment ou un œil magique les ferme automatiquement. Il n'y a aucun éclairage artificiel dans la journée, seulement la luminosité naturelle passant à travers la serre. Les lumières se rallument de 16 h à 21 h et se ferment jusqu'au lever du soleil.

Le producteur utilise de la sciure de bois durant toute l'année pour créer sa litière compostée. Il remue celle-ci deux fois par jour, mais la vide seulement une fois par année. Il ajoute de la sciure de bois deux fois par semaine. Le producteur a indiqué vider moins souvent sa litière, car les vaches ont accès aux pâturages durant l'été.

Les vaches sont nourries de balles rondes sur des chariots dans la section bétonnée près des robots. La gestion des fumiers liquides se fait alors avec un tracteur (Annexe B, Figure 28) et non une raclette. Pour empêcher l'eau de geler, des tuyaux passent sous le béton en dessous de la litière compostée afin d'utiliser la chaleur produite par le compost.

3.3 Ferme Majestein Inc.

Cette ferme, située à St-Augustin-de-Desmaures, a été visitée par l'équipe le 24 octobre 2019. Ce bâtiment est de type aire de couchage sur litière compostée, mais avec une structure d'acier et un toit de tôle (Figure 5). Le nombre total de vaches dans le bâtiment lors de la visite était de 55 dont 47 en lactation. Ce bâtiment a été visité pour permettre à l'équipe de prendre des mesures pour différencier une étable de type conventionnel d'une serre-étable. Les dimensions du bâtiment sont de 21,95 m x 74,68 m (72 pi x 245 pi).



Figure 5 - Bâtiment vu de l'extérieur

La ventilation est de type naturel avec des toiles automatisées. Trois ventilateurs à débit élevé et à vitesse faible ainsi que six ventilateurs de types cheminées sont présents pour brasser l'air et diminuer l'humidité (Figure 6). Le contrôle du climat est automatisé grâce à un système Maximus (Annexe B, Figure 29) et une station météo. La température minimale atteinte a été de -1 °C.



Figure 6 - Toiles, ouvertures d'entrée d'air, ventilateurs à débit élevé et à vitesse faible et vaches en gestation

L'éclairage de ce bâtiment fonctionne grâce à 18 lumières DEL qui sont fermées de 21h20 à 5h20.

En ce qui concerne la litière compostée, le producteur a essayé diverses litières à cause des prix élevés et de la disponibilité de la sciure de bois. Il utilise de la sciure de bois franc recyclé et affirme avoir un aussi bon compostage qu'avec de la sciure de bois traditionnel (Annexe B, Figure 30). La litière est aussi mélangée deux fois par jour et il en rajoute tous les 15 jours durant l'été et aux semaines durant l'hiver. Le producteur fait fonctionner ses ventilateurs en permanence pour réduire l'humidité produite par la litière. Il vide sa litière une fois par année.

Une raclette est installée dans la zone d'alimentation et passe aux deux heures (Annexe B, Figure 31). L'alimentation en eau passe au centre du bâtiment en dessous de la litière compostée pour éviter qu'elle ne gèle.

4. Aménagement

4.1 Objectifs

Tout calcul de dimensionnement d'éléments structuraux demande la connaissance des dimensions complètes du bâtiment. Ainsi, la disposition des différentes portions composant l'étable conventionnelle et la serre-étable doivent être déterminées, de même que les dimensions de celles-ci.

4.2 Informations utiles

4.2.1 Aménagement des logettes de l'étable conventionnelle

Il est important que les animaux aient suffisamment d'espace dans la stalle pour pouvoir se lever, se reposer et se coucher. Lorsque les vaches se lèvent, elles font un mouvement brusque vers l'avant, ce transfert de poids leur permet de lever leur arrière-train plus facilement. Il est donc primordial que l'aménagement de la stalle permette à celles-ci de faire ce mouvement (MAAARO, 2019a). Le Tableau 3 présente les recommandations des dimensions des différentes sections composant une logette.

Tableau 3 - Dimensions recommandées pour les logettes en stabulation libre (Adapté de VALACTA, 2014)

Numérotation des sections	Sections	Dimensions recommandées (po)
A	Longueur totale (face à un mur)	2 x HH
B	Longueur totale (tête-à-tête)	1,8 x HH
C	Longueur de la plateforme	1,2 x HH
D	Hauteur barre ajustable	0,83 x HH
E	Distance barre ajustable	1,2 x HH - 2
F	Hauteur bordure d'arrêt	≤ 4
G	Hauteur courroie restriction	0,6 - 0,7 x HH
H	Hauteur de la plateforme	≤ 8
I	Espace division - allée	12 -14
	Largeur de la logette	2 x LH

HH = Hauteur aux hanches

LH = Largeur aux hanches

La Figure 7 exprime les sections du Tableau 3.

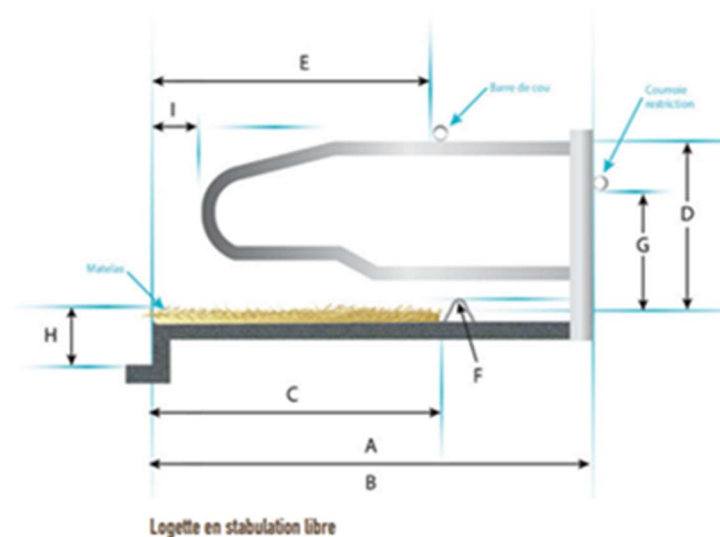


Figure 7 - Dimensions recommandées pour les logettes en stabulation libre (Tirée de VALACTA, 2014)

Il y a également des dimensions recommandées pour les allées d'alimentation des troupeaux en stabulation libre.

Tableau 4 - Dimensions recommandées pour l'espace à la mangeoire (CNSAE, 2009)

Sections	Dimensions
Espace linéaire à la mangeoire par vache adulte en lactation (po)	24
Largeur minimale des allées donnant sur les mangeoires (pi)	14

Les cloisons de la stalle doivent être assez espacées pour ne pas blesser ni gêner la vache. Une stalle assez longue et assez large permettra à la vache de se coucher dans la bonne position et améliorera la propreté de la stalle face aux déjections. Les cloisons suspendues ou en porte-à-faux conviennent mieux que les autres à l'installation et à l'entretien des nouveaux tapis-plancher et matelas (MAAARO, 2019a).

La bordure arrière d'une hauteur de 203 à 305 mm (8 à 12 po; MAAARO, 2019a) est idéale. Si elle est moins élevée, le fumier dans l'allée sera entraîné dans les logettes alors qu'une bordure arrière

d'une hauteur plus importante provoquera le salissage des trayons des vaches, augmentant ainsi les chances de mammites.

Les logettes sont recouvertes de litière ou d'un revêtement spécial. Les litières les plus communément utilisées sont la paille, le bran de scie ou les copeaux de bois. L'utilisation de litière comporte plusieurs difficultés, dont le maintien uniforme de celle-ci, le prix élevé dû au renouvellement et l'incompatibilité avec le traitement de fumier à la ferme (MAAARO, 2019a). La sciure de bois est aussi utilisée pour la combustion de biomasse. Il y a donc possibilité que de la compétition entre les acheteurs de sciure de bois comme intrant pour la combustion et pour utilisation à des fins de litière soit créée (MAAARO, 2018). Les producteurs doivent donc s'assurer d'avoir un approvisionnement régulier et être informés que cette compétition peut faire augmenter les prix de la sciure de bois à certain moment de l'année. La litière à ajouter en stabulation libre sur logettes est d'environ 1 kg/tête/jour (GODBOUT, 2017).

Les matelas sont des recouvrements qui offrent une bonne traction ainsi que du confort aux vaches. Ils sont souvent composés de caoutchouc déchiqueté provenant de pneus recyclés en raison du faible coût, de la souplesse et de la disponibilité de ce produit (MAAARO, 2019a). Les matelas peuvent être fabriqués par les producteurs ou achetés directement chez un fournisseur spécialisé. Cette seconde option, qui s'avère plus dispendieuse, a les avantages de ne pas se déplacer ni de se tasser et est facile à installer (MAAARO, 2019a). De la litière doit tout de même être présente sur les matelas afin de garder la logette sèche.

Les vaches n'étant pas toujours dans leurs logettes, elles circulent sur des planchers de béton. Ceux-ci doivent être munis d'une surface rugueuse pour éviter que les vaches glissent tout en étant suffisamment lisses pour que le nettoyage se fasse facilement. Pour augmenter la traction, des surfaces texturées ou rainurées sont utilisées. Les rainures ont habituellement entre 10 à 13 mm (0,375 à 0,5 po) de profondeur, 13 à 25 mm (0,5 à 1 po) de largeur et sont distantes de 102 à 204 mm (4 à 8 po) les unes des autres (MAAARO, 2019a).

4.2.2 Aménagement de l'aire de couchage de la serre-étable

Selon MAAARO (2018), les vaches laitières doivent disposer de 14 m² (150 pi²) d'espace par vache. Les vaches ont donc accès à un grand parc qui leur permet de se promener librement et de se

coucher dans la position de leur choix. Le parc est adjacent à la raclette permettant de ramasser les excréments qui sont produits lorsque les animaux se nourrissent à l'allée d'alimentation. La Figure 11 présente l'aménagement de la serre-étable.

4.2.3 Laiterie pour une étable comportant un robot de traite

La laiterie est un local qui contient tout l'équipement laitier indispensable à l'entreposage et à la réfrigération du lait, notamment un réservoir à lait, un système de refroidissement pour le lait, une pompe à eau chaude et un espace pour la désinfection et le lavage du réservoir à lait. La taille recommandée pour une laiterie d'environ 99 vaches en lactation est de 7,2 m (23 pi 7 po) de largeur par 9 m (29 pi 6 po) de longueur (DUSSAULT ET AL., 2005).

4.3 Plans d'aménagement intérieur

4.3.1 Aménagement du bâtiment conventionnel

Plusieurs arrangements sont possibles au niveau de la disposition intérieure des éléments d'une étable. Les types de stabulation, de litière et le système de traite utilisés sont tous des facteurs qui influencent le choix de l'aménagement intérieur d'une étable laitière (MAAARO, 2019b). Différents agencements des éléments nécessaires ont été considérés. Rappelons que les plans produits considèrent 100 vaches en lactation.

Tout d'abord, une étable à deux rangées de logettes tête-à-tête a été examinée. Les deux robots de traite nécessaires sont positionnés au centre du bâtiment et les fonctionnalités, telles que la laiterie et la salle mécanique, sont situées dans une extension sur le côté long du bâtiment. La Figure 8 présente cette disposition possible. Ce schéma est basé sur un plan du Département du génie agricole et biologique de l'Université d'État de Pennsylvanie (PENN STATE, 2019a). À première vue, cet aménagement fait environ 19,5 m par 93,8 m (64 pi x 308 pi) pour la section qui loge les vaches en plus de l'entrée, de la laiterie et de la salle mécanique. La ventilation naturelle étant utilisée pour ce bâtiment, le vent ne doit pas rencontrer d'obstacles afin de ne pas nuire à l'efficacité de la ventilation. Le positionnement de l'entrée, de la laiterie et de la salle mécanique pourrait restreindre la qualité de la prise d'air selon l'orientation des vents. Cet aménagement n'est donc pas retenu.

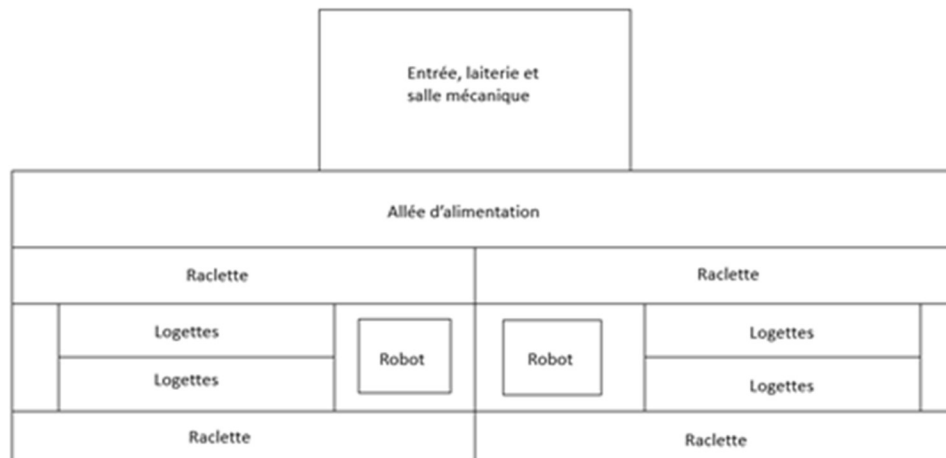


Figure 8 - Premier aménagement intérieur considéré

Ensuite, une étable à trois rangées de logettes a été prise en considération. Cette disposition est également basée sur un plan de l'Université d'État de Pennsylvanie (PENN STATE, 2019b). Des aires destinées aux vaches se trouvent de chaque côté de l'allée d'alimentation située au centre du bâtiment. Les deux robots de traite sont placés à l'extrémité de chacun des parcs. La laiterie et la salle mécanique peuvent donc être positionnées sur le même axe que le reste du bâtiment et n'interfèrent pas avec le type de ventilation utilisé. Le deuxième aménagement considéré possède des dimensions d'environ 42,6 m x 47,5 m (140 pi x 156 pi).

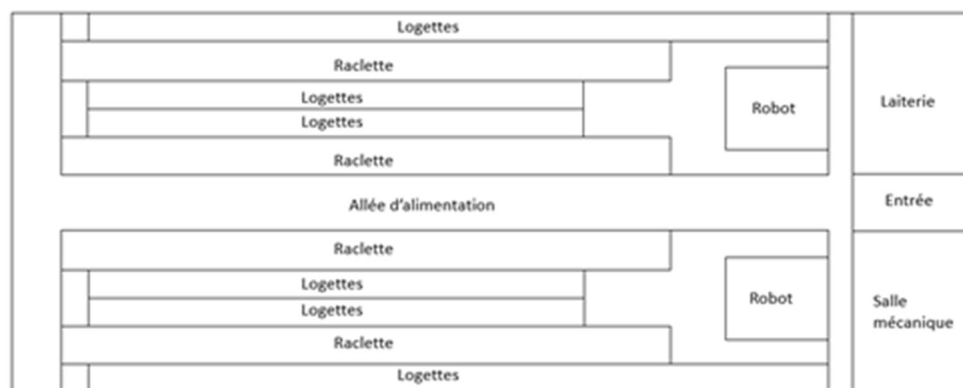


Figure 9 - Deuxième aménagement intérieur considéré

Finalement, une dernière possibilité a été étudiée. Cette disposition est similaire à la précédente, mais seulement deux rangées de logettes tête-à-tête sont utilisées. Les robots de traite sont situés à proximité de la laiterie et de la salle mécanique. Ces fonctionnalités sont positionnées à une

extrémité longitudinale du bâtiment. Ce schéma se base, encore une fois, sur un plan proposé par l'Université d'État de Pennsylvanie (PENN STATE, 2019c). Dans cette option, les dimensions extérieures de l'étable sont d'environ 36,6 m x 60,9 m (120 pi x 200 pi).



Figure 10 - Troisième aménagement intérieur considéré

Le dernier aménagement présenté comporte certains avantages comparativement à la seconde disposition présentée. Les étables à deux rangées de logettes sont réputées pour maximiser l'espace linéaire à la mangeoire. De plus, grâce à cette configuration, aucune logette ne se trouve adossée à un mur extérieur où les courants d'air, la pluie et la neige entrant par les ouvertures pour la ventilation naturelle peuvent gêner les vaches (MAAARO, 2019b). L'aménagement intérieur de l'étable sera donc de deux rangées de logettes tête-à-tête de part et d'autre de l'allée d'alimentation centrale, telle que présentée à la Figure 10.

4.3.2 Aménagement de la serre-étable

La serre-étable comporte une grande aire de couchage sur litière compostée. L'aménagement intérieur de cette étable se base sur celle de la Ferme Rodajean Inc. La Figure 11 présente l'aménagement intérieur pour la serre-étable vue de dessus. Des passages permettent de se rendre aux robots de traite. Ces passages sont situés au-dessus de la raclette et sont réservés pour le producteur. Cet aménagement procure à la serre-étable des dimensions de 30,5 m x 91,4 m (100 pi x 300 pi).

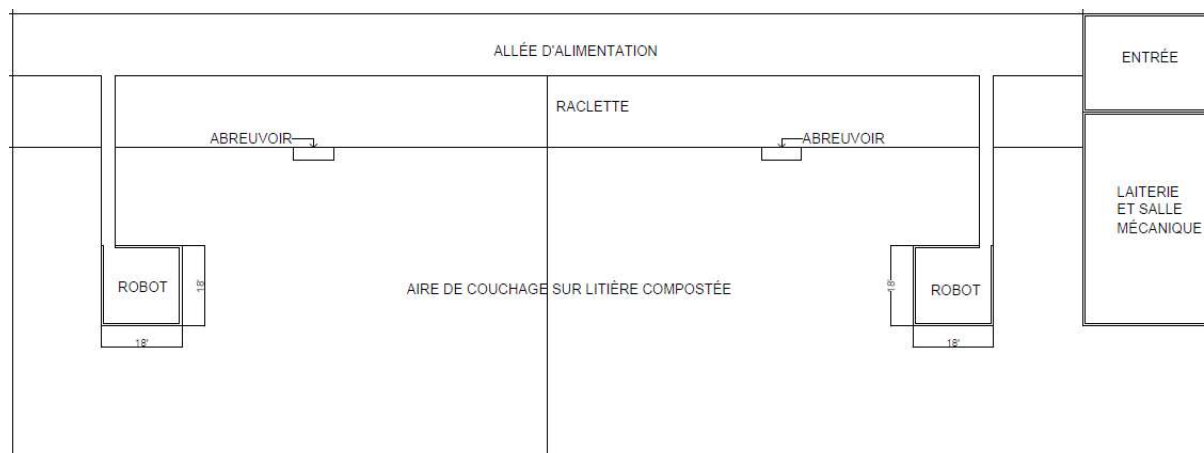


Figure 11 - Aménagement intérieur de la serre-étable

5. Conception des étables

5.1 Objectifs

La conception des étables consiste en la détermination des éléments structuraux nécessaires afin de supporter les charges qui seront appliquées sur le bâtiment.

5.2 Informations utiles

5.2.1 Principe de ventilation naturelle

À la base, la ventilation naturelle ne comprend pas de système mécanique pour créer un mouvement d'air. L'énergie cinétique initiale provient du vent et aussi de l'effet cheminée créé par la différence de densité entre l'air intérieur (chaud) et extérieur (froid). Ceci crée un mouvement ascendant vers l'ouverture faîtière. Ce mouvement est accentué lorsque la différence de température est élevée, donc lors de temps froids. Initialement, l'air entre par le côté où les vents soufflent pour ensuite sortir du côté opposé et par les cheminées aménagées dans le toit du bâtiment (DAIRYLAND INITIATIVE, 2019a).

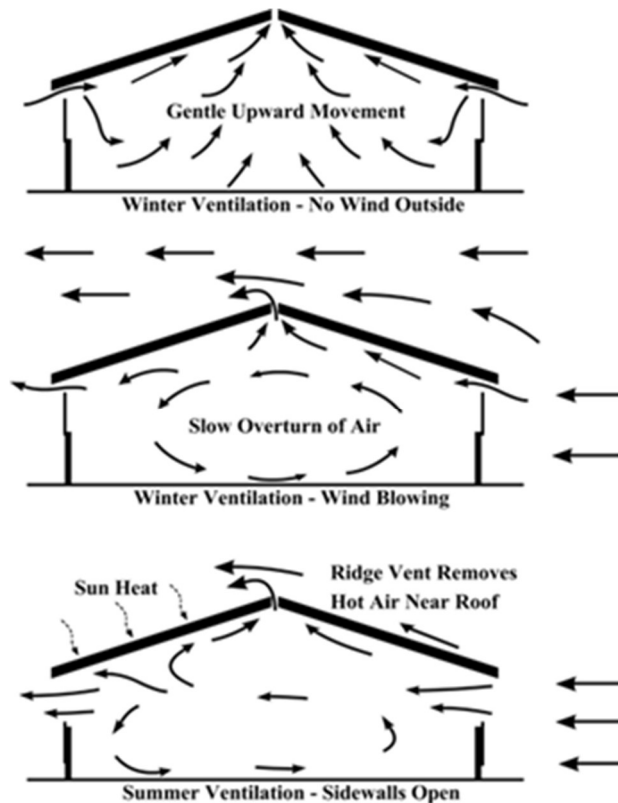


Figure 12 - Mouvement d'air en ventilation naturelle selon plusieurs conditions météorologiques extérieures différentes (Tirée de DAIRYLAND INITIATIVE, 2019a)

Une hauteur d'ouverture latérale adéquate se situe entre 3,66 mètres (12 pi) et 4,27 mètres (14 pi). Une hauteur supérieure à 4,88 mètres (16 pi) n'augmente pas de façon significative la qualité de l'air intérieur (GRAVES, 2016). La vitesse d'entrée d'air dépend évidemment de la force du vent, mais aussi des dimensions des ouvertures latérales et supérieures du bâtiment, de l'orientation du bâtiment et des obstructions alentour du bâtiment (GRAVES, 2016). Généralement, en Amérique du Nord, les bâtiments d'élevage voulant profiter des vents dominants doivent être orientés d'est en ouest. Les vents dominants proviennent principalement du sud-ouest. Dépendamment des conditions météorologiques extérieures, trois approches différentes de ventilation sont préconisées :

- 1) En temps chauds (été), la vitesse et le débit d'air sont maximisés pour réduire le plus possible la chaleur corporelle des vaches ;
- 2) Lors de températures froides (hiver), la valeur acceptable minimale de vitesse est ciblée pour réduire l'humidité tout en minimisant les entrées d'air froid ;

- 3) Pour des températures moyennes, un compromis entre les deux approches précédentes est à préconiser.

