

Cultivons l'avenir, une initiative fédérale–provinciale–territoriale



Agriculture et
Agroalimentaire Canada

Agriculture and
Agri-Food Canada

Canada

Agriculture, Pêcheries
et Alimentation

Québec



Programme d'appui pour un secteur agroalimentaire innovateur

Installation et évaluation d'un système de récolte de foin sec en vrac (Rapport de projet)

Ferme Hengil SENC
436, rang 1
Saint-Hilarion (Québec) G0A 3V0

Steve Tremblay et Jocelyn Marceau ing.

Collaborateurs :

Alain Fournier agr., Philippe Savoie ing., René Morissette ing., Sharon Boisvert agr.
Isabelle Tessier agr.

Décembre 2012

État de situation :

La ferme Hengil SENC est une entreprise laitière spécialisée en production laitière. Cette entreprise possède un des rares troupeaux de vaches canadiennes au Québec où tout le volume du lait est acheminé à la laiterie Charlevoix afin d'y être entièrement transformé en fromage de spécialité, dont le fromage « Le 1608 ».

D'ailleurs, cette entreprise doit respecter les exigences d'un cahier des charges pour produire un lait fromager spécifique et unique. Les principales exigences sont de produire uniquement à partir de vaches de race canadienne, mais surtout, d'alimenter les bovins laitiers d'une manière bien spécifique. À cet effet, les bovins laitiers doivent être alimentés principalement de fourrages secs de qualité.

Dans la région de Charlevoix, il est très difficile d'avoir une fenêtre de temps sec et ensoleillé suffisamment longue (3-4 jours d'affilée) pour la production de foin sec. Actuellement, le producteur manœuvre tant bien que mal dans ces conditions à produire des balles de foin demi-sec enrubannées. Cette méthode d'entreposage de fourrages secs est loin d'être idéale, puisqu'elle est toujours liée aux conditions climatiques du moment et qu'elle ne permet pas d'obtenir la qualité recherchée pour la production d'un lait fromager. Ce fourrage est également à risque de produire des moisissures indésirables à la fabrication d'un fromage de qualité. Ce que l'on peut observer dans les régions de montagnes de France, de Suisse et d'Autriche où les conditions climatiques sont comparables à celles de plusieurs régions du Québec et propice pour la production de fromage d'appellation, c'est que le séchage du foin en vrac en grange est une méthode fortement répandue. Il est d'ailleurs possible de réaliser l'ensemble des tâches et des manœuvres pour obtenir des fourrages entreposés en moins de 48 heures, ce qui difficilement réalisable en petites balles carrées.

L'alternative proposée dans ce projet consiste à récolter le foin en vrac, le sécher et le servir sous cette forme. L'élément-clé pour obtenir du succès est le séchoir. Le développement de séchoir solaire performant jumelé à l'usage d'une autochargeuse pour la récolte de foin en vrac et d'un système de manutention en grange (griffe) ont permis de résoudre cette problématique en Europe. En effet, ce système intégré permet d'engranger du foin de 30 à 40 % de teneur effective en eau (TEE) dont le séchage est complété artificiellement dans des cellules de séchage adaptées à cet usage. Ainsi, il est désormais possible par cette technique de faire du foin en 36 à 48 heures. Cela apporte beaucoup plus de flexibilité aux opérations, une réduction de la main-d'œuvre et surtout une assurance de la qualité constante des fourrages pour la production d'un fromage de qualité.

Objectifs du projet :

Le projet consiste d'abord à construire et à aménager un séchoir solaire selon les critères recommandés en Europe, d'acquérir l'autochargeuse et la griffe de manutention. Afin de vérifier la faisabilité de la technique, un suivi de recherche a été réalisé et consistait à vérifier la vitesse et la qualité de séchage. Finalement, les coûts de construction et d'opération y sont présentés. Voici les objectifs spécifiques et l'ordre de présentation du rapport:

Partie I : Construction et performances techniques

1- Construction du séchoir à capteur solaire selon les spécifications qui sont actuellement en application en France (SEGRAFO : Groupe technique sur le SEchage en GRAnge des FOurrages);

2- Performance technique : Évaluer les débits, les pressions statiques et l'homogénéité de distribution de l'air;

3- Taux de captage d'énergie, gain thermique et bilan énergétique global;

Partie II : Réaliser la récolte de foin vrac, sécher et évaluer la qualité des fourrages :

4- Évolution du séchage.