Les ouvertures en ventilation naturelle peuvent être de plusieurs sortes. Elles peuvent être composées de toiles simples, de toiles soufflées et de panneaux rigides isolés (VENTEC, 2019a). Les toiles simples ne sont constituées que d'une épaisseur de toile et ne sont pas très adaptées aux climats québécois. Les toiles soufflées sont composées de deux épaisseurs de toile claire entre lesquelles de l'air est soufflé. Cette couche d'air permet d'avoir une certaine isolation et contribue à garder la chaleur produite par les animaux à l'intérieur du bâtiment. C'est le type d'ouverture qui permet la plus grande entrée de luminosité lorsque les toiles sont fermées et qui présente les plus grandes ouvertures (VENTEC, 2019a; IEL, 2019). Finalement, les panneaux isolés présentent également une bonne alternative avec les toiles soufflées. L'isolation confère du confort aux vaches lors des périodes de grands froids. Les panneaux sont également lavables facilement. L'aire d'ouverture est toutefois moindre que celle des toiles soufflées (VENTEC, 2019a). Selon HOLMES ET AL. (2013), le système d'entrée d'air à prioriser est celui qui procure les plus grandes ouvertures.

5.2.2 Ouvrages spécialisés nécessaires pour la conception des bâtiments agricoles

Le design de tout bâtiment nécessite le respect de certaines normes établies par le gouvernement. Les deux codes principaux concernant les bâtiments agricoles sont le Code national du bâtiment (CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES DU CANADA, 2015) et le Code national de construction de bâtiment agricole (CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES DU CANADA, 2011). Le CNB s'applique pour des bâtiments de type résidentiel, commercial ou industriel alors que le CNCBA inclut les particularités associées aux bâtiments agricoles. Ces deux codes incluent d'autres normes, telles que la norme CSA O.86, soit la Règle de calcul de structure en bois (CONSEIL CANADIEN DU BOIS, 2019), la norme CSA A23.3, soit le Calcul des ouvrages de béton (ASSOCIATION CANADIENNE DU CIMENT, 2019) ainsi que la norme CSA S.16, soit la Règle de calcul de structure d'acier (CONSEIL CANADIEN DES NORMES, 2015). Le WDM, soit le Wood Design Manual (CONSEIL CANADIEN DU BOIS, 2017) sera également utilisé comme référence pour les calculs de structure en bois. Tout ingénieur devant effectuer des calculs de structures de bâtiments doit suivre et respecter ces normes selon les règles de l'art sous peine de sanctions.

5.2.3 Dimensionnement du bâtiment conventionnel

L'étable conventionnelle doit permettre de loger 100 vaches en lactation, le système de traite associé à ce troupeau ainsi que les facilités liées à l'entreposage du lait. Les dimensions totales du bâtiment sont déterminées en fonction de l'espace occupé par les différentes sections composant l'étable.

La superficie dédiée aux logettes ainsi que la largeur de l'allée d'alimentation se basent sur les dimensions recommandées. La largeur des raclettes vient du modèle choisi, modèle qui est typique des étables laitières en stabulation libre. L'aire d'occupation de la laiterie a été ajustée en se basant sur ce qui est proposé dans la littérature. Le Tableau 5 présente les dimensions intérieures des différentes sections de l'étable conventionnelle. Le domaine de la construction utilisant encore le système de mesure impérial, les dimensions utilisées pour le dimensionnement sont des mesures en pieds et en pouces.

Tableau 5 - Dimensions intérieures des sections de l'étable conventionnelle

Section	Largeur		Longueur	
	m	pi	m	pi
Logette	1,32	4,33	2,74	9
Allée d'alimentation	6,09	20	41,45	136
Raclette	4,88	16	41,45	136
Laiterie	9,14	30	15,24	50

La Figure 13 est la vue de dessus de l'aménagement intérieur du bâtiment conventionnel avec les côtes de mesure et les axes.

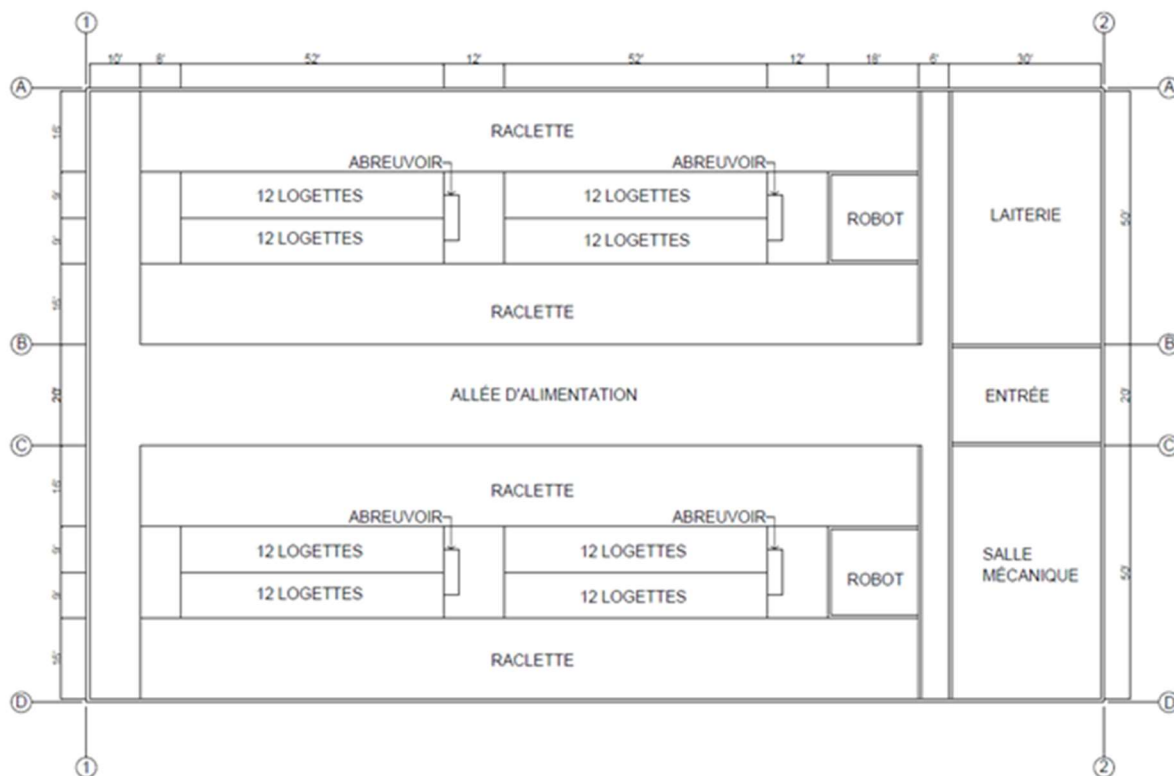


Figure 13 - Vue de dessus de l'aménagement intérieur de l'étable conventionnelle

L'étable conventionnelle comprend 96 logettes pour 100 vaches. Dans un souci d'uniformité, il a été admis que ce ne sont pas toutes les vaches qui sont en période de repos en même temps.

5.2.4 Dimensionnement de la serre-étable

Les dimensions de la serre-étable se basent sur celles de la Ferme Rodajean Inc. La superficie a été doublée afin de permettre de loger 100 vaches en lactation.

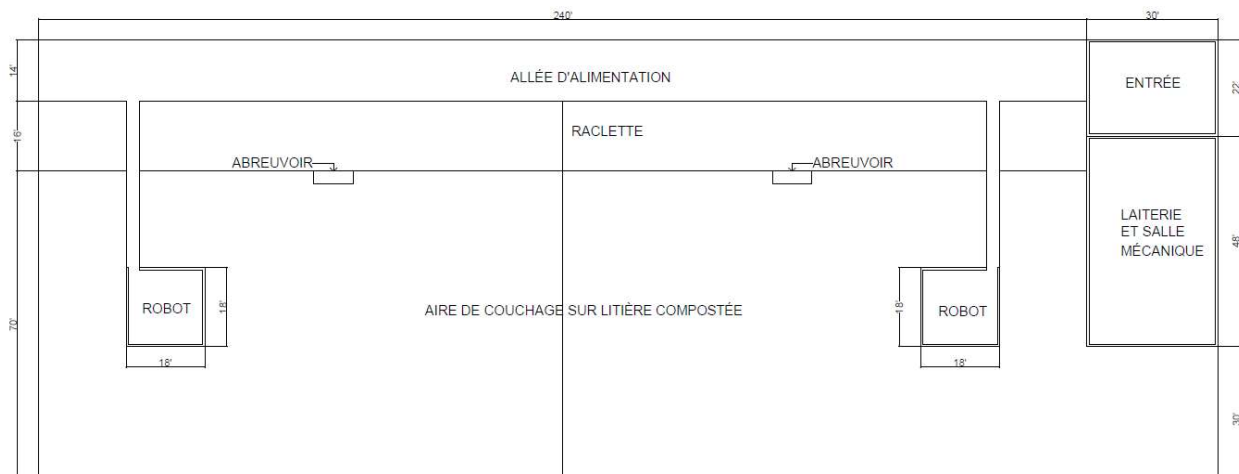


Figure 14 - Vue de dessus de l'aménagement intérieur de la serre-étable

5.3 Calculs de structure pour l'étable conventionnelle

La partie sur la structure de l'étable conventionnelle est divisée en plusieurs sections. Le calcul des charges est la première étape du dimensionnement des éléments structuraux d'un bâtiment. Le calcul des charges se base sur le CNCBA 1995 et sur le CNBC 2010.

Les dimensions d'un bâtiment ont un impact sur la structure de celui-ci. La largeur du bâtiment est de 36,58 m (120 pi) avec des corniches de 0,61 m (2 pi), ce qui fait une largeur totale de 37,80 m (124 pi). L'étable a une longueur de 60,96 m (200 pi) avec des corniches de 0,61 m (2 pi) également. La longueur totale est donc de 62,18 m (204 pi). Le toit a une pente extérieure de 4 : 12, ce qui équivaut à $18,43^\circ$ et une pente intérieure de 1,5 : 12, soit $7,13^\circ$. Les murs ont une hauteur totale de 3,66 m (12 pi), ce qui comprend 0,91 m (3 pi) de béton et 2,74 m (9 pi) de mur en bois.

5.3.1 Dimensionnement du système de ventilation du bâtiment conventionnel

L'étable conventionnelle est munie d'un système de ventilation naturelle. Le dimensionnement des ouvertures est réalisé pour les conditions estivales propres à la région où se situe le bâtiment. En période hivernale, l'ouverture des volets est ajustée. Le design se base sur les conditions en période chaude puisque c'est cette période qui est plus exigeante sur les besoins en ventilation.

Les ouvertures murales s'étendent sur toute la longueur de l'aire de vie des vaches laitières, incluant la section du robot de traite.

L'amplitude d'ouverture des entrées d'air longitudinales du système de ventilation naturelle doit pouvoir varier selon le degré de ventilation désiré. En période estivale, il est recommandé qu'au minimum la moitié de la hauteur totale des entrées d'air soit ouverte de manière constante. Afin de répondre aux demandes plus élevées en ventilation, les ouvertures occupent généralement toute la hauteur des murs longitudinaux et sur toute la longueur de l'aire habitable par les vaches (DAIRYLAND INITIATIVE, 2019a)

Le nombre de cheminées est déterminé selon les dimensions du bâtiment ainsi que des cheminées de plafond utilisées (CHOINIÈRE, 1994). L'espace occupé par les cheminées de plafond a été déterminé à partir d'un espacement standard (0,6 m (2 pi)) des fermes de toit (SERVICE DE PLANS CANADA, 1983). Le Tableau 6 présente les résultats obtenus pour les cheminées de ventilation.

Tableau 6 - Résultats du calcul du système de ventilation naturelle pour les cheminées de ventilation (Calculé à partir de CHOINIÈRE, 1994)

Total des ouvertures des cheminées (m ²)	3
Nombre de cheminées	10
Distance entre les cheminées (m)	5,60

Les ouvertures du système de ventilation naturelle pour le bâtiment conventionnel seront composées de toiles soufflées isolées. Les toiles soufflées isolées ont été préférées aux panneaux rigides isolés et au système de ballons conventionnels contrôlé par soufflerie pour leur grande variabilité d'ouverture, leur système de levage simple ainsi que leur faible risque de panne de fonctionnement lorsque l'isolation est nécessaire.

5.3.2 Calculs des charges

Les charges à prendre en considération sont les charges mortes, les charges de neige et les charges de vent. Certaines particularités s'appliquent aux bâtiments en agriculture. Le fait que les bâtiments agricoles n'ont qu'une faible occupation humaine implique que la catégorie à utiliser est celle de risque faible. Cela permet de réduire les charges de neige et de vent. Les charges mortes constituent

le poids des différents matériaux utilisés dans la composition des murs et de la toiture. Le Tableau 7 présente les charges mortes pour les murs, le toit, les murs de fondation et la semelle.

**Tableau 7 - Charges mortes à utiliser pour le dimensionnement des éléments structuraux
(Calculé à partir du CNBC 2010)**

Composantes	Valeurs des charges mortes (kPa)
Toit	0,76
Mur	0,38
Mur de fondation	4,80
Semelle	5,97

Les charges de neige et de vent dépendent de la ville où est situé le bâtiment. La ville de Joliette, dans la région de Lanaudière, a été choisie puisque c'est la ville la plus près des bureaux des Industries Harnois Inc. Les données climatiques permettent d'obtenir les charges de neige pour des périodes critiques, soient 10 ans ou 50 ans, qui sont à combiner avec d'autres facteurs. La géométrie du toit a également un impact. Dans ce cas-ci, le toit est à deux versants.

La charge spécifiée due à la neige est calculée selon l'Équation 1 (CODE NATIONAL DU BÂTIMENT, 2015).

$$S = I_s[S_s(C_b C_w C_s C_a) + S_r] \quad [\text{Équation 1}]$$

Où:

- S = Charge spécifiée due à la neige (kPa)
- I_s = Coefficient de risque de la charge due à la neige
- S_s = Charge de neige au sol susceptible d'être égalée ou dépassée une fois en 50 ans (kPa)
- S_r = Charge correspondante due à la pluie susceptible d'être égalée ou dépassée une fois en 50 ans (kPa)
- C_w = Coefficient d'exposition au vent
- C_b = Coefficient de charge de neige sur le toit
- C_s = Coefficient de pente
- C_a = Coefficient d'accumulation

La neige provoque un cas balancé (cas I) et un cas débalancé (cas II). Le cas le plus critique est celui qui sera utilisé pour le dimensionnement des éléments structuraux.

Tableau 8 - Charges de neige non pondérées (Calculé à partir du CNBC 2010)

Cas	Valeurs des charges de neige (kPa)
Balancé (cas I)	2,88
Débalancé (cas II)	3,31

En ce qui concerne les charges causées par le vent, la pression spécifiée se calcule selon l'Équation 2 (CODE NATIONAL DU BÂTIMENT, 2015).

$$p = I_w q C_e C_t C_g C_p \quad [\text{Équation 2}]$$

Où :

- p = Pression spécifiée (kPa)
- I_w = Coefficient de risque pour la charge due au vent
- q = Pression dynamique de référence (kPa)
- C_e = Coefficient d'exposition
- C_t = Coefficient de topographie
- C_g = Coefficient de rafale
- C_p = Coefficient de pression

Les charges de vent sont calculées selon les pressions extérieures et intérieures exercées par le vent sur le toit et les murs. Le Tableau 9 présente les cas critiques pour le toit et pour les murs.

Tableau 9 - Charges de vent non pondérées (Calculé à partir du CNBC 2010)

Sections	Charges de vent (kPa)
Toit	0,618
Murs	1,024

Les charges présentées aux Tableaux 8 et 9 ne sont pas pondérées pour un facteur de risque selon la nature de la charge (neige ou vent) ainsi que de l'état limite de chargement (ultime ou en service).

Les charges de neige comportent un facteur de risque de 0,8 à l'ultime et 0,9 en service. Les charges de vent ont un facteur de risque de 0,8 à l'ultime et 0,75 en service.

5.3.3 Combinaison de charges

Les charges déterminées précédemment sont agencées selon plusieurs combinaisons afin de prendre en compte les charges qui s'appliquent simultanément sur la structure du bâtiment (CONSEIL CANADIEN DU BOIS, 2017). Les combinaisons de charges les plus conservatrices permettent de dimensionner les éléments structuraux selon le pire cas de chargement possible. Les combinaisons de charges qui constituent les pires cas pour l'état limite ultime (ELU) et l'état limite en service (ELS) sont présentées aux Tableaux 10 et 11 respectivement.

Tableau 10 - Combinaisons de charges critiques – ELU (Calculé à partir du CNBC 2010)

Condition	Charges principales	
	Combinaison	Résultats (kPa)
3a	$1.25D + 1.5S$	5,39
3c	$1.25D + 1.5S + 0.4W_{\text{vert.}}$	5,59
	$0.4W_{\text{horiz.}}$	0,33
4e	$1.25D + 1.4W_{\text{vert.}} + 0,5S$	3,43
	$1.4W_{\text{horiz.}}$	1,15

Tableau 11 - Combinaisons de charges critiques – ELS (Calculé à partir du CNBC 2010)

Condition	Charges principales	
	Combinaison	Résultats (kPa)
3a	$1.0D + 1.0S$	4,11
3d	$1.0D + 1.0S + 0.4W_{\text{vert.}}$	4,58
	$0.4W_{\text{horiz.}}$	0,31
4e	$1.0D + 1.0W_{\text{vert.}} + 0,5S$	3,09
	$1.0W_{\text{horiz.}}$	0,77

5.3.4 Axes porteurs et largeurs tributaires

Les charges sont réparties sur des axes porteurs identifiés à la Figure 13. Les axes qui sont porteurs sont les murs ou les supports qui soutiennent la structure. Ils sont conçus de manière à supporter une autre charge en plus de leur propre charge. Le Tableau 12 présente les largeurs tributaires pour chacun des axes.

Tableau 12 - Largeurs tributaires pour chaque axe porteur

Axe porteur	Largeur tributaire (m)
A	8,2
B	10,7
C	10,7
D	8,2
1	0,9
2	0,9

L'axe A supporte les charges sur la moitié de la largeur horizontale entre cet axe et l'axe B. De plus, les charges appliquées sur la corniche longitudinale du bâtiment se déchargent également sur l'axe A. L'axe B reprend les charges sur la moitié de la distance entre l'axe A et l'axe B, de même que les charges sur la moitié de la distance entre l'axe B et l'axe C. Le même principe s'applique pour les axes porteurs C et D. Les axes 1 et 2 reprennent les charges appliquées sur les corniches transversales ainsi que les charges qui s'appliquent sur la moitié de l'espacement (0,61 m) entre deux fermes de toit.

5.3.5 Fermes de toit

Les fermes de toit sont des éléments importants de toute construction. Les charges de neige et de vent s'appuient directement sur les fermes de toit. Dans le cas de l'étable conventionnelle, les fermes de toit sont de type cathédral afin de permettre d'avoir un grand volume d'air à l'intérieur du bâtiment, volume d'air qui est nécessaire pour l'efficacité de la ventilation naturelle. Les fermes de toit possèdent une pente extérieure de $18,43^\circ$ (4 : 12) et une pente intérieure de $7,13^\circ$ (1,5 : 12). Ces éléments sont complexes et sont généralement conçus par le fabricant. Dans le cadre de ce projet, les fermes de toit ne seront pas dimensionnées.

5.3.6 Colombages

Les colombages constituent le support principal des murs. Ils reprennent les charges provenant du toit de même que les charges occasionnées par le vent. Les charges reprises par les colombages dépendent de la largeur tributaire associée à chaque axe. La résistance des colombages est vérifiée en flexion et en cisaillement. Trois combinaisons de charge selon l'état limite ultime (ELU) sont

utilisées pour effectuer ces vérifications. La résistance en compression est calculée selon l'Équation 3 (WDM, 2017, CSA O86 section 6.5.6.2.3).

$$P_r = \Phi F_c A K_{ZC} K_C \quad [\text{Équation 3}]$$

Où :

- P_r = résistance en compression parallèle aux grains (kN)
- Φ = résistance aux facteurs
- F_c = résistance spécifiée en compression parallèle aux grains (MPa)
- A = section en coupe transversale (mm²)
- K_{ZC} = facteur de taille en compression pour le bois scié
- K_C = facteur d'élancement pour les éléments en compression

La résistance à la flexion est calculée selon l'Équation 4 (WDM, 2017, CSA O86 section 6.5.4.1).

$$M_r = \Phi F_b S K_{Zb} K_L \quad [\text{Équation 4}]$$

Où :

- M_r = moment résistant en flexion (kN · m)
- Φ = résistance aux facteurs
- F_b = résistance spécifiée en flexion (MPa)
- S = module de section (mm²)
- K_{Zb} = facteur de taille en flexion
- K_L = facteur de stabilité latérale

La résistance en compression et la résistance à la flexion sont des facteurs qui interagissent. Ils doivent donc être combinés à des fins de vérification de la résistance. L'Équation 5 présente cette interaction (WDM, 2017, CSA O86 section 6.5.10).

$$\left(\frac{P_f}{P_r}\right)^2 + \frac{M_f}{M_r} \left[\frac{1}{1 - \frac{P_f}{P_E}} \right] \leq 1 \quad [\text{Équation 5}]$$

Où :

- P_f = charge axiale pondérée en compression (kN)
- P_r = résistance en compression parallèle aux grains (kN)
- M_f = moment de flexion (kN · m)

- M_r = moment résistant en flexion (kN · m)
- P_E = charge de flambement d'Euler dans le plan du moment appliqué (kN)

Finalement, la déflexion possible dans les colombages doit être évaluée. La flèche considère une excentricité afin d'être maximisée et elle est calculée en état limite de service (ELS). La déflexion maximale pouvant être atteinte dans les colombages est calculée selon l'Équation 6 (WDM, 2017, CSA O86 section 6.5.11.5).

$$\Delta L = \frac{5wl^4}{384EI} + \frac{Pel^2}{16E_s I} \leq \frac{L}{180} \quad [\text{Équation 6}]$$

Où :

- ΔL = déflexion (mm)
- w = charge uniformément répartie (kN/m²)
- l = espacement (mm)
- E = module d'élasticité (MPa)
- I = moment d'inertie (mm⁴)
- P = charge axiale pondérée en compression (kN)
- e = excentricité (mm)
- E_s = module d'élasticité pour les calculs de rigidité (MPa)
- L = longueur (mm)

5.3.7 Lisse basse

Les colombages sont appuyés sur une lisse basse, elle-même appuyée sur les fondations de béton. La résistance à l'appui doit être vérifiée afin de s'assurer que la lisse basse supportera les colombages. La formule à utiliser est présentée à l'Équation 7 (WDM, 2017, CSA O86 section 6.5.7.2).

$$Q_r = \Phi F_{cp} A_b K_B K_{Zcp} \geq P_f \quad [\text{Équation 7}]$$

Où:

- Q_r = résistance à la compression pondérée perpendiculaire aux grains (kN)
- Φ = résistance aux facteurs
- F_{cp} = résistance spécifiée en compression perpendiculaire aux grains (MPa)
- A_b = zone d'appui (mm²)

- K_B = longueur du facteur d'appui
- K_{Zcp} = facteur de taille pour la flexion
- P_f = charge axiale pondérée en compression (kN)

5.3.8 Linteaux, poteaux courts et poteaux longs

Les linteaux consistent en des poutres qui reprennent les charges appliquées sur la superficie complète d'une ouverture, ouverture au niveau de laquelle les colombages sont interrompus. Le linteau reprend la plus grande charge gravitaire. Le vent horizontal n'est donc pas pris en compte. La vérification des linteaux est faite avec la résistance à la flexion et la résistance au cisaillement. La résistance à la flexion est calculée à partir de l'Équation 4 alors que la résistance au cisaillement se base sur l'Équation 8 (WDM, 2017, CSA O86 section 6.5.5.2).

$$V_r = \Phi F_v \left(\frac{2}{3} \right) A_n K_{Zv} > V_f \quad [\text{Équation 8}]$$

Où :

- V_r = résistance au cisaillement pondéré (kN)
- Φ = résistance aux facteurs
- F_v = résistance spécifiée au cisaillement (MPa)
- A_n = surface nette en coupe (mm^2)
- K_{Zv} = facteur de taille pour le cisaillement du bois scié
- V_f = force de cisaillement pondérée (kN)

La résistance à l'appui se calcule encore à partir de l'Équation 6. Elle sert toutefois à déterminer combien de poteaux courts seront nécessaires pour supporter le linteau. La flèche est également vérifiée selon l'Équation 9 (WDM, 2017, CSA O86 section 6.5.11.5).

$$\Delta L = \frac{5wl^4}{384EI} \leq \frac{L}{180} \quad [\text{Équation 9}]$$

Où :

- ΔL = déflexion (mm)
- w = charge uniformément répartie (kN/m^2)
- l = espacement (mm)

- E = module d'élasticité (MPa)
- I = moment d'inertie (mm⁴)
- L = longueur (mm)

Les poteaux courts et les poteaux longs se calculent de la même façon qu'un colombage. Les charges qui s'appliquent sur chacun d'eux sont cependant différentes. Les poteaux courts reprennent les charges verticales provenant du linteau alors que les poteaux longs reprennent les charges de vent horizontal pour toute la surface de l'ouverture. De plus, la lisse basse déterminée pour les colombages doit également être en mesure de résister aux pressions causées par les poteaux courts et longs.

5.3.9 Poteaux d'acier

Étant donné les dimensions imposantes de l'étable conventionnelle et des ouvertures sur les murs longitudinaux pour la ventilation naturelle, des poteaux d'acier sont utilisés. Ceux-ci supportent les linteaux de bois nécessaires aux ouvertures pour la ventilation. Des poteaux d'acier sont utilisés puisque les dimensions des poteaux en bois requises étaient trop importantes. Les poteaux d'acier ont été dimensionnés selon des vérifications de leur résistance en compression et en flexion. Les Équations 10 et 11 présentent les calculs pour la résistance en compression et en flexion respectivement (CSA GROUP, 2014).

$$C_r = \left(\frac{\Phi A_y}{1 + \lambda^{2n}} \right)^{1/n} > V_f \quad [\text{Équation 10}]$$

Où :

- C_r = résistance à la compression pondérée (kN)
- A = section en coupe transversale (mm²)
- F_y = limite d'élasticité minimale spécifiée (MPa)
- λ = paramètre d'élancement
- n = constante
- V_f = force de cisaillement pondérée (kN)

$$M_r = \Phi Z F_y > M_f \quad [\text{Équation 11}]$$

Où :

- M_r = moment résistant en flexion ($\text{kN} \cdot \text{m}$)
- Φ = résistance aux facteurs
- Z = volume (mm^3)
- F_y = limite d'élasticité minimale spécifiée (MPa)
- M_f = moment de flexion ($\text{kN} \cdot \text{m}$)

5.3.10 Soulèvement

Les pressions ou suctions exercées par le vent sur l'enveloppe externe du bâtiment peuvent provoquer le soulèvement de celle-ci. Le soulèvement peut être amplifié avec un système de ventilation naturelle puisqu'une grande quantité d'air circule à l'intérieur de l'étable et se dirige vers les cheminées de plafond. La manière de fixer les poteaux d'acier au reste de la charpente doit donc être déterminée. Les poteaux d'acier doivent reprendre des forces de soulèvement selon la largeur tributaire de l'axe où ils se situent. Un assemblage adéquat est ensuite choisi à partir de catalogue de fournisseurs.

5.3.11 Béton intérieur

Les éléments de béton intérieur comprennent les semelles, les murs de fondation et les dalles pour les raclettes, les logettes, les allées de circulation et l'allée d'alimentation. Les éléments structuraux parmi ceux-ci sont dimensionnés selon les charges qu'ils doivent supporter ainsi que la capacité portante du sol pour les semelles. L'acier d'armature nécessaire dans les murs de fondation dépend de la dimension de ceux-ci. C'est l'acier dit minimal qui est retenu dans ces éléments. En ce qui concerne les semelles de fondation, les charges appliquées ainsi que la capacité portante du sol permettent de déterminer l'acier d'armature nécessaire dans ces éléments structuraux. Les semelles de fondation se situent aux axes A, D, 1 et 2 de la Figure 13. Afin d'être conservateur, une capacité portante faible (80 kPa) a été considérée pour le sol. Les dimensions de la semelle sont posées. La résistance à l'effort tranchant doit être vérifiée selon une rupture de type poutre et une rupture par poinçonnement. Une rupture de type poutre implique des fissurations inclinées dans la semelle et survient lorsque la semelle n'est pas suffisamment large pour reprendre les efforts. Une rupture par poinçonnement survient plutôt lorsque le poteau passe au travers de la

semelle. Les Équations 12 et 13 présentent, respectivement, les résistances à l'effort tranchant de type poutre et par poinçonnement (CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION, 2004).

$$V_r = 0,21\Phi_c\lambda\sqrt{f'_c b_o d_v} > V_f \quad [\text{Équation 12}]$$

Où :

- V_r = effort tranchant résistant (kN)
- Φ_c = coefficient de tenue du béton
- λ = constante
- f'_c = propriété de compression du béton (MPa)
- b_o = longueur ou largeur de l'élément de béton selon le cas (mm)
- d_v = distance pondérée entre le haut de l'élément de béton et le centre de l'acier d'armature (mm)
- V_f = effort tranchant appliqué (kN)

$$V_r = v_r b_o d > V_f \quad [\text{Équation 13}]$$

Où :

- V_r = effort tranchant résistant (kN)
- v_r = contrainte de cisaillement à la rupture (kN)
- b_o = longueur ou largeur de l'élément de béton selon le cas (mm)
- d = distance entre le haut de l'élément de béton et le centre de l'acier d'armature (mm)
- V_f = effort tranchant appliqué (kN)

Les fondations des axes B et C de la Figure 13 sont des pilastres, c'est-à-dire, des semelles ponctuelles sous les éléments structuraux. Les poteaux d'acier étant suffisamment espacés, il n'est pas avantageux de créer une semelle continue sur toute la longueur du bâtiment. Ainsi, le dimensionnement des pilastres s'effectue selon le même principe que les semelles de fondation, mais ils possèdent des dimensions finies dans les calculs.

En ce qui concerne les dalles, elles ne sont constituées que de béton et ne comportent pas d'acier d'armature. Une lame d'étanchéité ainsi que des goujons se retrouvent à la jonction entre des

éléments distincts de béton. La lame d'étanchéité empêche que des infiltrations de fumiers ou de lisiers parviennent à l'acier d'armature et ne les corrodent. Les goudjons jouent seulement un rôle de support de la lame d'étanchéité.

5.3.12 Contreventement

Les contreventements d'un bâtiment sont des composantes qui assurent la stabilité structurale d'un bâtiment. Ce sont des éléments structuraux plats qui contribuent à résister aux charges latérales de vent.

5.3.12.1 Diaphragme

Le diaphragme est le panneau structural qui recouvre le plafond. Il y a deux cas de vérifications possibles, soient lorsque la charge de vent est parallèle au bâtiment et lorsqu'elle est perpendiculaire à celui-ci. La détermination du type de bois, de l'épaisseur du panneau ainsi que le clouage ont été déterminés à l'aide du WDM. Des entremises sont nécessaires afin de permettre de clouer le panneau structural sur tout son pourtour là où il n'y a pas de colombages. Il est également à noter que l'épaisseur minimale pour que le diaphragme joue un rôle de pare-feu est de 12 mm. C'est ainsi l'épaisseur minimale considérée pour ce projet.

5.3.12.2 Mur de refend

Les murs de refend ont le même rôle que le diaphragme, mais au niveau des murs. La charge de vent appliquée sur un mur longitudinal se décharge sur les deux murs transversaux et vice-versa. Les deux cas doivent donc être vérifiés. Le WDM a été utilisé afin de dimensionner l'élément structural nécessaire à appliquer sur les murs. La condition sur la résistance pare-feu est la même que pour le diaphragme et des entremises sont nécessaires afin de fixer et de bloquer les panneaux structuraux. Ces éléments sont résumés au Tableau 13.

5.3.13 Éléments nécessaires pour l'étable conventionnelle

À la suite des calculs effectués pour le dimensionnement des éléments structuraux, les éléments requis pour la construction de l'étable conventionnelle sont résumés dans le Tableau 13.

Tableau 13 - Éléments structuraux et non structuraux composant l'étable conventionnelle

	Éléments	Pièces, dimensions et espacements
Bois - Murs et ouvertures	Colombages - tous les axes extérieurs	No.1/No.2 SPF, 38 mm x 140 mm x 400 mm c/c (2" x 6" @ 16" c/c)
	Lisse basse	MSR 2100F _b - 1,8
	Linteau - porte d'homme	No.1/No.2 SPF, 38 mm x 140 mm 2 plis (2" x 6")
	Linteau - porte de garage	No.1/No.2 SPF, 38 mm x 235 mm 2 plis (2" x 10")
	Linteau - ouverture entrée d'air	Parallam 2.0E, 133 mm x 406 mm (5,2" x 16")
	Linteau - axes intérieurs	Parallam 2.0E, 178 mm x 606 mm (7" x 23,9")
	Poteau court - porte d'homme	No.1/No.2 SPF, 38mm x 140 mm 1 pli (2" x 6")
	Poteau court - porte de garage	No.1/No.2 SPF, 38mm x 140 mm 1 pli (2" x 6")
	Poteau long - porte d'homme	No.1/No.2 SPF, 38mm x 140 mm 1 pli (2" x 6")
	Poteau long - porte de garage	No.1/No.2 SPF, 38mm x 140 mm 2 plis (2" x 6")
Contreventement	Diaphragme et murs de refend	OSB SPF 12mm d'épaisseur
		Clous : 57mm de longueur (2-1/4po), 2,52mm de diamètre, 150mm d'espacement extérieur et 300mm d'espacement intérieur
	Entremises	38mm x 140 mm (2" x 6")
Acier	Poteaux d'acier - axes extérieurs	102 mm x 102 mm x 4,8 mm d'épaisseur (4" x 4" x 3/16")
	Poteaux d'acier - axes intérieurs	102 mm x 102 mm x 9,5 mm d'épaisseur (4" x 4" x 1/4")
	Assemblage - axes extérieurs	Simpson strong-tie, CCQ64SDS2.5
	Assemblages - axes intérieurs	MiTek, CCQ7.1-4SDS2.5
	Plaque d'acier inférieur poteaux d'acier - axes intérieurs	Acier 350 W, 152,4 mm x 254 mm x 13,2 mm d'épaisseur (6" x 10" x 0,52")
	Plaque d'acier inférieur poteaux d'acier - axes extérieurs	Acier 350 W, 152,4 mm x 254 mm x 9 mm d'épaisseur (6" x 10" x 0,35")

Béton	Semelles de fondation	914,4 mm de largeur x 254 mm d'épaisseur (36" x 10")
	Murs de fondation	203,2 mm de largeur x 1219,2 mm d'hauteur (8" x 4')
	Pilastres	1422 mm de largeur x 2082 mm de longueur x 254 mm d'épaisseur (55,9" x 89,8" x 10")
	Murets intérieurs	203,2 mm de largeur x 660,4 mm d'hauteur (8" x 2'2")
Acier d'armature	Acier d'armature semelles de fondation	3 x 15M (largeur) et 15M @ 381 mm (15") c/c (longueur)
	Acier d'armature murs de fondation	15M @ 457,2 mm (18") c/c (2 directions)
	Acier d'armature pilastres	4 x 15M (largeur) et 6 x 15M (longueur)
	Acier d'armature murets intérieurs	15M @ 457,2 mm (18") c/c (2 directions)

5.4 Plans des étales

5.4.1 Plans de l'étable conventionnelle

Des plans de l'étable conventionnelle sont présentés à l'Annexe C. Des vues extérieures de chaque côté s'y retrouvent, de même que des plans de structure et de béton. Une coupe de mur présentant les matériaux utilisés est également exposée.

5.4.2 Plans de la serre-étable

Des plans fournis par Les Industries Harnois Inc. de la serre-étable de la Ferme Rodajean sont présentés à l'Annexe D. Bien que la serre-étable de ces plans ne permet de loger que 50 vaches en lactation, le principe de la structure d'acier est le même dans une serre-étable de plus grandes dimensions. Les plans présentent la structure d'acier ainsi que l'aménagement intérieur de l'étable.

6. Analyse économique

6.1 Objectif

L'objectif est de déterminer les coûts de construction pour un bâtiment conventionnel et une serre-étable qui loge le même nombre d'animaux.

6.2 Informations utiles

6.2.1 Matériaux de construction et autres équipements

Les coûts de construction de deux types de bâtiments dépendent principalement des matériaux qui composent la structure. Les compositions typiques pour les murs, les plafonds et les fondations pour les étables conventionnelles et les serre-étables sont présentées aux tableaux 14 à 16. Ces compositions ont été établies à la suite des différentes visites de bâtiment.

Tableau 14 - Composition type d'un mur d'une étable conventionnelle et d'une serre-étable

	Étable conventionnelle	Serre-étable
1	Contre-plaqué plastifié	Structure d'acier
2	Latte	Tôle
3	Pare-vapeur	
4	Colombage et isolation	
5	OSB	
6	Coupe-vent	
7	Latte	
8	Tôle	

Tableau 15 - Composition type d'un plafond d'une étable conventionnelle et d'une serre-étable

	Étable conventionnelle	Serre-étable
1	Contre-plaqué plastifié	Structure d'acier
2	Latte	Toit solaire
3	Pare-vapeur	
4	Ferme de toit et isolation	
5	OSB	
6	Latte	
7	Tôle	

Tableau 16 - Composition type d'une fondation d'une étable conventionnelle et d'une serre-étable

	Étable conventionnelle et serre-étable
1	Béton
2	Polystyrène expansé

Les murs extérieurs comportent des ouvertures longitudinales en guise d'entrée d'air pour le système de ventilation naturelle. Le toit comporte également des ouvertures, appelées cheminées.

Les tableaux ci-dessus montrent qu'une étable conventionnelle demande beaucoup plus de matériaux différents qu'une serre-étable. Ainsi, les coûts de construction d'une étable conventionnelle sont plus à risques de subir des variations à cause des fluctuations possibles des prix des différents matériaux utilisés.

Tous les matériaux utilisés pour la conception de l'étable conventionnelle ont été classés par fonction. Il est à noter qu'aucun coût de main-d'œuvre n'est inclus. De plus, les listes détaillées de tous les matériaux utilisés se retrouvent à l'Annexe E.

Tableau 17 - Coûts totaux des matériaux de l'étable conventionnelle

Fonctions	Coût total (\$)
Charpente en bois	49 040
Structure acier	28 800
Composante des murs	108 830
Toiture	184 200
Fondation	230 000
Autres	3970
Total	604 840

Le coût total des matériaux pour l'étable conventionnelle est de 604 840 \$. La superficie totale de celle-ci est de 2229,67 m² (24 000 pi²) ce qui donne un prix de 271 \$/m² (25 \$/pi²).

Les équipements d'alimentation et d'abreuvement des animaux ainsi que les divisions des enclos engendrent des coûts. Le modèle et la quantité de ces équipements dépendent du type d'étable et de régie qui est effectué. Puisque l'étable conventionnelle et la serre-étable comportent le même nombre d'animaux en lactation et la même méthode de traite, les coûts générés par le système complet de traite seront similaires.

Pour la construction de l'étable conventionnelle, les équipements principaux nécessaires ont été identifiés. À l'Annexe E, le Tableau 30 indique tous les équipements utilisés. Le Tableau 18 présente les frais des équipements par rapport aux coûts totaux associés.

Tableau 18 - Coûts totaux des équipements de l'étable conventionnelle

Fonctions	Coût total (\$)
Ventilation	59 790
Abreuvoirs et mangeoires	18 290
Logettes	51 840
Système de raclette	181 920
Robots de traite	501 200
Total	813 040

Le coût total des équipements pour l'étable conventionnelle est de 813 040 \$. Ceci représente un coût de 364 \$/m² (34 \$/pi²).

Les Industries Harnois Inc. a fourni les données suivantes concernant le coût des équipements intérieurs pour une serre-étable sur litière compostée contenant environ 60 vaches avec une superficie de 1393,55 m² (15 000 pi²).

Tableau 19 - Coûts totaux des équipements de la serre-étable par Les Industries Harnois Inc. pour 60 vaches en lactation

Fonctions	Coût total (\$)
Abreuvoirs et mangeoires	15 000
Système de raclette	40 000
Robots de traite	260 000
Géothermie	41 000
Mélangeur à aire de couchage	3000
Total	356 000

Les informations fournies par Les Industries Harnois Inc. ne comprennent pas la ventilation, mais permettent d'obtenir un prix de 255 \$/m² (24 \$/pi²).

6.2.1 Gestion des fumiers

La gestion des fumiers apporte certains coûts reliés aux structures d'entreposage des fumiers. Les deux bâtiments auront des structures qui permettent l'entreposage du fumier sous la forme dans laquelle il est géré (liquide et/ou solide). Ces coûts sont évalués à partir des dimensions des structures requises.

Une étable en stabulation libre à logettes implique une gestion liquide des fumiers. Un fumier liquide est produit dans la zone adjacente à l'allée d'alimentation ainsi que dans la section entre les rangées de logettes. Un système muni d'une racleuse faisant des passages de manière quotidienne pour enlever les déjections présentes sur le sol de béton dans cette section peut être utilisé. Les racleurs peuvent prendre des formes diverses avec des mécanismes qui varient légèrement selon les modèles. La largeur d'allée requise pour un grattoir droit varie de 1,83 m (6 pi) à 5,18m (17 pi) (GEA, 2019). Toutefois, il est aussi possible d'utiliser un tracteur muni d'une racleuse ou d'un chargeur à direction (OMAFRA, 2018). La litière souillée provenant des logettes est mélangée avec le fumier liquide et est acheminée dans la structure d'entreposage.

Les étables sur litière compostée obligent la gestion de deux sortes de fumier, soit le fumier liquide et le fumier solide. La portion liquide est ramassée par les raclettes dans la section adjacente à l'allée d'alimentation. Le fumier se trouvant dans l'aire de compostage est de type solide, car les déjections sont absorbées par la litière et incorporées dans celle-ci. Cette litière est vidée environ deux fois par année ou une fois par an minimalement. Il est important de ne jamais vider la totalité de la litière pour accélérer la vitesse de démarrage du compostage.

Le fumier provenant des entreprises agricoles est une source d'éléments fertilisants essentiels pour les sols. Toutefois, le climat québécois ne permet pas l'épandage des fumiers dans les champs à tout moment de l'année. Ils doivent donc être entreposés dans des structures spécifiquement conçues à cet effet pour toute la durée de la période hivernale notamment. La structure de stockage employée dépend de la forme sous laquelle se trouve le fumier (CRAAQ, 2012).

Pour des déjections liquides, une structure circulaire en béton armé est généralement utilisée. Les déjections sont acheminées du bâtiment d'élevage à la fosse à l'aide de conduites aériennes ou souterraines. Ces structures peuvent être recouvertes ou non d'un toit. Certains éléments doivent donc être pris en compte lors du dimensionnement de celles-ci (CRAAQ, 2012). Les précipitations reçues au cours de la période d'entreposage vont réduire le volume utile de l'ouvrage de stockage. De plus, un volume résiduel de déjections reste constamment au fond de la fosse. Cette hauteur résiduelle diminue également la quantité de déjections qui peuvent être entreposées. Les ouvrages de stockage circulaire en béton armé sont munis d'une pompe afin de brasser les déjections et éviter qu'elles ne forment des couches solides.

Les fumiers solides peuvent être entreposés de deux manières différentes. Une structure de béton, normalement de forme carrée ou rectangulaire, permet le stockage des déjections solides. Ces structures sont équipées d'un toit permanent. De manière générale, les fumiers sont acheminés dans ce lieu d'entreposage à l'aide d'un écoureur ou avec un tracteur. Une seconde façon d'entreposer les déjections solides est de faire un amas au champ. Ces amas doivent être situés sur une dalle de béton ou dans un endroit dans lequel le ruissellement provenant du monticule de fumier ne peut pas nuire à l'environnement (CRAAQ, 2012). De plus, ces amas sont possibles seulement si ces derniers ne dépassent pas un volume maximal (500 t) ou une charge en éléments fertilisants (3500 kg N ou 2000 kg P_2O_5). De base, le volume de l'amas au champ doit être évalué selon les besoins en fertilisation du champ ou des champs adjacents (IRDA, 2005).

La serre-étable dispose d'une fosse à fumier plus petite que celle de l'étable conventionnelle. En effet, due à sa méthode de gestion des fumiers sous formes liquide et solide, une plus petite quantité de fumier liquide est amassée. Les dimensions de la fosse pour l'étable conventionnelle sont de 3,66 m x 33,53 m (12 pi x 110 pi). Les coûts estimés pour une telle fosse sont de 100 000 \$ pour la fosse et de 25 000 \$ pour l'excavation, pour un total de 125 000 \$. La serre-étable nécessite, quant à elle, une fosse de 3,66 m x 18,29 m (12 pi x 60 pi). Les coûts sont de 45 000 \$ pour la fosse et de 15 000 \$ d'excavation, pour un total de 60 000 \$.

6.3 Discussion de l'analyse économique

Le but ici est de comparer les coûts du bâtiment conventionnel en stabulation libre à logettes avec ceux du bâtiment de serre-étable en stabulation libre sur litière compostée. De plus, pour bien représenter les différences des coûts entre les étables en stabulation libre à logettes et les aires de couchage sur litière accumulée telle qu'utilisée dans les serres-étables, des données sur les étables à logettes et les étables à aire de couchage sont présentées dans le Tableau 20.

Tableau 20 - Résumé des coûts sur les étables en stabulation libre à logettes et à aire de couchage

Données	Superficie (m ²)	Superficie (pi ²)	Coût total (\$)	Prix/superficie (\$/m ²)	Prix/superficie (\$/pi ²)
Serre-étable (HARNOIS, 2019b)	1393	15 000	520 990	375	35
Étable conventionnelle (HARNOIS, 2019b)	343	3696	149 770	436	40
Étable à logettes, 2 rangées doubles (conçue dans ce projet)	2230	24 000	917 850	412	38
Étable sur litière accumulée, une mangeoire (LEMAY C, 2020)	3393	36 525	1 617 000	477	44
Étable à logettes, 2 rangées double (LEMAY C, 2020)	2806	30 200	1 488 000	530	50
Étable à logettes, plancher plein (CRAAQ, 2019)	-	-	-	410	38
Étable à logettes, plancher partiellement latté (CRAAQ, 2019)	-	-	-	535	50

Il n'y a que peu de données sur les coûts par superficie pour les étables conventionnelles. Selon la firme Lemay-Choinière (LEMAY C, 2020), un bâtiment de type standard représente des coûts de 86 \$/m² à 108 \$/m² (8 \$/pi² à 10 \$/pi²) pour la fondation en béton ainsi que des coûts de 150 \$/m² à 195 \$/m² (14 \$/pi² à 18 \$/pi²) pour la structure (GAGNÉ. S, 2017).

Les coûts associés à l'étable conventionnelle à logettes conçus par l'équipe sont de 412 \$/m² (38 \$/pi²). Une des raisons qui fait que le coût obtenu dans le cadre de ce projet pour l'étable conventionnelle est différent est que tout le matériel a été pris sur les sites internet de compagnies telles Canac, Patrick Morin, Home Dépôt et d'autres quincailleries. Les entrepreneurs ont normalement des rabais sur les matériaux faisant diminuer les prix de ceux-ci. De plus, plusieurs prix sur des matières premières, tel que l'acier, varient dans le temps et sont accessibles seulement pour les entrepreneurs. Plusieurs prix ont aussi été estimés, car il n'est pas possible de trouver les informations à moins de contacter un entrepreneur général. Les prix qui ont été estimés sont : les fermes de toits, les moulures et soffites et les coûts d'excavations. Le coût estimé pour le bâtiment conventionnel (412 \$/m²) est plus élevé que ceux estimés par le CRAAQ (410 \$/m²) et plus bas que celui estimé par les Industries Harnois Inc. (436 \$/m²). Le prix trouvé est tout de même réaliste en comparaison avec les prix fournis par ces différentes sources.

Il est à noter que le coût par superficie n'inclut pas les robots de traites présents dans l'étable afin d'être analogue aux sources trouvées qui ne prennent pas en compte les robots dans leur coût total. De plus, les coûts donnés selon LEMAY C. (2020) prennent seulement en compte l'infrastructure, la coquille et les équipements intérieurs.

Le Tableau 20 permet donc de voir que la serre-étable revient moins dispendieuse (375 \$/m² par opposition à l'étable conventionnelle qui est de 412 \$/m²) à construire que les autres types d'étables. Ceci est majoritairement dû à la plus petite quantité de matériaux utilisée lors de sa construction.

7. Prise de mesures

7.1 Objectifs

L'environnement intérieur d'une étable laitière doit répondre à certaines exigences en matière de ventilation, de température, d'humidité, de luminosité et de particules dans l'air. Ces valeurs cibles sont fixées dans le but d'offrir un environnement respectant les normes de confort et de bien-être animal.

7.2 Informations utiles

7.2.1 Température et humidité relative

Les vaches laitières de race Holstein peuvent vivre dans un large éventail de température sans que leurs performances soient atteintes. La production laitière est optimale à une température de 10 °C (NAUD ET AL., 2006). Selon GRAVES (2016), l'intervalle de température où une vache de race Holstein peut conserver un haut rendement laitier se situe de -6,67 °C (20 °F) à 24,4 °C (76 °F). Selon un article du DAIRYLAND INITIATIVE (2019), la zone thermoneutre des vaches laitières Holstein se situe entre 4 °C et 21 °C. De plus, leur tolérance est beaucoup plus grande en deçà de la limite inférieure que celle supérieure. Une erreur fréquente est de conserver des températures trop chaudes en hiver au détriment de la qualité de l'air et du taux d'humidité. Le stress thermique a plusieurs conséquences sur les animaux telles une baisse de la production laitière et du taux de conception, une augmentation de la boiterie et une modification du comportement du troupeau.

L'humidité des bâtiments d'élevage est évaluée sous forme relative. Cette forme représente la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air comparativement à la quantité maximale qu'il peut contenir. Dans une étable, l'humidité relative doit se situer entre 50 % et 80 % (TURNBULL ET HUFFMAN, 1988).

7.2.2 Ventilation

La vitesse d'air recommandée, selon NAUD ET AL. (2006), est de 1,68 m/s, mais pour les températures québécoises, une vitesse de 1,27 m/s serait suffisante et permettrait des économies de conception. Selon un autre modèle considérant que les vaches ont la peau humide, la vitesse recommandée est de 1 m/s à 2 m/s (DAIRYLAND INITIATIVE, 2019).

7.2.3 Luminosité et photopériode

L'environnement des bâtiments agricoles, plus précisément l'ambiance des étables laitières, a un impact sur la production laitière, la reproduction et le bien-être des animaux ainsi que des employés. Un éclairage minimal est nécessaire pour que l'exploitant puisse travailler dans le confort et en toute sécurité. De plus, une étable bien éclairée augmenterait la production laitière par vache (HOUSE, 2019). Pour une conception adéquate d'un tel bâtiment, ces paramètres doivent

être connus et considérés. Plusieurs chercheurs ont étudié la relation entre la lumière et ces paramètres de production (DAHL, 2003). Le gouvernement de l'Ontario et celui du Québec ont aussi effectué des recherches à ce sujet (HOUSE, 2018a, FORTIER ET AL., 2005). On y retrouve des études sur l'impact de l'intensité lumineuse et du temps d'éclairage sur la production laitière, mais aussi sur la méthodologie et les calculs reliés à la conception du système d'éclairage pour une étable de dimensions variables.

Les bovins laitiers réagissent positivement aux jours longs, ce qui veut dire qu'un temps d'éclairage plus élevé quotidiennement impacte la reproduction des génisses et la production laitière. Celle-ci serait améliorée d'en moyenne 8 % lorsque l'environnement d'une étable passe de 13,5 heures ou moins d'éclairage à 16 à 18 heures avec un éclairage se situant entre 108 et 215 lux (FORTIER ET AL., 2005). Il a aussi été démontré que des vaches exposées à des jours longs, 16 heures de clarté et 8 heures d'obscurité, produisent 2 L de lait supplémentaires/vache/jour comparativement à celles exposées à la photopériode naturelle (DAHL, 2003). Cette tendance a été confirmée par plusieurs autres recherches scientifiques. Entre autres, une publication de l'Université du Wisconsin-Madison affirme qu'une telle régie d'éclairage augmente, en moyenne, la production laitière de 2,3 kg/vache/jour et que, par conséquent, une augmentation de la consommation de matière sèche de 0,91 kg/vache/jour (DAIRYLAND INITIATIVE, 2019b).

De plus, l'éclairage devrait se situer entre 160 et 215 lux au niveau des yeux des animaux (FORTIER ET AL., 2005). Cet éclairage visé est sensiblement le même selon l'article *Éclairage et photopériode* du DAIRYLAND INITIATIVE de l'Université du Wisconsin-Madison. Il est de 162 à 215 lux à une hauteur de 0,9 mètre au-dessus de la surface des logettes. Pour une performance idéale, l'intensité lumineuse à l'intérieur de l'étable doit être le plus uniforme possible et s'apparenter à la lumière naturelle (HOUSE, 2019).

**Tableau 21 - Intensité lumineuse pour les étables à logettes et leurs dépendances
(Adapté de FORTIER ET AL., 2005)**

Endroit	Intensité lumineuse (lux)
Dans l'étable :	
Aires d'alimentation et de couchage	160 – 215
Général	108
Salle de traite :	
Général	215
Puits de traite	538
Aire d'attente, laiterie, local technique (groupes frigorifiques)	108 – 215
Aire de traitement et de maternité :	
Général	108 – 215
Traitement et infirmerie	108 - 215

7.2.4 Qualité de l'air

Les productions animales entraînent la production d'énormes quantités de gaz. Ces gaz sont souvent pointés du doigt pour leur contribution à l'effet de serre. Cependant, ils ont aussi un gros impact sur la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments d'élevage et, par conséquent, sur le bien-être des travailleurs et des animaux. Les principaux gaz produits sont l'ammoniac (NH_3), le dioxyde de carbone (CO_2), les oxydes d'azote (NO_x) et le sulfure d'hydrogène (H_2S). Il n'y a pas que les gaz qui ont un impact sur la qualité de l'air. Il peut aussi y avoir présence de poussières et de bioaérosols (LAVOIE ET AL., 2007).

Pour réduire les effets collatéraux de l'élevage sur les travailleurs, des seuils de concentrations ont été fixés. Il existe trois principaux types de valeurs de seuils notamment une valeur d'exposition moyenne pondérée sur huit heures pour une semaine de travail de 40h (VEMP), une valeur d'exposition de courte durée (VECD) pour une période de 15 minutes et une valeur plafond (VECD/plafond) (GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2019). Différentes entités ont émis des barèmes et recommandations en ce qui a trait à l'exposition aux gaz (Tableau 22).

Tableau 22 - Valeurs d'exposition (Adapté de GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2019)

Substance		VEMP		VECD/Plafond	
		ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
Ammoniac	NH ₃	25	17	35	24
Dioxyde de carbone	CO ₂	5000	9000	30 000	54 000
Monoxyde d'azote	NO	25	31	-	-
Dioxyde d'azote	NO ₂	3	5,6	-	-
Sulfure d'hydrogène	H ₂ S	10	14	15	21

7.3 Sélection des appareils

Il est important de connaître les seuils admissibles pour le bien-être des animaux et des travailleurs, mais ces seuils ne servent à rien si aucune mesure n'est prise dans le bâtiment. À la suite de la prise de mesures, une évaluation de la qualité de l'air pourra être réalisée. Pour obtenir ces valeurs de concentrations en gaz et en particules, il est important d'avoir les bons instruments, mais également une bonne méthodologie pour que les résultats soient fiables.

7.3.1 Température et humidité

La température est normalement prise à l'aide d'un thermomètre. Il en existe plusieurs types. Il y a les thermomètres qui fonctionnent avec le principe de dilatation. Le tube de verre et le thermomètre bimétallique en sont de bons exemples. Certains thermomètres utilisent le principe de variation de résistance dont le RTD (capteur de température à résistance) et la thermistance. Il est aussi possible de trouver des thermomètres thermoélectriques. Le thermocouple utilise ce principe de mesure (FIGLIOLA ET BEASLEY, 2011). Les thermomètres sont habituellement peu dispendieux et offrent une précision acceptable d'environ 3 %. De plus, ils se déplacent facilement lorsque des mesures de températures localisées sont nécessaires (EILEEN, 2018).

L'humidité peut être mesurée sous forme d'humidité relative ou absolue. L'humidité relative est fonction de la température. La méthode commune pour mesurer l'humidité comporte un bulbe sec et un bulbe humide. Chaque bulbe prend une mesure de température. Par la suite, à l'aide d'une charte psychrométrique, l'humidité relative et absolue peut être obtenue. Des appareils se basant sur cette théorie ont été mis au point, par exemple, le psychromètre à aspiration. Il contient les

deux thermomètres avec deux bulbes différents ainsi qu'un système d'aspiration d'air. Cet appareil est précis, mais il demande du temps et est peu automatisé. Son prix varie de 150 à 300 dollars américains (EILEEN, 2018).

Il existe également des hygromètres pour mesurer l'humidité. Le principe de fonctionnement des hygromètres mécaniques se base sur la capacité de certains matériaux à prendre de l'expansion ou à se contracter lorsqu'il y a une variation de l'humidité dans l'air. Il existe aussi des hygromètres électriques. Ceux-ci calculent le changement de résistance électrique d'une feuille de chlorure de lithium ou d'un semi-conducteur. Ce changement est dû à la variation d'humidité dans l'air (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2007). En contrepartie, ils doivent être étalonnés régulièrement et perdent de leur performance en milieu près de la saturation ou lorsqu'il y a présence de poussières comme c'est le cas en milieu d'élevage de bovins.

L'utilisation d'une sonde hygrométrique prenant des mesures de température et d'humidité serait préconisée dans ce projet. Cet appareil est accessible et permet une récolte numérique des données.

7.3.2 Vitesse de l'air

Généralement, l'appareil utilisé pour quantifier la vitesse de l'air est un anémomètre. Pour des prises de mesure de vitesses dans des bâtiments d'élevage, deux types d'anémomètres sont priorisés. La sélection du type dépend des ordres de grandeur de vitesses dans le bâtiment ainsi que des dimensions des flux d'air mesurés. Les deux types sont : l'anémomètre à hélice et l'anémomètre à fil chaud. Ce premier type est plus robuste que son homologue à fil chaud. Il résiste bien à la poussière et aux débris présents dans l'air. Il est composé d'un petit système à hélice. Le mouvement de l'air génère une vitesse de rotation à l'hélice qui est proportionnelle à la vitesse de l'air. Cette vitesse de rotation est ensuite convertie en vitesse de l'air et est indiquée sur le dispositif d'affichage relié à hélice. L'anémomètre à fil chaud possède un dispositif d'affichage similaire à celui à hélice. La différence se situe au niveau du capteur. Le capteur est un fil vertical ou un fil vertical composé d'une thermistance. Le fil est chauffé électriquement à une certaine température. Ensuite, la variation de température ou bien la quantité d'énergie à fournir pour maintenir cette température est mesurée et une vitesse de l'air est déterminée en fonction de cela. L'anémomètre à fil chaud est à privilégier pour mesurer de basses vitesses d'air. Il est donc adapté aux petits

espaces. Le prix de ce type d'appareil de mesure oscille entre 400 et 1000 dollars américains (EILEEN, 2018).

À la suite des informations collectées, l'appareil pour mesurer la vitesse qui semble être le plus approprié pour ce projet est l'anémomètre à fil chaud. Il se démarque de l'autre notamment par sa capacité à mesurer de basses vitesses d'air.

7.3.3 Luminosité

Pour quantifier l'éclairage d'un bâtiment, c'est habituellement l'éclairement lumineux qui est utilisé et non la luminance. La luminance caractérise une source de lumière. Elle est la mesure de la luminosité de celle-ci et elle n'est pas influencée par la distance. L'éclairement lumineux est la quantité de lumière qui tombe sur une surface. Cette mesure est beaucoup plus adaptée pour quantifier la lumière à un endroit dans les étables laitières. Elle est mesurée en lux ou en pieds-bougies (HISCOCKS, 2011). L'appareil le plus commun pour le mesurer est le luxmètre. Il mesure l'éclairage sur les plans verticaux et horizontaux. Cet appareil possède une précision de plus ou moins 10 % (STARBY, 2006, cité par LINDKVIST, 2019).

Le luxmètre est l'appareil adapté pour les prises de mesures de luminosité dans les bâtiments d'élevage.

7.3.4 Qualité de l'air

Ces instruments de mesure peuvent être très dispendieux, plus particulièrement les appareils électroniques. Il existe une alternative aux appareils électroniques qui se nomme les tubes réactifs colorimétriques. Ces tubes sont conçus pour détecter le niveau de gaz dans l'air. Ils sont à usage unique. Il en existe pour plusieurs types de gaz. Cette méthode est relativement simple et peu coûteuse. Il existe deux types de tubes colorimétriques : les tubes réactifs et les tubes dosimétriques appelés aussi tubes passifs ou à diffusion (EILEEN, 2016).

Le premier type est un peu plus cher étant donné qu'il nécessite une petite pompe qui envoie un échantillon d'air assez représentatif dans le tube pendant 60 secondes. La concentration en gaz peut être lue sur le tube à la suite des 60 secondes de réaction dans le tube. Le résultat est une

mesure de concentration ponctuelle pour un temps fixe. La pompe coûte entre 300 et 500 dollars américains (EILEEN, 2016).

Les tubes colorimétriques passifs sont, quant à eux, légèrement moins chers que le premier type de tubes. Un bout du tube est ouvert et laissé à l'endroit d'intérêt. La concentration est calculée sur un intervalle de temps de 2 à 10 heures. Une moyenne sur une période de temps est donc obtenue suite à son utilisation. Un désavantage notable de cette méthode est la nécessité d'effectuer deux visites sur le lieu d'échantillonnage pour obtenir la concentration (EILEEN, 2016).

Il existe aussi des moniteurs à main pour mesurer les concentrations en gaz. Ces appareils sont portatifs et compacts. Ils peuvent mesurer un ou plusieurs gaz selon le modèle. Plusieurs types sont disponibles sur le marché tels le chromatographe, le spectromètre de masse et le spectromètre infrarouge (FRADEN, 2004). Leurs prix varient beaucoup pouvant atteindre des valeurs de plusieurs dizaines de milliers de dollars. Ces appareils doivent être étalonnés (SAUVÉ, 2018).

Les moniteurs manuels semblent être le type d'appareil de mesure de la concentration en gaz qui répond le plus aux besoins du projet étant donné les mesures ponctuelles devant être prises dans plusieurs endroits. Ce type d'appareil est aussi plus durable dans le temps et polyvalent que les tubes colorimétriques.

7.3.5 Instrumentation

Dans le but de collecter une bonne diversité de mesures, trois instruments sont utilisés dans le cadre du projet. Les différents paramètres désirés sont la température, l'humidité relative, la vitesse de l'air, la luminosité et les concentrations de gaz (NH_3 , H_2O , CO_2 , N_2O , CH_4).

7.3.5.1 Température, humidité relative et vitesse de l'air

Ces trois paramètres ont été mesurés à l'aide de l'appareil de mesures portable multifonction AMI 310 produit par l'entreprise Kimo®.



Figure 15 - Kimo® AMI 310 (SAUERMANN, 2020)

L'appareil doit opérer à des températures variant entre 0 et 50 °C. Les mesures sont prises grâce à un anémomètre à fil chaud connecté à l'appareil ainsi qu'une sonde d'humidité.

Tableau 23 - Spécifications Kimo® AMI 110

Dispositif	Paramètre	Unité	Échelle de mesure	Précision	Résolution
Anémomètre à fil chaud	Vitesse	m/s	0,15 à 1 m/s	±2 % lecture ±0,03 m/s	0,01 m/s
			0,15 à 3 m/s	±2 % lecture ±0,03 m/s	0,01 m/s
			3,1 à 30 m/s	±3 % lecture ±0,10 m/s	0,10 m/s
	Température	°C	-20 à 80 °C	±0,3 % lecture ±0,25°C	0,1 °C
Sonde	Humidité	%	3 à 98 %	±0,04(T-20)RH	0,1 %

7.3.5.2 Luminosité

Un luxmètre a été utilisé pour mesurer ce type de données. Le modèle de luxmètre utilisé est le Sper Scientific® 840020. Il mesure la luminosité en lux ou en pieds-bougies. Elle répond aux exigences du spectre photopique de la Commission internationale de l'éclairage (C.I.E.). Il possède une étendue de mesure allant de 0 à 400 000 lux.



Figure 16 - Luxmètre Sper Scientific® 840020 (SPER SCIENTIFIC DIRECT, 2020)

7.3.5.3 Concentrations gazeuses

Les concentrations en gaz ont été prises grâce à l'analyseur portable FTIR (Fourier transform infrared) Gasmet® DX4040. Celui-ci permet de prendre simultanément la concentration de 25 gaz différents. Cependant, dans le cadre du projet, seulement 4 gaz ont été mesurés soit : NH_3 , CH_4 , N_2O et CO_2 . Cet appareil portable est muni d'une pompe prenant un échantillon d'air et l'analysant. Il doit préférentiellement être opéré à des températures se situant entre 0 et 40°C et la température de l'échantillon gazeux ne doit pas dépasser 50°C. L'humidité relative du lieu doit être inférieure à 90 %. Une mise à zéro à l'aide d'azote pur est nécessaire avant chaque séance de prise de mesures. La technologie FTIR est très stable et demande que très peu d'étalonnage. Les résultats sont affichés et enregistrés grâce à un assistant personnel digital et la technologie Bluetooth®. L'appareil a une possibilité d'erreur équivalant à 2 % de la plus petite plage de mesure (GASMET, 2020).



Figure 17 - GASMET DX4040 FTIR Gas analyser (GASMET, 2020)

7.4 Matériels et méthodes

7.4.1 Lieux

Les deux endroits à l'étude ont une régie alimentaire et de traite similaire, c'est-à-dire qu'ils utilisent une ration totale mélangée et la traite robotisée. De plus, les bâtiments possèdent les mêmes types de ventilation et de litière. L'organisation des deux étables est aussi très similaire ce qui réduit les variables pour la comparaison des performances environnementales des bâtiments. Les données récoltées ne refléteront donc que l'impact d'un toit solaire sur les conditions d'ambiance intérieure. Les Figures 18 et 19 présentent les endroits où les points de mesures ont été effectués dans la Ferme Majestein et dans la Ferme Rodajeau respectivement.

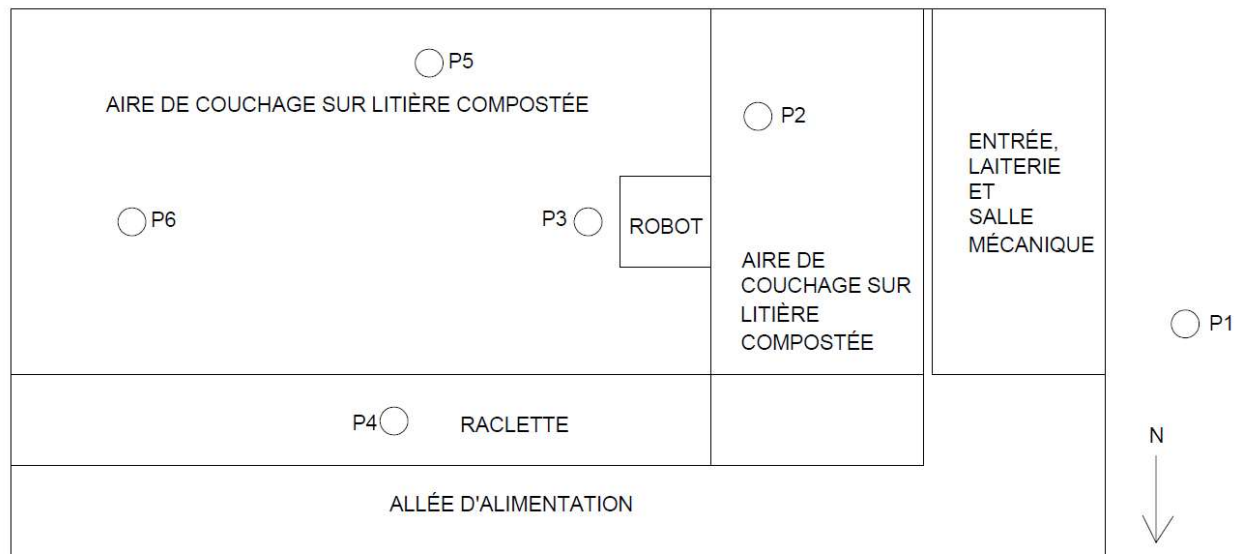


Figure 18 - Positionnement des points de mesures à la Ferme Majestein

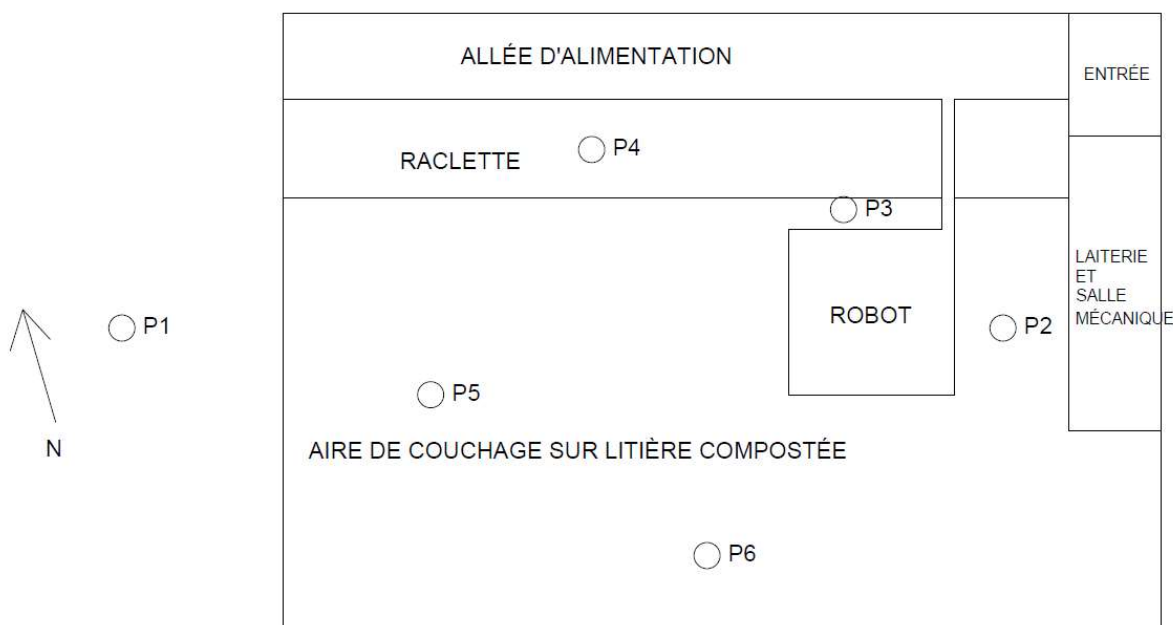


Figure 19 - Positionnement des points de mesures à la Ferme Rodajean

7.4.3 Prise de mesures

La prise de mesures a eu lieu le 17 février 2020. Les conditions climatiques étaient assez stables et le ciel était dégagé. Les mesures ont été prises, en premier lieu, à la ferme Majestein en milieu d'avant-midi. L'équipe s'est ensuite déplacée sur le deuxième lieu d'expérimentation, à la ferme Rodajean, et les mesures ont été collectées vers le milieu de l'après-midi. Une prise de mesures a été effectuée à l'extérieur de chacune des étables. Par la suite, des données ont été récoltées à cinq emplacements à l'intérieur de chacune des étables en suivant un patron similaire pour les deux étables. Le protocole ainsi que l'horaire de la prise de mesures détaillées sont disponibles à l'Annexe F. Cinq mesures par paramètre par point sont prises à l'aide des instruments. Une mesure équivaut à une moyenne des valeurs mesurées sur une minute. La prise de mesures pour un point se fait donc sur une durée de 5 minutes. Les paramètres sont tous mesurés simultanément. Une moyenne est ensuite calculée pour obtenir la valeur de chaque paramètre propre au point. Finalement, une valeur globale pour chaque paramètre mesuré est obtenue par le calcul de la moyenne des valeurs moyennes des points excluant le point de mesures situé à l'extérieur. Ceci donne un portrait global de l'environnement intérieur des étables. Ces mesures sont toutes effectuées à une hauteur équivalente à la tête d'une vache adulte lorsqu'elle est debout.

7.5 Résultats

Tout d'abord, les conditions extérieures ont été mesurées à l'arrivée sur chaque site d'expérimentation. Ces conditions étaient assez similaires comme on peut l'apercevoir dans le tableau ci-dessous.

Tableau 24 - Conditions extérieures lors de la prise de mesures

Conditions extérieures		Valeurs
Température (°C)	Majestein	-9,9
	Rodajeon	-7,5
Humidité relative (%)	Majestein	40,7
	Rodajeon	36,5
Vitesse de l'air (m/s)	Majestein	0,79
	Rodajeon	1,07
Luminosité (lux)	Majestein	40 000
	Rodajeon	42 000

Pour ce qui est des mesures intérieures, le Tableau 25 compare l'environnement intérieur des deux étables.

Tableau 25 - Mesures moyennes intérieures des étables

Paramètres		Valeurs
Température (°C)	Majestein	8,2
	Rodajeon	2,3
	Δ	-72%
Humidité relative (%)	Majestein	70,4
	Rodajeon	63,7
	Δ	-9%
Vitesse de l'air (m/s)	Majestein	0,19
	Rodajeon	0,19
	Δ	0%
Luminosité (lux)	Majestein	2316
	Rodajeon	9710
	Δ	319%
NH ₃ (ppm)	Majestein	4,05
	Rodajeon	3,13
	Δ	-23%
CH ₄ (ppm)	Majestein	79,61
	Rodajeon	61,75
	Δ	-22%
N ₂ O (ppm)	Majestein	0,84
	Rodajeon	0,45
	Δ	-47%
CO ₂ (ppm)	Majestein	1695,86
	Rodajeon	1007,17
	Δ	-41%

7.6 Discussion

À la lumière des résultats obtenus, on peut constater que, majoritairement, les valeurs mesurées à la Ferme Majestein sont plus élevées que celles de la Ferme Rodajean. Il n'y a que la vitesse de l'air qui est égale et la luminosité qui est inférieure à la serre-étable. Les valeurs moyennes des autres paramètres, c'est-à-dire, la température, l'humidité relative et les concentrations gazeuses sont toutes supérieures à celle de la serre-étable. La serre-étable est plus froide, mais a une meilleure gestion des gaz. Ces concentrations en gaz sont, en moyenne, 35% plus petites que l'étable conventionnelle. Sachant que celle-ci a une densité animale plus faible, le constat est encore plus important. La grosse différence se situe au niveau de la luminosité où les performances de la serre-étable sont de loin supérieures à celles de l'autre étable. Il n'y a eu qu'une minime variation des conditions extérieures entre les deux périodes de prise de mesures. On ne peut donc pas considérer cet aspect comme un facteur d'influence majeur dans l'évaluation des performances environnementales des étables.

Les valeurs de température et d'humidité relative mesurées se situent dans les intervalles ciblés propices à la production laitière (GRAVES, 2016). Globalement, la serre-étable est plus froide que l'étable conventionnelle avec une température de 2,3°C comparativement à 8,2°C pour cette dernière. Celle-ci se situe plus près de la température optimale qui serait de 10°C (NAUD ET AL., 2006). La différence entre les deux fermes est notable. L'humidité relative des étables est très similaire avec un écart relatif de seulement 9 %. Les valeurs mesurées, 70,4 et 63,7 %, se situent entre 50 et 80 % qui représente l'intervalle recommandé. Il est important de mentionner qu'au moment de la prise de mesures, la Ferme Rodajean était en ajustement de son système automatisé de contrôle environnemental. Ce système gère notamment, en continu, les ouvertures latérales et supérieures influençant la ventilation naturelle. La ventilation étant moins intense lors de la période hivernale, l'impact de l'arrêt temporaire de celle-ci est donc moins important sur les paramètres mesurés qu'en saison chaude.

La différence de bâtiment n'a pas impacté la vitesse de l'air à l'intérieur des étables. Comme mentionné précédemment, la ventilation est minimisée en hiver ce qui peut expliquer l'égalité des vitesses. Il serait pertinent de conduire une collecte de vitesse d'air lors de la période estivale. Les ouvertures seraient positionnées dans le but de maximiser la ventilation naturelle. Il serait donc

intéressant de mesurer si la différence ergonomique de l'étable conventionnelle comparée à la serre-étable influence la circulation d'air à l'intérieur.

L'expérimentation a permis de quantifier la luminosité à l'intérieur des étables. Cette catégorie de mesure a démontré une très grande différence entre les deux types d'étables étudiés à l'avantage de la serre-étable. Une luminosité supérieure de 319 % fut mesurée à l'intérieur de celle-ci. Le plus possible, des endroits exposés à la lumière de façon semblable ont été sélectionnés pour prendre les mesures. Les mesures ont aussi été prises avec les lumières d'appoint de l'étable fermées. Cependant, l'appareil utilisé est assez variable dans sa prise de mesures. Il est très sensible aux changements d'orientation du capteur et aux variations de l'environnement. Toutefois, les multiples mesures effectuées dans chaque bâtiment amortissent quelque peu cette possible variation. Malgré tout, on semble voir un lien direct entre le modèle de serre-étable et l'intensité lumineuse intérieure supérieure. Cette différence avec l'étable conventionnelle n'est pas négligeable. Selon la littérature, une luminosité cible pour une étable laitière devrait se situer entre 160 et 215 lux (FORTIER ET AL., 2005). Elle devrait aussi être le plus homogène possible et se rapprocher de la lumière naturelle. Ces valeurs sont clairement dépassées dans les deux cas étudiés sachant que la Ferme Majestein a une luminosité moyenne de 2316 lux et la Ferme Rodajean de 9710 lux. Toutefois, la luminosité de la serre-étable est beaucoup plus élevée, mais aussi plus naturelle. Les panneaux translucides ainsi que les ouvertures supérieures du bâtiment permettent une entrée lumineuse créant une impression d'homogénéité à l'intérieur du bâtiment.

D'après les résultats obtenus par rapport aux concentrations de gaz dans les étables, la serre-étable a une concentration en gaz bien inférieure à l'étable conventionnelle. Les gaz semblent mieux gérer dans un bâtiment d'élevage de type serre-étable. Il se peut aussi que l'émission primaire soit moins élevée en raison de la régie, par exemple, le type de litière utilisée ou l'alimentation plus efficace du troupeau. Fait à noter, lors de la prise de mesures, le brassage de la litière venait tout juste d'être effectué à la Ferme Majestein tandis qu'il avait été fait environ 2 heures avant la prise à la Ferme Rodajean. Le brassage de la litière peut libérer une partie des gaz emprisonnés produits par l'activité biologique, mais son impact est avant tout majeur lorsqu'il est question des particules présentes dans l'air. Globalement, les concentrations gazeuses des deux types de bâtiments

d'élevage ne dépassent pas les seuils limites d'exposition, mais sont nettement à l'avantage de la serre-étable.

Dans les deux cas, les concentrations en NH_3 et de CO_2 sont nettement inférieures aux valeurs d'exposition moyenne pondérée (VEMP) à 25 ppm et 5000 ppm dans l'ordre (RSST, 2019). Il est aussi recommandé de ne pas dépasser une concentration de 7-10 ppm pour l'ammoniac et de 1540 ppm selon BIRD ET AL. (1992). Toutefois, une concentration de CO_2 entre 2000 et 2500 ppm serait qualifiée de normale dans un bâtiment d'élevage. Il n'y a que le bâtiment conventionnel qui ne répond pas à un critère de recommandation en raison de sa concentration de CO_2 supérieure à 1540 ppm (1695,86 ppm).

Pour ce qui est des concentrations de méthane, il est très rare que ces concentrations deviennent problématiques dans un lieu d'élevage. Une concentration est qualifiée d'alarmante aux alentours de 5 000 ppm ce qui est bien loin de l'ensemble des valeurs de concentration de CH_4 mesurées lors du projet (CNESST, 2010). La VEMP du protoxyde d'azote (N_2O) est égale à 50 ppm (LAVOIE ET AL., 2006). On est très loin de cet ordre de grandeur dans les lieux à l'étude. L'écart entre les valeurs est minime comparativement à celui entre les valeurs et la VEMP.

Dans l'ensemble, force est de constater qu'il y a une différence d'environnement intérieur entre les deux étables. Cette différence est particulièrement présente en ce qui a trait à la luminosité intérieure et les concentrations gazeuses. La serre-étable a une moyenne d'intensité lumineuse beaucoup plus élevée que l'étable conventionnelle. La charge gazeuse est aussi plus faible dans ce bâtiment. Aucun des bâtiments ne présente un réel problème de concentrations gazeuses. Cependant, une réduction des concentrations ne peut qu'être bénéfique pour les travailleurs et les animaux. La température est légèrement plus optimale dans l'étable conventionnelle étudiée, mais une forte production laitière est clairement envisageable dans un type d'étable comme celle de la Ferme Rodajean. Une étude en continu effectuée sur une année complète serait justifiée pour confirmer les avantages que peut procurer une étable de type serre.

8. Comparaison

8.1 Objectif

L'objectif principal de ce projet est de déterminer si les serre-étables en stabulation libre sur litière compostée ont des avantages économiques, environnementaux et sur les performances animales par rapport aux étables conventionnelles en stabulation libre à logettes.

8.2 Analyse et discussion

8.2.1 Comparaison économique

L'analyse économique permet d'éclairer le choix du producteur dans le type de bâtiment qu'il désire. Le design complet de l'étable conventionnelle en stabulation libre à logettes permettant de loger 100 vaches en lactation a permis de déterminer les matériaux nécessaires à sa construction ainsi que leurs quantités. Les besoins en équipements ont également été évalués. Ainsi, un coût total prenant en compte les matériaux et les équipements basés sur le dimensionnement réalisé est estimé à 412 \$/m² (38 \$/pi²). En considérant plusieurs sources différentes (design réalisé, CRAAQ (2019), Les Industries Harnois Inc. et LEMAY C. (2020)), le coût moyen pour une étable conventionnelle définie dans la cadre de ce projet est plutôt de 409,03 \$/m² (38,00 \$/pi²). Le coût considéré pour une serre-étable en stabulation libre sur litière compostée logeant 100 vaches en lactation est celui provenant des Industries Harnois Inc. et se chiffre à 375 \$/m² (35 \$/pi²). Les coûts associés à la main-d'œuvre requise pour effectuer les constructions n'ont pas été considérés puisque chaque compagnie de construction a des standards différents, ne peuvent pas compter sur le même nombre d'employés et n'opèrent pas dans toutes les régions. Les producteurs de lait rencontrés durant les visites nous ont affirmé qu'il n'y avait pas de différence de temps de travail entre une stabulation libre sur litière compostée avec robot et un système de traite manuelle. La seule différence est la meilleure qualité de vie, car il n'est pas nécessaire de faire la traite aux petites heures, mais qu'il faut tout de même brasser la litière. Il serait intéressant de demander à un producteur ayant une étable en stabulation libre à logettes si son temps de travail diminue de beaucoup, car il n'a pas à effectuer le brassage de la litière ni à s'occuper du système de traite. Toutefois, en considérant la plus grande quantité de matériaux à mettre en place dans le cas de l'étable conventionnelle, le temps nécessaire à sa réalisation devrait être plus long que pour la serre-étable et engendre ainsi des coûts en main-d'œuvre plus importants. De plus, afin d'avoir

une idée plus complète des coûts, la durée de vie des matériaux devrait être prise en compte par le producteur. En ne considérant que les prix énoncés précédemment, l'option la moins dispendieuse est celle de la serre-étable.

8.2.2 Comparaison environnementale

Au niveau des environnements intérieurs, plusieurs différences ont été mesurées lors de la prise de mesures en février 2020. Lors de cette journée ensoleillée et relativement bien dégagée, la ferme à structure conventionnelle ne profitait pas d'une luminosité aussi grande que celle de la serre-étable, cette dernière profitant également d'une luminosité complètement naturelle. Le bâtiment conventionnel permet de conserver beaucoup plus efficacement la chaleur produite par les vaches et par la litière compostée. Cela permet d'avoir une température plus clémente en période froide et de rester à l'intérieur de la plage de température optimale pour les vaches laitières. La Ferme Majestein présentait aussi une humidité relative plus élevée. Les données récoltées montrent que la qualité de l'air était légèrement meilleure dans la serre-étable. En effet, la serre-étable présentait une concentration en ammoniac, en méthane, en protoxyde d'azote et en dioxyde de carbone plus faible. Certains paramètres doivent cependant être pris en compte, comme le temps entre le dernier brassage de la litière et la prise de mesures de même que le bon fonctionnement du système de ventilation. Le paramètre qui était constant lors de la prise de mesures était la vitesse de l'air. Les deux fermes profitent d'un système de ventilation similaire et la vitesse du vent à l'intérieur des bâtiments était la même.

De manière globale, la serre-étable semble offrir des conditions d'ambiance intérieure légèrement supérieure à celles de l'étable conventionnelle. Ceci ne peut toutefois pas être affirmé avec certitude puisque l'étude ne se base que sur une seule prise de mesures. L'effet des saisons n'a pas pu être évalué, de même que l'effet des conditions climatiques extérieures différentes. Plusieurs questionnements restent à éclaircir ; le possible effet de serre provoqué par le toit solaire en saison estivale et le manque d'ombre dans la serre-étable et la possible augmentation de la concentration des gaz en saison hivernale lorsque la ventilation est ralentie, autant dans l'étable conventionnelle que dans la serre-étable.

8.2.3 Comparaison animale

La comparaison des performances animales se base sur les avantages pour le bien-être animal que procure la litière compostée par rapport à un mode de logement sur logettes. Ces différences entre ces deux modes de logement proviennent de la littérature puisque les deux étables à l'étude sont sur litière compostée pour réduire les facteurs de biais lors de la prise de mesures. Les fermes sur litière compostée offrent un confort supérieur aux vaches. Elles ne sont pas contraintes par une position précise de repos et profitent d'une surface plus molle et chaude que les matelas de caoutchouc et la litière les recouvrant dans les logettes. Des positions plus confortables pour les vaches et une surface plus souple permet de réduire les blessures aux membres et augmente la facilité de déplacement, de se coucher et de se lever de celles-ci. La propreté des vaches est également améliorée si la litière compostée est bien entretenue. La litière compostée demande une gestion plus serrée de la part du producteur, mais elle est bénéfique pour la santé, le confort et le bonheur des vaches. Tout ceci peut se traduire par une augmentation de la production laitière des vaches. Les vaches pourraient produire jusqu'à 1,4 kg de lait/vache/jour. Considérant le prix moyen par hectolitre de lait avec une composition moyenne payé à la ferme durant l'année 2019 à 80,33\$ (LES PRODUCTEURS DE LAIT DU QUÉBEC, 2019) et une masse de 1,027 kg/L en fonction de la composition moyenne qui est de 4,1859 kg MG/hl (INSTITUT PROFESSIONNEL DU LAIT DE CONSOMMATION, 2011), le gain potentiel d'un tel type d'étable serait de 39 964\$ annuellement.

8.2.4 Résumé des comparaisons

Tableau 26 - Résumé des comparaisons économique, environnementale et animale

Aspect	Étable conventionnelle en stabulation libre à logettes logeant 100 vaches en lactation	Serre-étable en stabulation libre à aire de couchage sur litière compostée logeant 100 vaches en lactation
Économique (coûts de construction et d'équipements)	412 \$/m ² (38 \$/pi ²)	375 \$/m ² (35 \$/pi ²)
Environnementale	Température plus clémente en période froide	Plus grande luminosité, meilleure qualité de l'air (NH ₃ , CH ₄ , N ₂ O, CO ₂)
Animale	-	Positions de repos plus confortables, réduction des blessures aux membres, augmentation de la production laitière jusqu'à 1,4 kg/vache/jour (39 964 \$/année)

9. Conclusion

Le but du projet était d'effectuer une comparaison entre un bâtiment conventionnel et un bâtiment de type serre pour l'élevage de 100 vaches laitières afin de mettre en relation les avantages offerts par les deux types de structure ainsi que de mettre sous lumière les structures innovantes dans la production animale. Plusieurs sous-objectifs forment le cœur du projet, ceux-ci étant (1) réaliser une revue de littérature sur, entre autres, les bienfaits et les désavantages des deux bâtiments; (2) réaliser des visites d'étables types (3) effectuer la conception d'une étable conventionnelle et d'une serre-étable; (4) calculer les coûts de construction des structures préalablement élaborées; (5) effectuer des prises de mesures de l'ambiance intérieure (température-humidité relative, vitesse du vent, luminosité et qualité de l'air) dans les deux types de bâtiments ayant les mêmes types de litière, de ventilation et le même mode de logement pour les vaches afin d'évaluer l'effet d'un toit solaire; (6) réaliser une comparaison entre l'étable conventionnelle et la serre-étable à partir des informations relevées et des données fournies par Les Industries Harnois Inc.

La revue de littérature et les visites réalisées chez des producteurs ont permis d'amasser de l'information sur la régie d'élevage ainsi que sur les éléments constituant les étables typiques et les bâtiments de type serre-étable. La conception de l'étable conventionnelle a été réalisée en suivant les normes et en se basant sur les recommandations des spécialistes de l'industrie laitière. L'évaluation des coûts de construction à partir de la structure dimensionnée a permis de trouver un prix réaliste qui se rapproche de ceux relevés dans la littérature. La prise de mesures en conditions réelles d'élevage a permis l'accumulation de données mettant en relation l'effet d'un toit solaire sur les conditions d'ambiance intérieures d'une étable avec l'environnement intérieur d'une étable similaire ne comportant pas de toit solaire. Une comparaison entre les deux types de bâtiments a ensuite été établie à la lumière des constats effectués lors des précédentes étapes.

Finalement, une étable conventionnelle en stabulation libre à logettes et une serre-étable en stabulation libre avec aire de couchage sur litière compostée comportent des avantages distincts et diffèrent sur certains points. L'étable conventionnelle représente un coût de construction et d'équipements plus élevé (412 \$/m² vs 375 \$/m²), mais permet de conserver une température intérieure plus douce en saison hivernale. La serre-étable offre quant à elle une luminosité plus

grande et plus naturelle, une meilleure qualité d'air et un confort optimal pour les vaches participant ainsi à une augmentation de la productivité laitière (1,4 kg de lait/vache/jour). La vitesse de l'air est similaire dans les deux types de bâtiments. Le choix de l'une des deux structures dépend des besoins des producteurs et des conditions environnementales de travail voulues selon les saisons. De plus amples démarches dans la même optique que ce projet permettraient d'évaluer la situation à l'intérieur des étables sous plusieurs températures différentes et aiderait à bien comprendre tous les effets reliés à une structure comportant un toit solaire.

Bibliographie

ASSOCIATION CANADIENNE DU CIMENT, *Codes et normes*, 2019. Consulté le 22 octobre 2019. <https://www.cement.ca/fr/codes-et-normes/>

BEWLEY. J and all., *Compost bedded pack barn design: Features and management considerations*, novembre 2012, consulté le 22 novembre, https://www.researchgate.net/publication/256601037_Compost_Bedded_Pack_Barn_Design_Features_and_Management_Considerations

BEWLEY. J, TARABA. J, *Penn State: Webinar Update Compost Bedded Pack*,. 2016, consulté le 22 novembre 2019, https://extension.psu.edu/compost-bedded-pack-dairy-shelter-update-1?iwd_preview12345=1

BIRD & AL., *La protection des travailleurs contre les poussières et les gaz dans les bâtiments d'élevage*, 1992. Consulté le 24 mars 2020. https://www.agrireseau.net/documents/Document_93239.pdf

BLAIS CLÉMENT, MARTIN VALÉRIE, ADAM STEVE, *Valacta : Litière compostée, accumulée ou fumier recyclé. Est-ce pour moi?*, 2018-01-10, Consulté le 19 novembre 2019, http://www.agriconseils.qc.ca/wp-content/uploads/2018/03/201710-12_journee_partenaire_lait_clementblais.pdf

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION, *Design of concrete structure*, 2004

CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC (CRAAQ), *L'entreposage des fumiers*, 3^{ie} édition, 2012.

CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC (CRAAQ), *Références économiques : étables pour bovins laitiers et laiteries*, 2019, consulté le 25 mars 2020. <https://www-craaq-qc-ca.acces.bibl.ulaval.ca/visionneuse/a/PREF0310/06cd6360-60e0-4f47-8828-f4c7e7151995/PREFABO>

CHOINIÈRE, Y., *Ventilation efficace pour chaleurs torrides*, *Le bulletin des agriculteurs*, 2005. Consulté le 17 octobre 2019. <http://old.yveschoiniere.com/media/pdfs/articles/ventilation-efficace-chaleurs-torride.pdf>

CHOINIÈRE, Y., J.A. MUNROE et A. SUCHORSKI-TREMBLAY, *Sizing openings for naturally ventilated barns*, 1994. Publication M-9765, Service de plan Canada, Ottawa.

CNESST, *Protoxyde d'azote*, 1999. Consulté le 22 mars 2020.
https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=331488

CNESST, *Méthane*, 2010. Consulté le 22 mars 2020.
https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=8896

CODE NATIONAL DU BÂTIMENT (CNB 2010), *Division B - Partie 4 - Règles de calculs*, 2015, 120p.

CONSEIL CANADIEN DES NORMES, *CSA 14-16*, 2019. Consulté le 22 octobre 2019.
<https://www.scc.ca/fr/standardsdb/standards/28038>

CONSEIL CANADIEN DU BOIS, *Norme CSA O.86*, 2019. Consulté le 22 octobre 2019.
<https://cwc.ca/fr/comment-construire-en-bois/codes-et-normes/normes-de-bois/norme-csa-086-regles-de-calcul-des-charpentes-en-bois>

CONSEIL CANADIEN DU BOIS, *Wood Design Manual (WDM)*, 2017, 1156 p.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES DU CANADA (CNRC), *Inspection des bâtiments agricoles : formulaire d'inspection et guide d'accompagnement*, 2011. Consulté le 22 octobre 2019. <https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/securite-incendie/ssi/materiel-prevention/inspectionbatiments-agricoles/en-ligne.html>

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES DU CANADA (CNRC), *Code national du bâtiment - 2015*, 2015. Consulté le 22 octobre 2019. <https://nrc.canada.ca/fr/certifications-evaluations-normes/codescanada/publications-codes-canada/code-national-batiment-canada-2015>

CONSEIL NATIONAL POUR LE SOIN DES ANIMAUX D'ÉLEVAGE (CNSAE), *Code de pratiques pour le soin et la manipulation des bovins laitiers*, 2009. Consulté le 7 novembre 2019.
https://www.nfacc.ca/pdfs/codes/bovins_laitiers_code_de_pratiques.pdf

CSA Group, *Design of steel structures*, 2014

DAIRYLAND INITIATIVE, *Éclairage et photopériode*, 2019. Consulté le 8 novembre 2019b.
<https://thedairylandinitiative.vetmed.wisc.edu/fr/home-2/housing-module/adult-cow-housing/ventilation-and-heat-abatement/>

DAIRYLAND INITIATIVE, *Ventilation et refroidissement dans les bâtiments d'élevage pour bovins adultes*, 2019a. Consulté le 9 novembre 2019.

<https://thedairylandinitiative.vetmed.wisc.edu/fr/home-2/housing-module/adult-cow-housing/ventilation-and-heat-abatement/>

DAHL, G., *Photoperiod management of dairy cattle for performance and health*, 2003. Consulté le 12 octobre 2019. <http://www.dairyweb.ca/Resources/WCDS2003/Dahl.pdf>

DUSSAULT, M. & AL., *Laiterie de ferme*, 2005. Consulté le 20 novembre 2019. https://www.agrireseau.net/banqueplans/feuillets/Feuillet%2020508.pdf?fbclid=IwAR10RZRHSUceArEQup3RseMbeKXYMxP1JI7Uk77dTL-uUMulj_sEmW3mAqo

EILEEN, F., *Ammonia monitoring in barns using simple instruments*, 2016. Consulté le 9 novembre. <https://extension.psu.edu/ammonia-monitoring-in-barns-using-simple-instruments>

EILEEN, F., *Evaluating air quality in livestock housing environments*, 2018. Consulté le 9 novembre. <https://extension.psu.edu/evaluating-air-quality-in-livestock-housing-environments>

EILEEN, F., *Ventilating greenhouse livestock barn*, 2019. Consulté le 9 novembre. <https://extension.psu.edu/ventilating-greenhouse-livestock-barns>

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, *Hygrometer meteorological instrument*, 2007. Consulté le 23 novembre 2019. <https://www.britannica.com/science/hygrometer>

FIGLIOLA ET BEASLEY, *Theory and design for mechanical measurements*, 2011. Consulté le 20 avril 2020. <https://pdfs.semanticscholar.org/a85e/2248a04d3fa180522d872bc4f1241183a22f.pdf>

FISCHER, D., *Designing dairy facilities for energy efficiency*, 1998. Consulté le 28 septembre 2019. <http://livestocktrail.illinois.edu/dairynet/paperDisplay.cfm?ContentID=164>

FORTIER ET AL., *L'éclairage des étables laitières*, 2005. Consulté le 12 octobre 2019. <https://www.agrireseau.net/banqueplans/feuillets/feuillet%2020912.pdf>

FRADEN, *Handbook of modern sensors: physics, design and applications (3rd edition)*, 2004. Consulté le 20 avril 2020. <http://www.kelm.ftn.uns.ac.rs/literatura/si/pdf/HandbookOfModernSensorsPhysicsDesignAndApplications.pdf>

GAGNÉ, S., *Conférence sur la régie des bâtiments en production laitière*, 2017. Consulté le 25 mars 2020. <http://www.agricconseils.qc.ca/wp-content/uploads/2018/02/201710-08-planification-detable-laitiere-sebastien-gagne.pdf>

GALAMA, P, ET AL., *Prospects for bedded pack barns for dairy cattle*, 2011. Consulté le 18 septembre 2019.

http://www.vrijloopstallen.nl/documenten/Prospects_for_bedded_pack_barns_for_dairy_cattle.pdf

GASMET, *DX4040 INSTRUCTION AND OPERATING MANUAL*, 2020. Consulté le 18 mars 2020.

http://www.geotechenv.com/Manuals/Gasmet_Manuals/Gasmet_DX4040_Instruction_Operating_Manual.pdf

GODBOUT. S ET AL, *Calcul du volume de fumier pour le dimensionnement des structures d'entreposage: Évaluation des volumes complémentaires.* , IRDA, Avril 2017, p. 9 tableau 2.

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, *Règlement sur la santé et la sécurité au travail*, 2019.

Consulté le 16 novembre 2019. http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%2013?langCont=fr#ga:l_v-h1

GRAVES, R., *Natural ventilation for freestall barns*, 2016. Consulté le 30 octobre 2019.

<https://extension.psu.edu/natural-ventilation-for-freestall-barns>

GROUP AKTIENGESELLSCHAFT (GEA), *Grattoirs d'allée et nettoyeur de dalot transversal à câble*, 2019. Consulté en ligne le 18 novembre 2019. https://www.gea.com/fr/binaries/A4-FR_Systemes%20Nett%20Cable_LowRes_tcm29-35675.pdf

HAMMAMI & al., *Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holstein in a temperate environment*, 2013. Consulté le 13 novembre 2019.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Evaluation+of+heat+stress+effects+on+production+traits+and+somatic+cell+score+of+Holsteins+in+a+temperate+environment>

HARNOIS, *À propos*, 2019a. Consulté le 21 octobre 2019. <https://www.harnois.com/a-propos/>

HARNOIS, 2019b, Fichier excel de calcul de coût de bâtiment

HOLMES et al., *Dairy Freestall Housing and equipment*, 2013, MWPS-7, 8e édition, 226 p.

HISCOCKS, P., *Measuring light*, 2011. Consulté le 19 novembre 2019.

<https://www.ee.ryerson.ca/~phiscock/astrometry/light-pollution/photometry.pdf>

HOUSE, K., *Choix d'éclairage dans les étables à stabulation libre*, 2019. Consulté le 12 octobre 2019. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/15-012.htm>

HOUSE, K., *Logement des animaux laitiers - options pour la ventilation des étables à stabulation libre à logettes*, 2018. Consulté le 15 octobre 2019.

<http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/15-018.htm>

IEL, *Toile soufflée*, 2019. Consulté le 18 décembre 2019. <https://www.iel.ca/division-agricole/secteur-laitier/toile-soufflee/>

INSTITUT PROFESSIONNEL DU LAIT DE CONSOMMATION, *Calcul des équivalences de compositions des laits de consommation en fonction de leur teneur en matière grasse*, 2011.

Consulté le 26 avril 2020. http://iplc.fr/content/download/276/4790/version/2/file/13357_Fiche-tech-8-%C3%A9quivalences-AG-01-06-2011.pdf

INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT EN AGROENVIRONNEMENT (IRDA), *Guide de conception des amas de fumier au champ II*, 2005. Consulté le 20 avril 2020.

<https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Guideamasfumier.pdf>

KAMMEL D. ET AL., *Greenhouse barns for dairy housing*, 1997. Consulté le 22 octobre 2019. https://www-mwps.sws.iastate.edu/sites/default/files/imported/free/aed_40.pdf

LAVOIE & AL., *Évaluation de la qualité de l'air dans les porcheries équipées d'un système de séparation liquide-solide des déjections*, 2006

<https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-460.pdf>

LAVOIE ET AL., *Qualité de l'air dans les étables de veaux de lait*, 2007. Consulté le 16 novembre 2019. <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/pubirsst/R-524.pdf>

LEBLANC ET DUSSAULT, *Les bovins laitiers*, [Fichier PDF], CRAAQ, 2014. Consulté le 22 novembre 2019.

LEMAY. C, *Les principales options d'aménagement et leurs impacts*, AQINAC. 2020. Consulté le 28 avril 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=PYQueueutGzU&feature=youtu.be>

LES PRODUCTEURS DE LAIT DU QUÉBEC, *Prix à la ferme - Québec*, 2019. Consulté le 26 avril 2020. <https://lait.org/leconomie-du-lait/statistiques/>

LINDKVIST, S., *Light for dairy cows - Methods to measure light in dairy barns*, 2019. Consulté le 18 novembre 2019. https://stud.epsilon.slu.se/14206/7/Lindkvist_S_190125.pdf

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'ALIMENTATION ET DES AFFAIRES RURALES DE L'ONTARIO (MAAARO), *Étables avec aire de couchage sur litière compostée*,

2018, consulté le 7 novembre 2019. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/15-026.htm>

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'ALIMENTATION ET DES AFFAIRES RURALES DE L'ONTARIO (MAAARO), *Le confort des vaches dans les étables à stabulation libre en logettes*, 2019a. Consulté le 7 novembre 2019. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/livestock/dairy/facts/95-068.htm>

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'ALIMENTATION ET DES AFFAIRES RURALES DE L'ONTARIO (MAAARO), *Logement des animaux laitiers - Choix de configurations*, 2019b. Consulté le 7 novembre 2019. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/livestock/dairy/facts/95-068.htm>

NAUD ET AL., *La ventilation longitudinale dans les étables laitières*, 2006. Consulté le 31 octobre 2019. <https://www.agrireseau.net/banqueplans/feuillet/feuille%2020913.pdf>

OUELLET ET AL., *The relationship between the number of consecutive day of heat stress and milk production of Holstein dairy cows raised in a humid continental climate*, Journal of Dairy Science Vol 102 No 9, 2019b.

PENN STATE, Freestall shelters - *Two Row Head To Head Freestall Shelter, Inside Feed Driveway (No DIP 211)*, 2019a. Consulté le 7 novembre 2019. <https://abe.psu.edu/extension/idea-plans/dairy/freestall/dip-211>

PENN STATE, Freestall shelters - *Three Row Freestall Shelter, Inside Feed Driveway (No DIP 213)*, 2019b. Consulté le 7 novembre 2019. <https://abe.psu.edu/extension/idea-plans/dairy/freestall/dip-213>

PENN STATE, Freestall shelters - *Four Row Head To Head Freestall Shelter, Drive-through Feeding (No DIP 224)*, 2019c. Consulté le 7 novembre 2019. <https://abe.psu.edu/extension/idea-plans/dairy/freestall/dip-224>

RUSSELLE, M., K. BLANCHET ET L. EVERET (2007). *Characteristics and Fertilizer Value of Compost Dairy Barn Manure*, dans *Proc. of the National Compost Dairy Barn Conference*. 21 et 22 juin 2007. Burnsville, MN.

SAUERMAN, *AMI 310*, 2020. Consulté le 22 février 2020. <https://sauermanngroup.com/en-INT/measuring-instruments/portable-instruments/multifunctions/ami-310>

SAUVÉ, T., *Les gaz dangereux dans les exploitations agricoles*, 2018. Consulté le 29 novembre 2019.

<http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/14-018.htm#8>

SCHULLER ET AL., *Impact of heat stress on conception rate of dairy cows in the moderate climate considering different temperature-humidity index thresholds, periods relative to breeding, and heat load indices*, 2013. Consulté le 12 novembre 2019.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24612695>

SERVICE DE PLANS CANADA, *Construisez vos fermes de toit*, 1983. Publication M-9101, Canada Plan Service, Ottawa. Consulté en ligne le 24 novembre 2019.

https://www.agrireseau.net/documents/Document_93896.pdf

SPER SCIENTIFIC DIRECT, *Light Meter Lux/FC – 840020*, 2020. Consulté le 7 mars 2020.

<https://www.sperdirect.com/light-meter-lux-fc-296-prd1.htm>

TURNBULL ET HUFFMAN, *Principes et taux de ventilation mécanique*, 1988. Consulté le 31 octobre 2019. <https://www.agrireseau.net/documents/93242/principes-et-taux-de-ventilation-mecanique-feuillet-technique-9700?r=ventilation+%C3%A9table+laiti%C3%A8re>

TYSON ET AL., *Tunnel ventilation for tie stall dairy barns*, 2014. Consulté le 8 novembre 2019. https://ecommons.cornell.edu/bitstream/handle/1813/66969/G78_Tunnel_Ventilation_for_Tie_Stalls_2014.pdf?sequence=2

VALACTA, *Guide pratique pour l'évaluation et l'amélioration du confort à l'étable*, 2014. Consulté en ligne le 5 novembre 2019. https://www.valacta.com/gpc/_media/Document/guide-confort-etable-final2.pdf

VENTEC, *Ventilation naturelle, industrie laitière*, 2019a. Consulté le 26 novembre 2019.

<https://ventec.ca/fr/prod-list.asp?c=1>

VENTEC, *Aérateurs cheminées, entrées d'air*, 2019b. Consulté le 21 novembre 2019.

https://jolco.ca/img/client/pdf/ventec/Francais/NewDpl_RoofVents_Fr.pdf

Annexe A - Questionnaires pour les visites de fermes laitières

Questionnaire pour les visites de fermes laitières

1. Information de l'élevage

Nom de la ferme: _____
Adresse de la ferme: _____
Propriétaire: _____
Téléphone: _____ Courriel: _____

2. Cheptel

Nombre de têtes total: _____
Nombre de vaches en lactation en moyenne: _____
Quantité moyenne de lait/vache: _____
Nombre de lactation moyenne/vache: _____

3. Informations sur le(s) bâtiment(s) d'élevage

Année de construction: _____
Type de bâtiment d'élevage: _____
Type de stabulation: _____
Type de ventilation: _____
Type de litière: _____
Méthode de nettoyage des logettes: _____
Système d'alimentation: _____
Système de traite: _____
Système d'éclairage (quantité de luminosité donnée aux animaux, type de luminosité): _____
Isolation?: _____
Système de nettoyage (type, nombre de passage): _____
Dimensions du bâtiment d'élevage (hauteur, largeur, longueur): _____
Biosécurité en vigueur: _____

Points forts du bâtiment d'élevage: _____

Points faibles du bâtiment d'élevage: _____

Commentaires: _____

4. Travail du producteur

Différence charge de travail du producteur: _____

Différence répartition du travail du producteur: _____

Différence environnement de travail du producteur (luminosité, odeurs, sécurité, ergonomie, air etc.): _____

5. Croquis du bâtiment d'élevage

Annexe B - Photos des fermes visitées

Ferme Rodajeau Inc.



Figure 20 - Ventilation avec corniche



Figure 21 - Module de contrôle Harnois



Figure 22 - Station météo



Figure 23 - Système de contrôle de l'éclairage



Figure 24 - Compost en maturation



Figure 25 - Raclette



Figure 26 - Emplacement du système de géothermie

Ferme Dubois C.R.A.R. Inc.



Figure 27 - Système de ventilation



Figure 28 - Tracteur pour ramasser les fumiers liquides

Ferme Majestein Inc.



Figure 29 - Système de contrôle Maximus dans l'étable conventionnelle

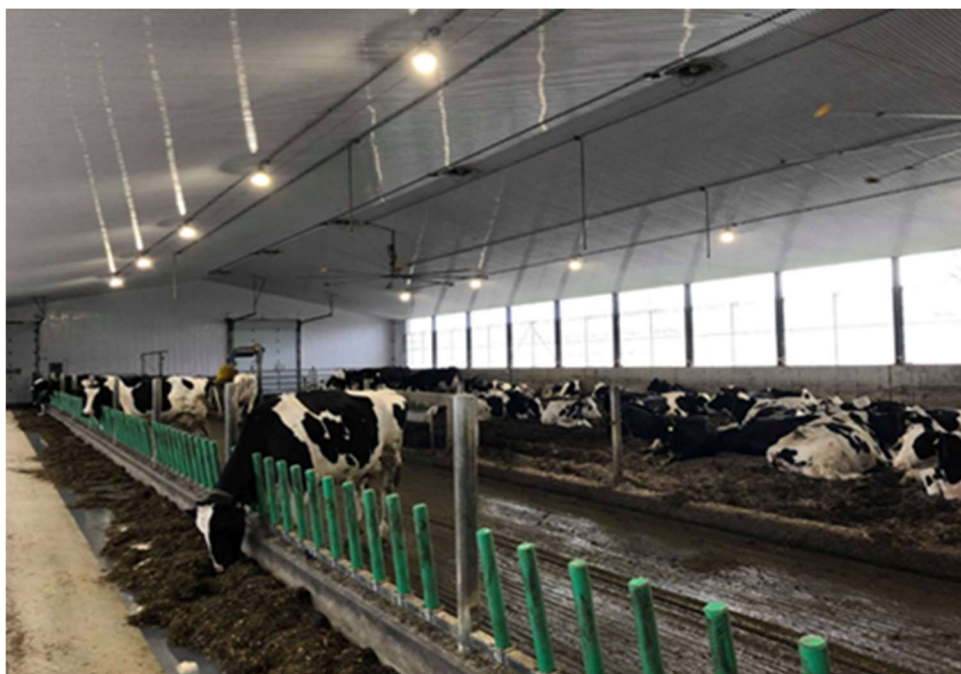


Figure 30 - Litière compostée, allée de raclette et allée d'alimentation

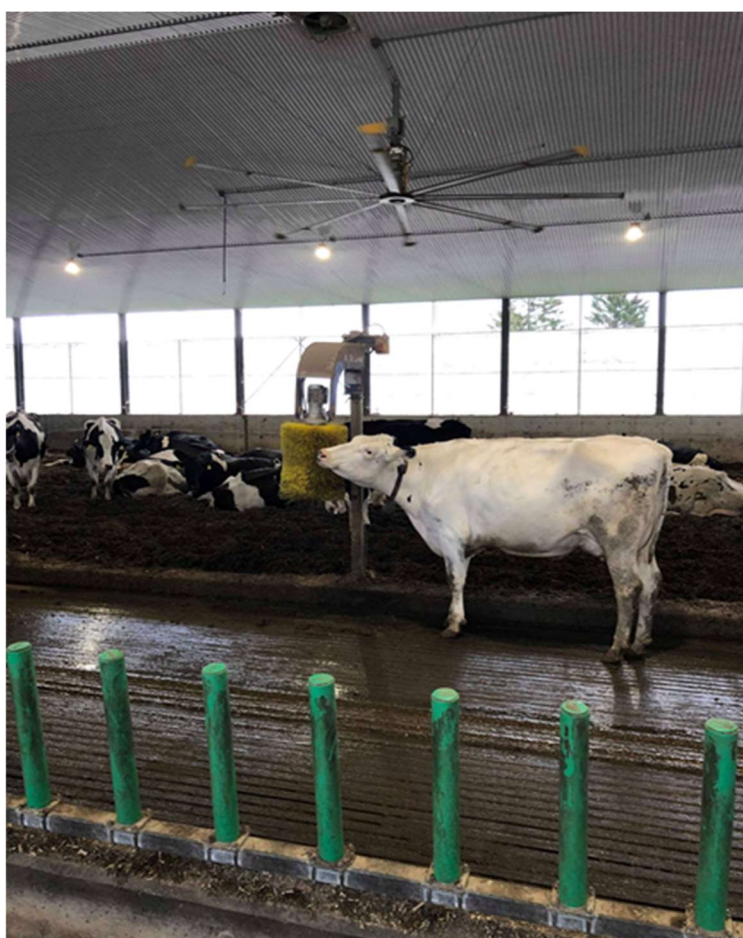
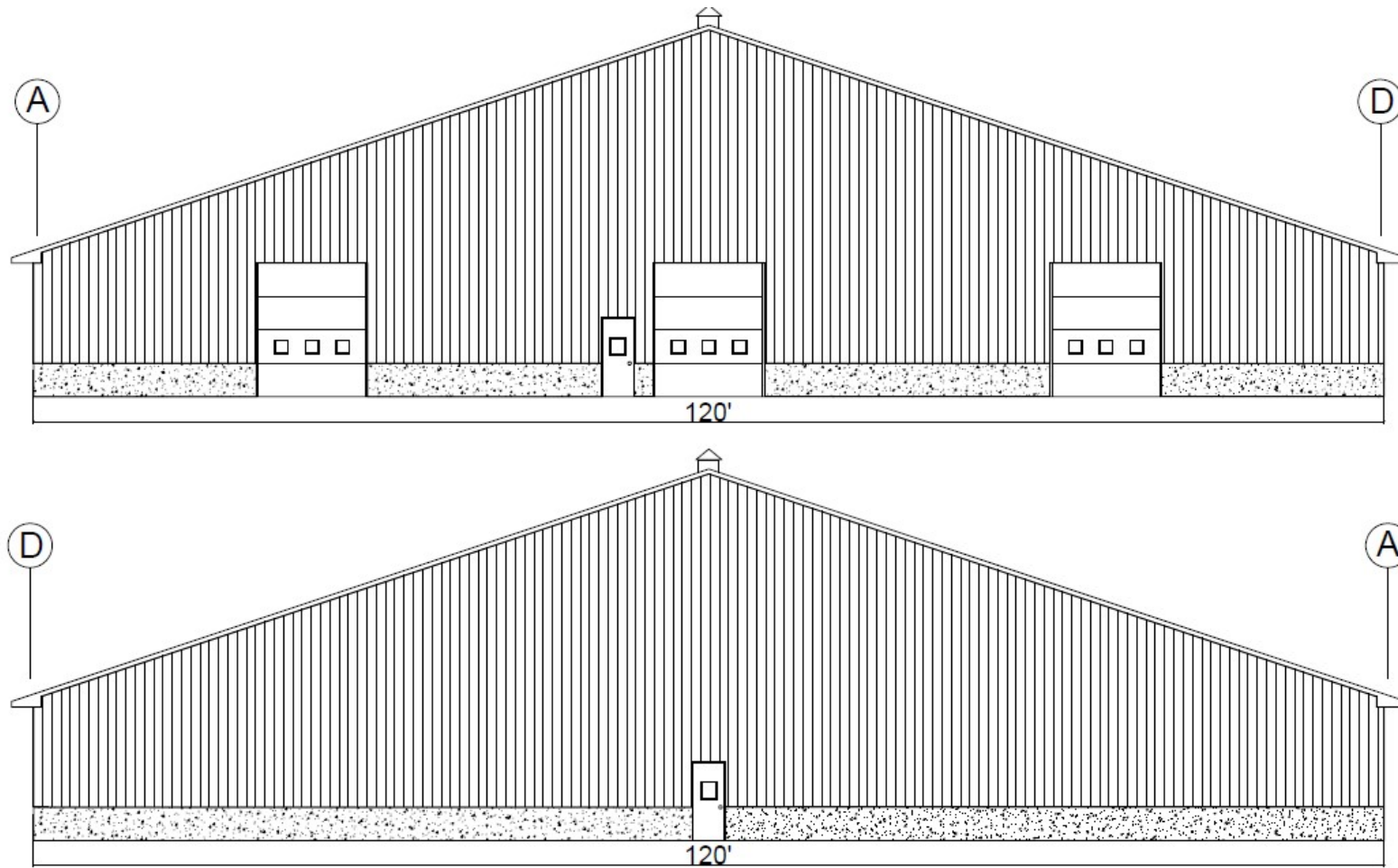


Figure 31 - Allée de raclette

Annexe C - Plans de l'étable conventionnelle



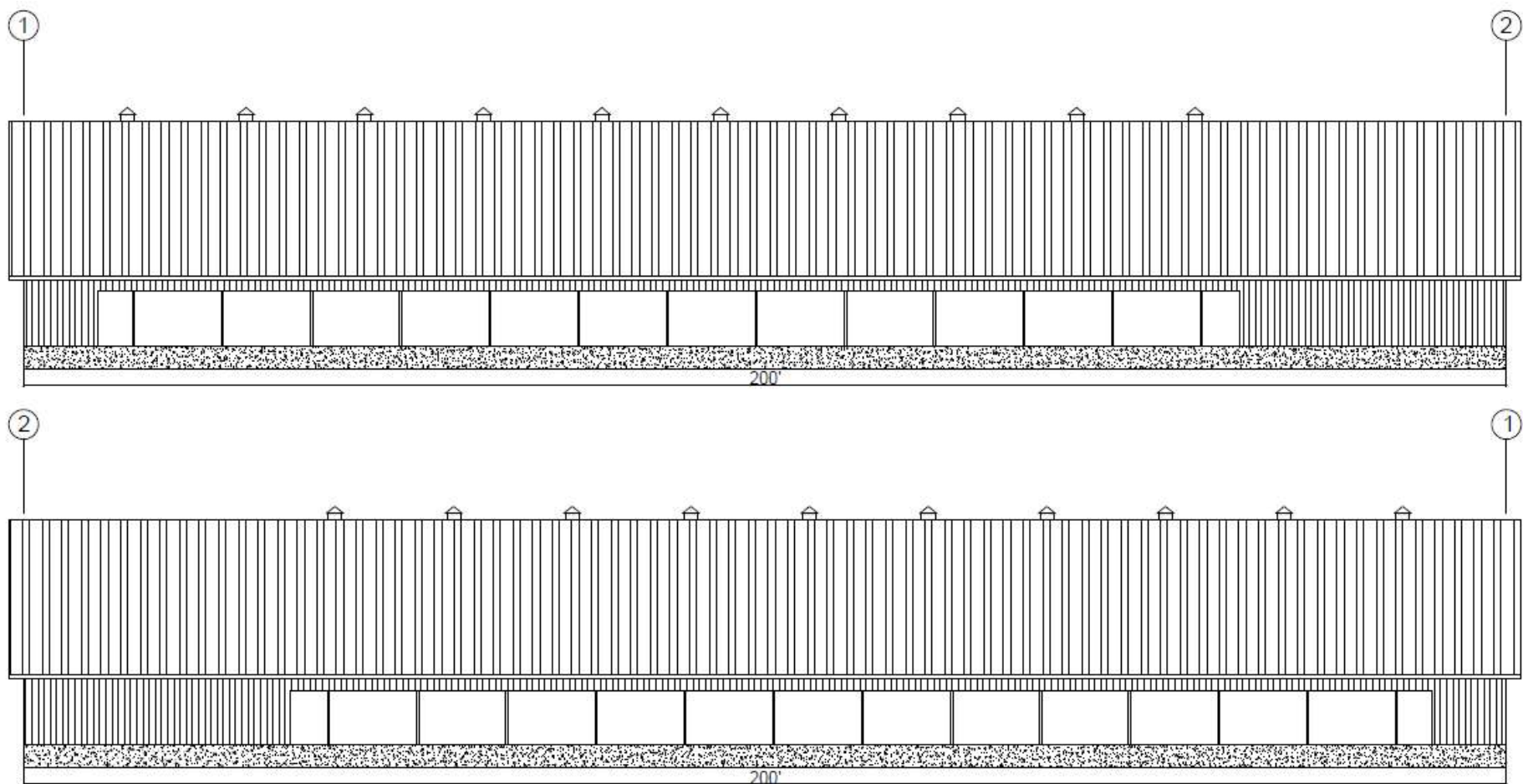


Figure 32 - Plans d'aménagement

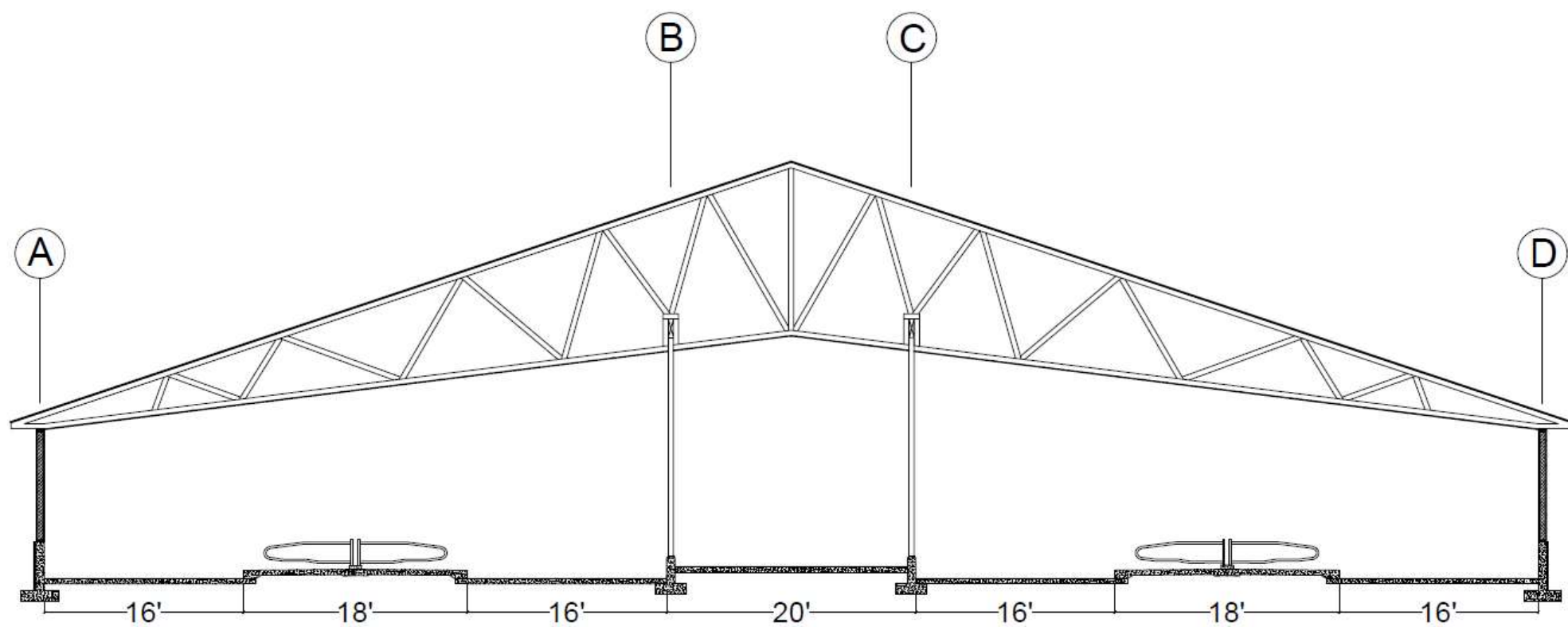


Figure 33 - Vue en coupe avec des murs fermés au niveau des logettes

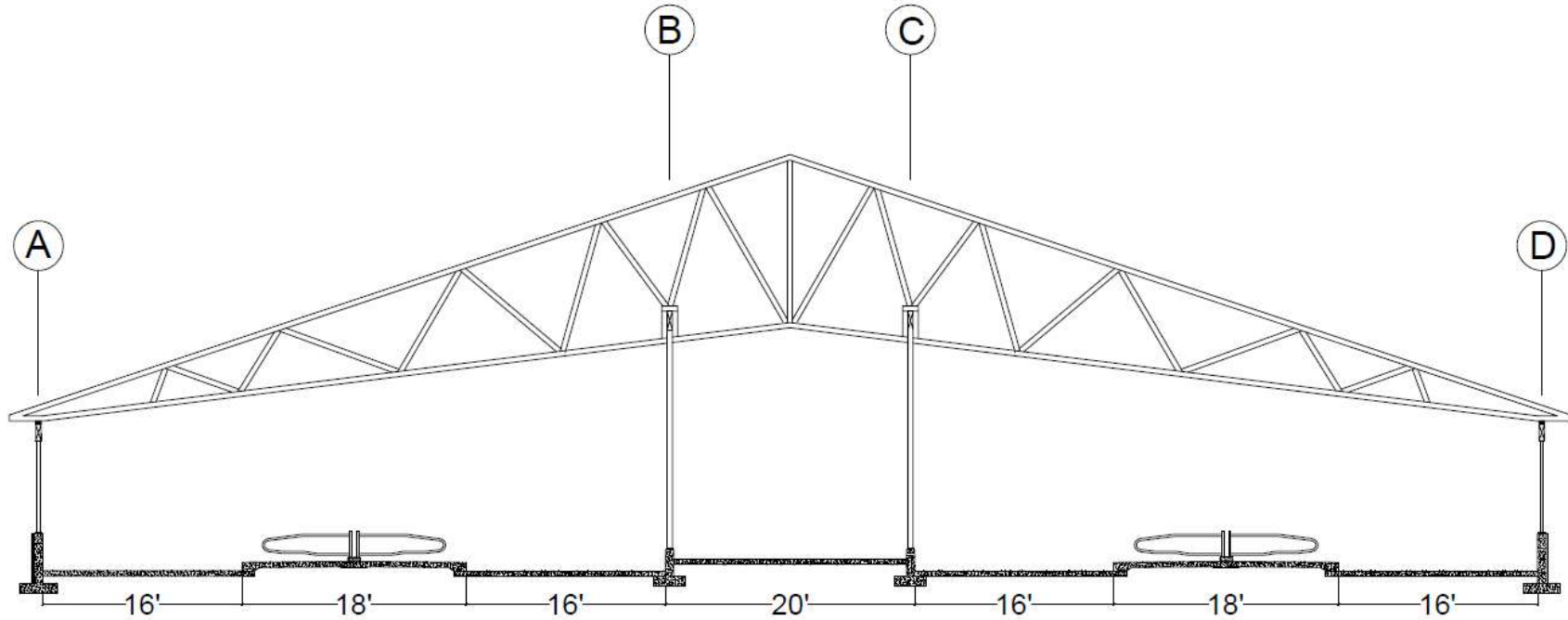


Figure 34 - Vue en coupe avec les ouvertures d'entrée d'air de la ventilation naturelle au niveau des logettes

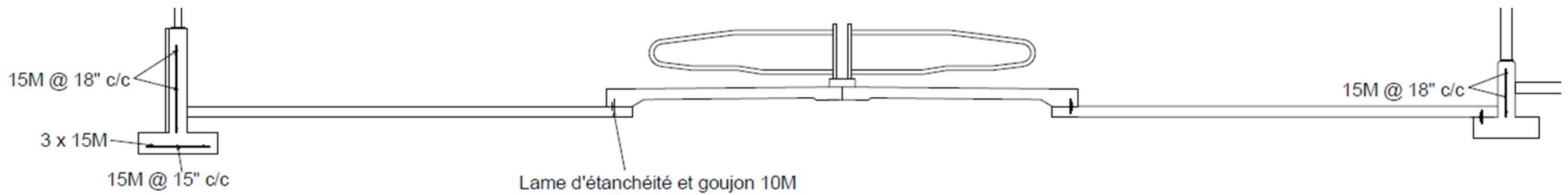
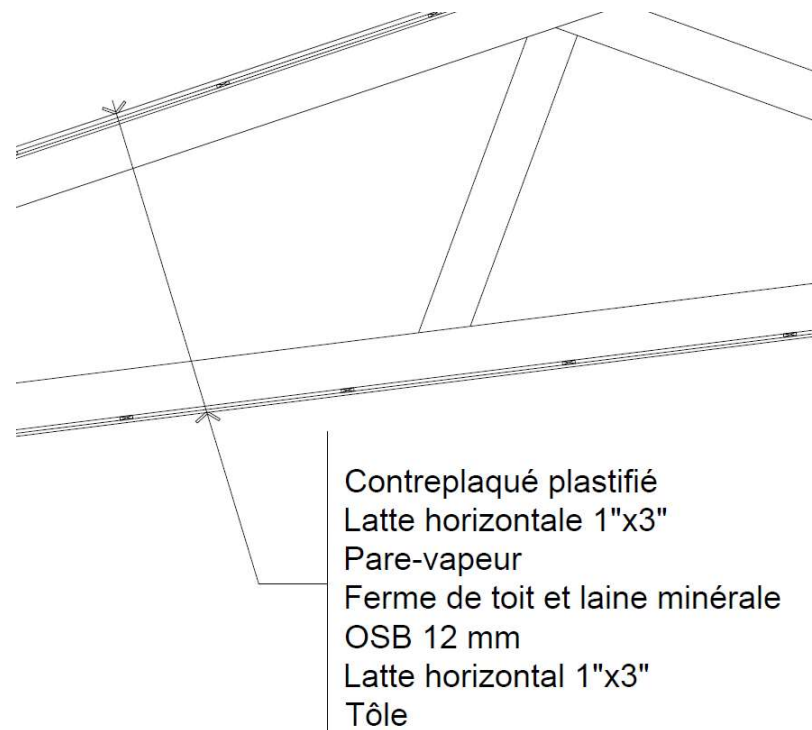
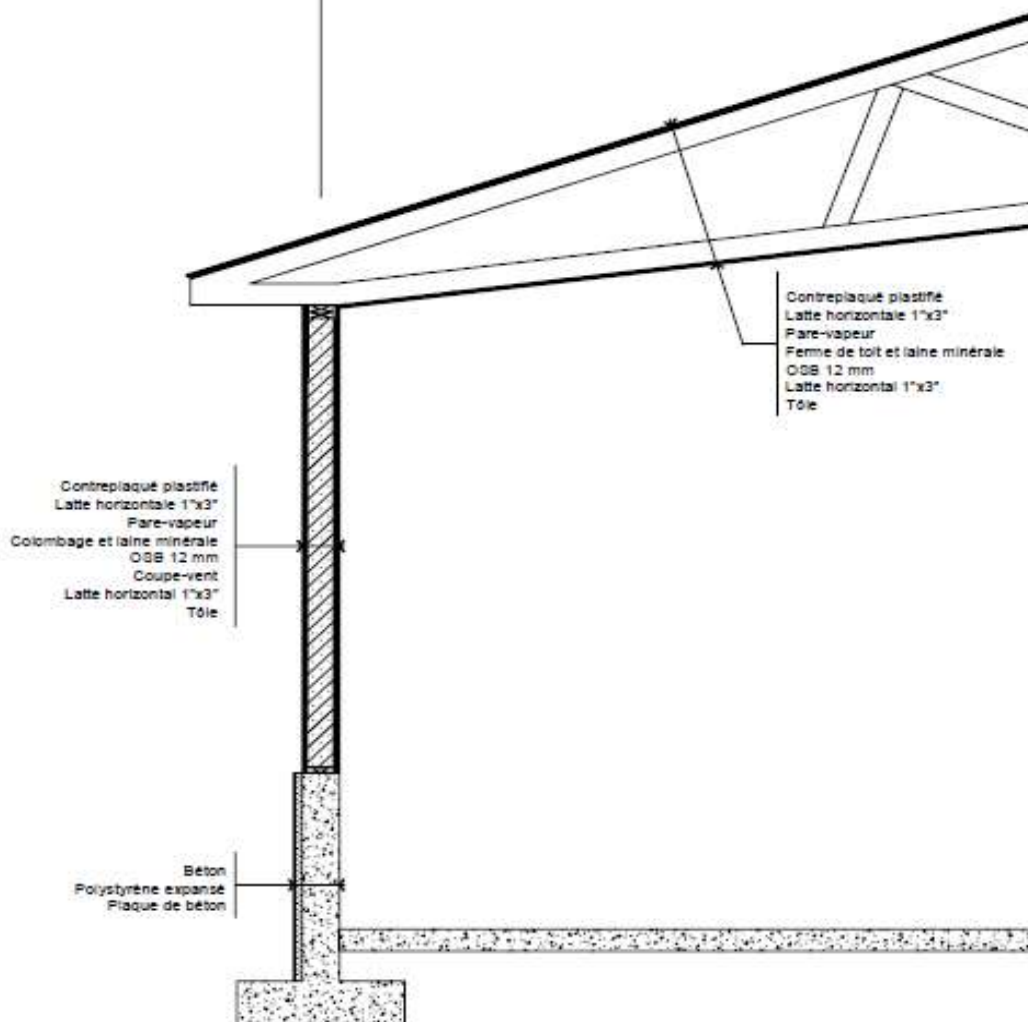


Figure 35 - Vue en coupe du béton et de l'acier d'armature pour la moitié de l'étable conventionnelle

A



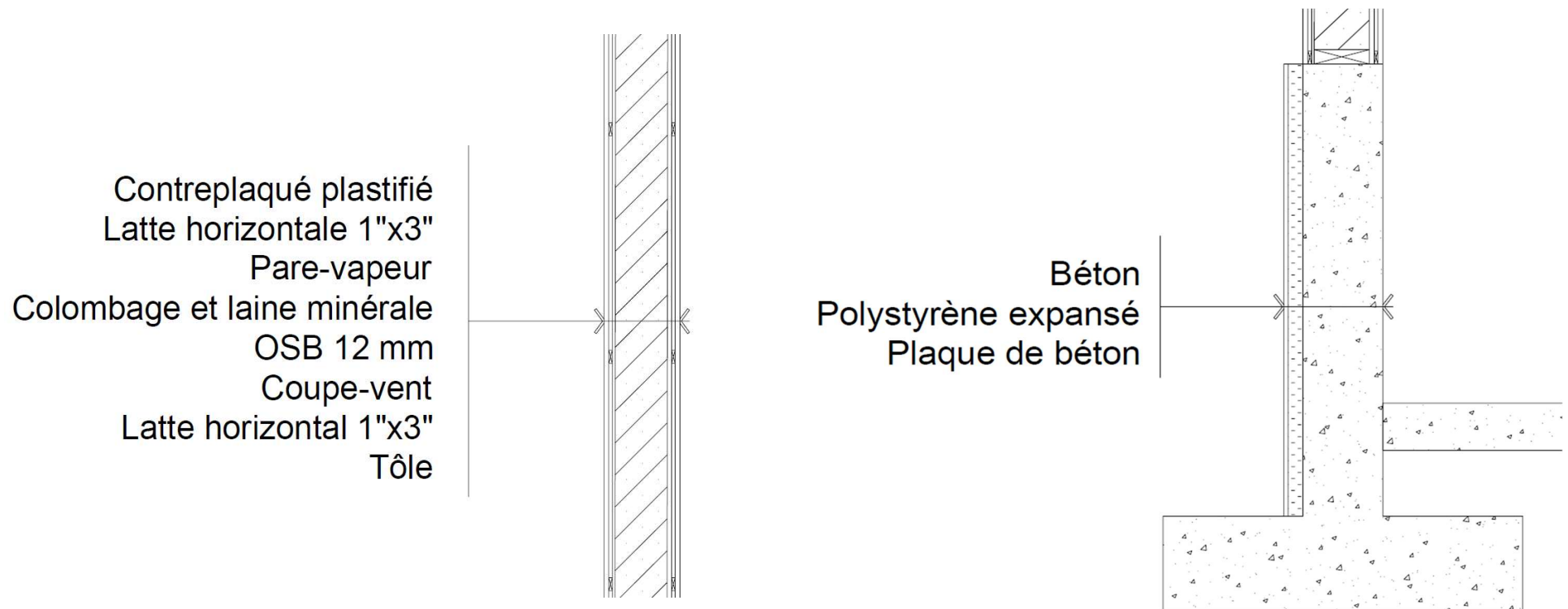


Figure 36 - Vues en coupe éloignée et rapprochées des matériaux pour les murs, le plafond et les fondations

Annexe D – Plans de la serre-étable

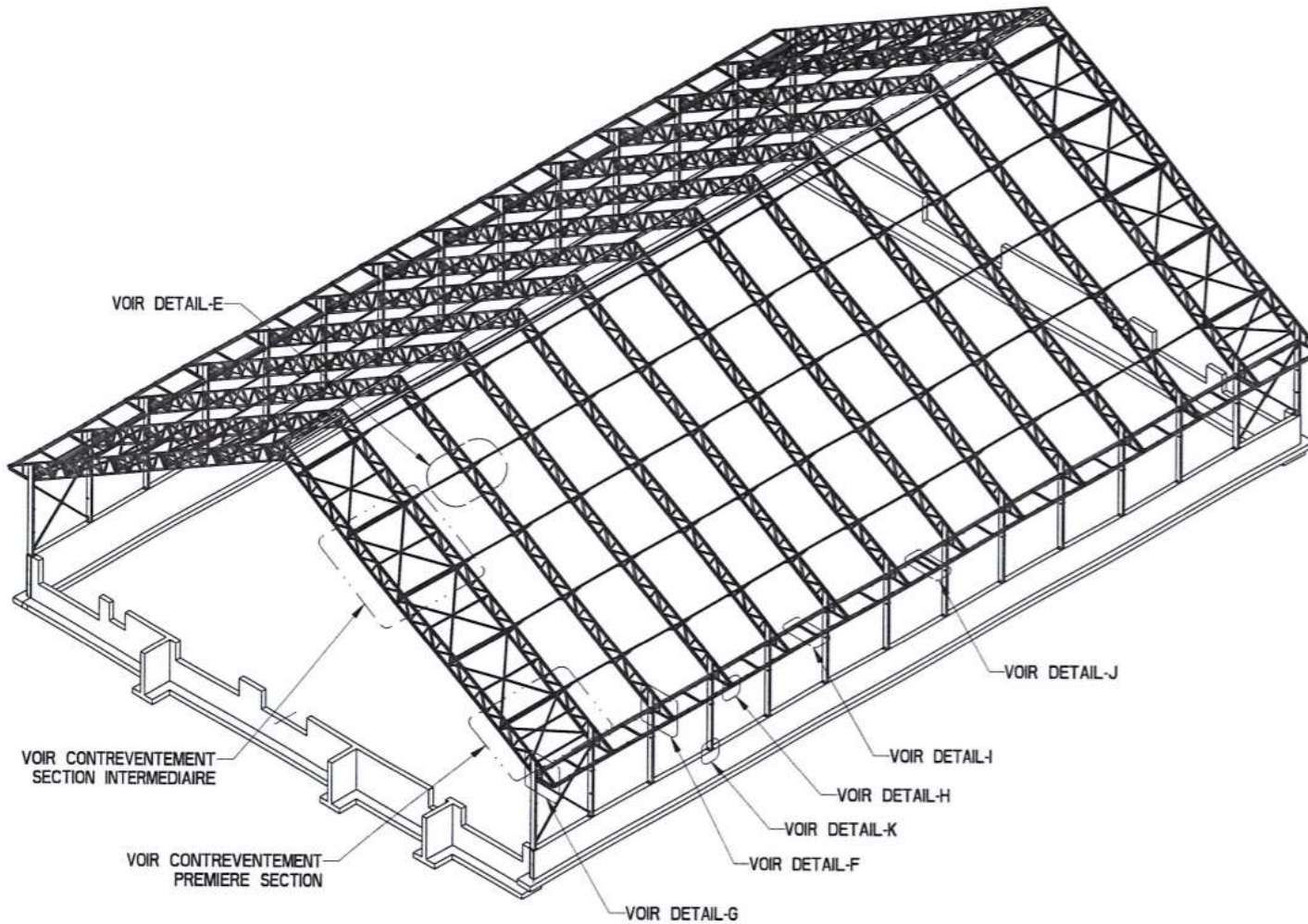


Figure 37 - Vue isométrique de la serre-étable

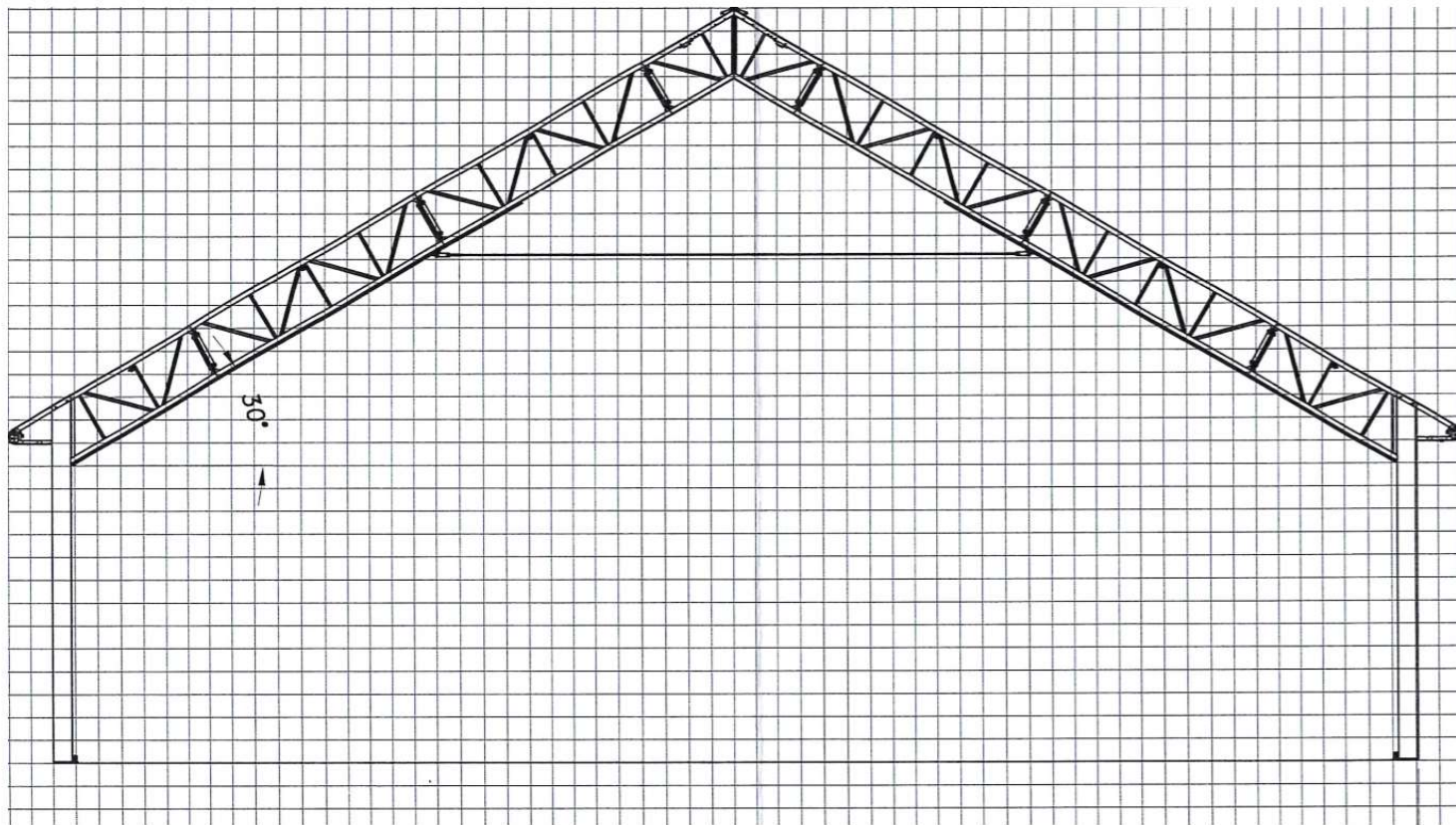


Figure 38 - Structure d'acier composant la serre-étable

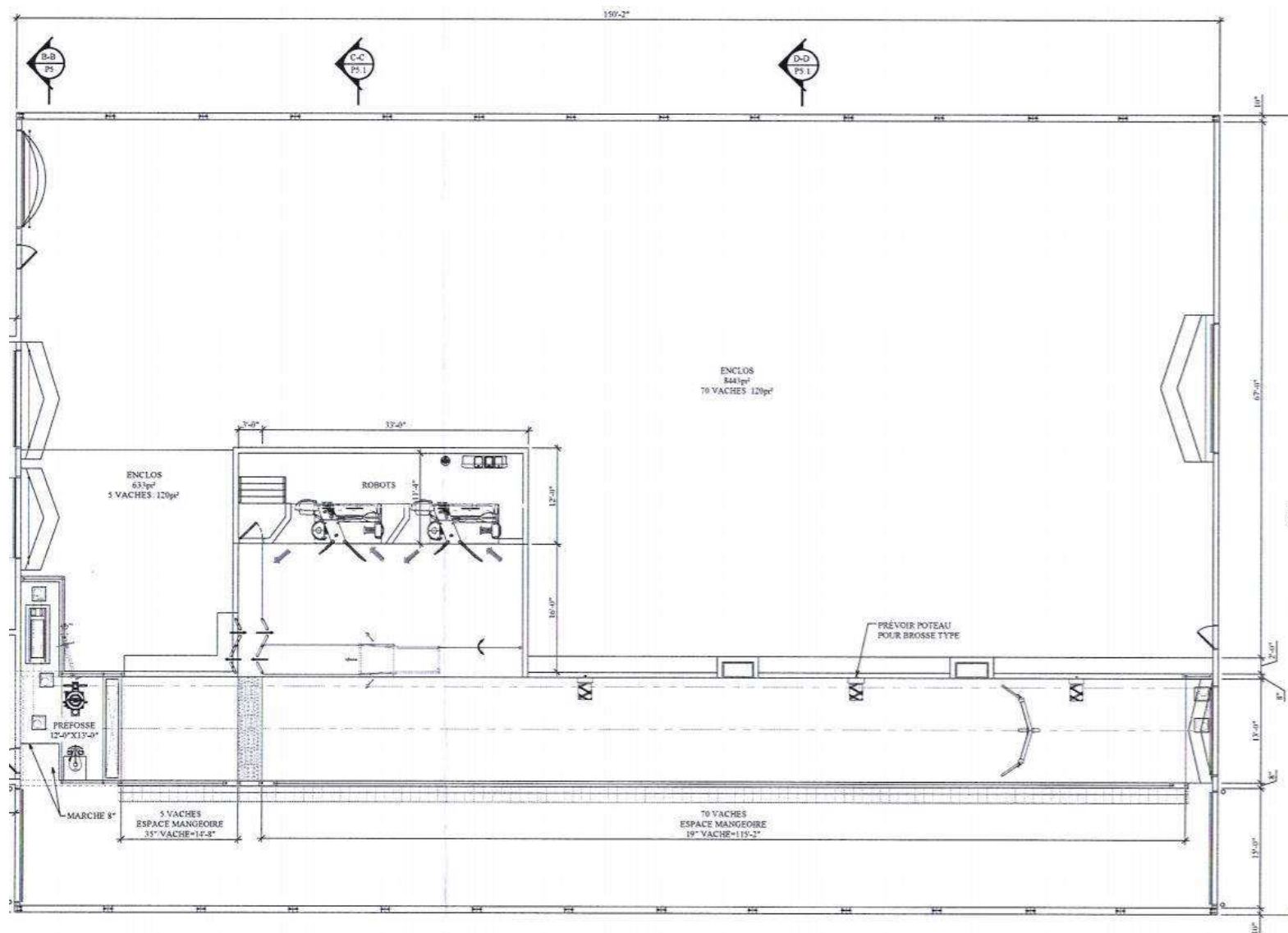


Figure 39 - Aménagement intérieur de la serre-étable

Annexe E – Tableaux résumés des coûts

Tableau 27 - Coût de chaque matériau utilisé pour l'étable conventionnelle

Fonctions	Quantité	Taille	Matériaux	Prix unitaire (\$)	Prix total (\$)
Charpente					
Colombage	790	2'' x 6'' x 10'	SPF No.1/No.2	6,77	5348,30
Lisse	36	2'' x 4'' x 18'	MSR, 2100Fb-1,8	13,79	496,44
Poteau court porte garage	6	2'' x 6'' x 12	SPF No.1/No.2	8,19	49,14
Poteau court porte homme	10	2'' x 6'' x 8'	SPF No.1/No.2	4,45	44,50
Poteau long porte garage	12	2'' x 6'' x 20'	SPF No.1/No.2	13,54	162,48
Poteau long porte homme	10	2'' x 6'' x 10'	SPF No.1/No.2	6,77	67,70
Linteau porte garage	6	2'' x 10'' x 12'	SPF No.1/No.2	8,19	49,14
Linteau porte homme	20	2'' x 6'' x 4'	SPF No.1/No.2	2,23	44,50
Linteau toile	26	5,2'' x 16'' x 12'	Parallam 2.0E	441,60	11 481,60
Linteau axes intérieurs	24	7'' x 24'' x 20'	Parallam 2.0E	1304	31 296
Structure acier					
Poteau acier axes extérieurs	26	4'' x 4'' x 3/16'' x 8'	A500	110,92	2883,92
Poteau acier axes intérieurs	22	4'' x 4'' x 1/16'' x 24'	A500	272,40	5992,80
Assemblage poteau acier axes extérieurs	26	4'' x 4''	CCQ64SD2.5 Simpson Strong-tie	87,91	2285,66
Assemblage poteau acier axes intérieurs	22	4'' x 4''	CCQ7.1-4SD2.5 Simpson Strong-tie	115,02	2530,44
Plaque acier axes extérieurs	26	6'' x 10'' x 5/16''	Type R	En fonction de masse d'acier	6915,44
Plaque acier axes intérieurs	22	6'' x 10'' x 7/16''	Type R	En fonction de masse d'acier	8194,53
Composantes des murs					

Diaphragme	763	4' x 8'	OSB	11,49	8766,87
Mur de refend	145	4' x 8'	OSB	11,49	1666,05
Entremise	6996	2'' x 6'' x 10'	SPF No.1/No.2	6,77	47 362,92
Laine minérale	250	122,7 pi ²	R20	49,99	12 497,50
Pare-vapeur	31	1000 pi ²	Polyéthylène	40,65	1260,15
Coupe-vent	16	300 pi ²	Tyvec	39	624
Contre-plaqué plastifié	45	18' x 36'	Acrylique	40,99	1844,55
Tôle de mur	4629 pi ²	4629 pi ²	Tôle	5,50	25 459,50
Porte de garage	3	10' x 12'	-	3000	9000
Porte d'homme	5	3' x 7'	-	69,99	349,95
Toiture					
Tôle de toit	24 400 pi ²	24 400 pi ²	Tôle	5,50	134 200
Ferme de toit	101	-	SPF No.1/No.2	495	50 000
Fondation					
Excavation	24 000 pi ²	24 000 pi ²	-	-	70 000
Béton	14926,4 pi ²	14926,4 pi ²	Béton	10	149 264
Acier armature	385	20'	15M	16,80	6468
Goujon	47	20'	10M	8,50	399,50
Lame d'étanchéité	13	75'	Membrane redzone	42,49	552,37
Polystyrène	100	4' x 8'	Polystyrène	32,85	3285
Autres					
Latte	645	1'' x 3'' x 14'	SPF No.1/No.2	1,50	967,50
Moulure et soffite	-	-	-	-	3000
Coût total matériaux	604 810,34 \$				

Tableau 28 - Coût de chaque équipement dans l'étable conventionnelle

Fonction	Quantité	Taille	Prix unitaire	Prix total (\$)
Ventilation				
Cheminées carrées de plafond	10	0,31 m ²	41,99 \$/m ²	129,89
Toile soufflée	154' x 7' x 2 murs	154'	135 \$/pi ²	41 580
Ventilateur à débit élevé et à faible vitesse	4	14'	4520 \$	18 080
Abreuvement et mangeoire				
Abreuvoir réversible	10	-	850 \$	8500
Mangeoire diagonale	272 pi	272 pi	36 \$/pi	9762
Logettes				
Tapis à vache	96	-	290 \$	27 840
Séparateur de logettes	96	-	250 \$	24 000
Raclette				
Racleur droit	4	-	45 000 \$	180 000
Barrière extensible bout de raclette	8	-	240 \$	1920
Robot de traite				
Lely Astronaut A4	2	-	250 000 \$	500 000
Barrière anti-retour	4	-	300 \$	1200
Coût total équipement	813 042 \$			

Annexe F – Protocole et horaire de la prise de mesures

Horaire projeté de la journée

- 8h15 : Départ de l'Université vers l'IRDA
- 8h30 : Départ IRDA
- 9h00 : Arrivé à la ferme Majestein
- 10h30 : Départ vers la ferme Rodajean + Dîner (30min)
- 13h00 : Arrivée ferme Rodajean
- 13h30 : Début prise de mesures
- 14h45 : Départ vers Université Laval
- 16h30 : Dépôt matériel à l'IRDA
- 16h45 : Arrivée Université Laval

Prise de mesures

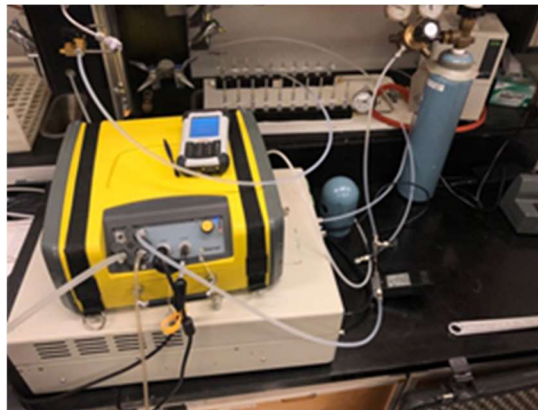
Démarrage

Dx 4040

À noter, la batterie du FTIR dure environ deux heures. Une mise à zéro est nécessaire après chaque ouverture du FTIR.

- 1) Brancher le fil alimentation
- 2) Ouverture de l'appareil (ON)
- 3) Attendre 20 minutes pour que l'appareil se réchauffe :
 - a. Connecter la sonde dans la sortie « *sample in* »
 - b. Connecter le tube plus mou et jaunâtre dans la sortie « *sample out* »
 - c. Ouverture du dispositif d'affichage
 - d. Connecter le manomètre sur la bonbonne d'azote et serrer avec clé à mollette

- e. Connecter le débitmètre sur le manomètre et le brancher
 - f. Ouverture de la valve de la bonbonne de la bouteille d'azote
 - g. Ouverture de la valve du manomètre
 - h. Ajuster le débit de gaz à 2 L/min à l'aide de la valve du manomètre
- 4) Une fois les 20 minutes écoulées, connecter la sortie du débitmètre sur le port zéro « gas » du FTIR
 - 5) Sur le dispositif d'affichage, appuie sur « *Press screen to start* »
 - 6) Appuyer sur « *Zero* », attendre le chargement (environ 3 minutes)
 - 7) Le zéro effectué, déconnecter le débitmètre du port zéro
 - 8) Fermer la valve du manomètre
 - 9) Fermer la valve de la bonbonne
 - 10) Laisser la pression baisser
 - 11) Défaire les branchements



Exemple de branchement pour le démarrage

Prise de mesures

Dx 4040

- 1) Prendre une mesure initiale à l'extérieur
- 2) Sur le dispositif d'affichage, appuyer sur Start

- 3) Noter l'heure de départ
- 4) Noter l'emplacement de la prise de mesure sur le plan de ferme
- 5) Noter les résultats à chaque minute et le résultat final à la fin de la cinquième minute
- 6) Appuyer sur Stop après chaque intervalle de mesure (5 min)
- 7) Prendre 5 autres points (près robot de traite, milieu litière compostée, allée alimentation, près du mur où la litière compostée, etc.)
- 8) Fermer le FTIR et défaire les branchements

Kimo

Effectuer en simultané et aux mêmes endroits que les mesures de concentrations en gaz

- 1) Appuyer sur « *ON* »
- 2) Connecter fil spirale sur un des deux ports
- 3) Appuyer sur « *Campagne* »
- 4) Identifier le projet
- 5) Sélectionner le mode « *Auto* » et un intervalle de prise de mesures de 1 minute
- 6) Appuyer sur « *Mesure* »
- 7) Prendre les mesures
- 8) Noter les résultats, l'heure et la position

Sper 840020

- 1) Connecter le capteur au luxmètre
- 2) Appuyer sur le bouton « Power »
- 3) Sélectionner les unités désirées en appuyant sur « Lux/FC »
- 4) S'assurer que le capteur est recouvert du capuchon opaque
- 5) Appuyer sur la touche « Zero » et attendre que l'appareil affiche une valeur de zéro

- 6) Retirer le capuchon opaque
- 7) Amorcer la prise de mesures en appuyant sur « Range » et sélectionner une étendue de mesure. Si l'appareil affiche « - - - », changer l'étendue de mesure.
- 8) Appuyer sur « Hold » pour geler et afficher la mesure
- 9) Noter le résultat