5- La qualité de séchage du foin par comparaison aux standards connus.

Partie III : Les coûts

6-Coût de construction et d'aménagement du séchoir

7-Coût d'opération du séchoir

Partie I : Construction et performances techniques

1-Aménagement :

La méthode de manutention et de séchage adaptée dans ce projet est en grande partie tirée de ce qui se fait en Europe, notamment en Suisse et plus particulièrement en France, comme préconisée par le groupe SEGRAFO. Étant donné les installations de la Ferme Hengil, un nouveau bâtiment de 15 x 34 x 6,5 m de hauteur a été érigé et adapté pour sécher et entreposer environ 200 tonnes de foin (Fournisseur : Houle). Le bâtiment est une structure en acier et est conçu pour supporter la charge de la griffe à foin dans toutes les situations d'opération. Le plan du séchoir est présenté aux figures 13, 14 et 15. Le bâtiment dispose de 2 cellules de séchage qui serviront aussi d'entreposage pour le foin séché, d'un débarcadère central qui sert pour la réception du foin frais et d'une petite section de 12 m² pour la reprise et le transfert vers la vacherie (fig 1). La grange à foin est liée à l'étable via un corridor. Pour la reprise du foin, la griffe ramènera le foin près du corridor pour être repris avec un tracteur de type 'Bobcat' pour la distribution vers les allées d'alimentation.

Le débit de ventilation a été établi à 24,3 m³/s pour les deux cellules, ce qui correspond à 121,5 L/s-tonne, lorsque les deux seront remplies à capacité. Ce débit peut être distribué en tout ou en partie aux deux cellules via une trappe de distribution de type guillotine à l'entrée de chacun des plenums de distribution d'air vers les deux cellules correspondantes. Ainsi, en dirigeant la totalité du débit vers une cellule, le débit de ventilation passerait 243 L/s-tonne.

Électricité : L'entreprise n'est pas desservie par une alimentation électrique triphasée. Pour ce débit relativement élevé, il devenait quasi impossible d'obtenir ce débit avec une alimentation

monophasée. Une transformation électrique à conversion de phase a été nécessaire afin d'obtenir une alimentation de 575 V / 3 phases. Cela a nécessité un investissement additionnel important. Pour assurer une meilleure sécurité de fonctionnement, le choix s'est porté sur 2 ventilateurs au lieu d'un seul : Cook 402 CPS d'une capacité de 25500 pi³/min @ 2,4" d'eau de pression statique.



Figure 1: Vue de l'intérieur d'une des deux cellules . On remarque le caillebotis en place et qui couvre toute la surface sauf la périphérie à une distance de 1 m du mur. Les murs au coin de la cellule correspondent à la chûte à foin pour la reprise dont les dimensions sont de 3,5 x 2,5 m.

Tous les travaux d'aménagement ont été complétés vers le 10 septembre et à cette date une seule cellule était fonctionnelle. Les résultats qui suivent proviennent donc de la performance d'une seule des deux cellules qui sont identiques sauf au niveau de la surface 207 m² vs 193 m². Les résultats proviennent de cette dernière.

2- Performance technique :

Avant la mise en marche, le débit ou la vitesse de l'air a été vérifiée à différents points en amont des ventilateurs de façon à respecter des pertes de charge raisonnables (maximum 60 Pa ou 6 mm d'eau PS). À sa pression nominale d'opération 600 Pa, l'extraction d'air provenant du capteur solaire devrait correspondre à moins de 10 % du total soit 60 sur 600 Pa.

Résultats :

La configuration initiale des ventilateurs a du être modifiée. Initialement, leur vitesse de rotation était de 801 rpm. Or, à cette vitesse de rotation, les moteurs devenaient en surcharge. Il a été nécessaire de réduire le diamètre de la poulie sur les moteurs, ce qui a contribué à réduire la performance anticipée. Le tableau suivant présente la performance d'un des deux ventilateurs à différentes dates d'opération et aussi à différentes pressions statiques.

Tableau 1: Performance (Q en m³/s) d'un des deux ventilateurs Cook CPS 400 sous différentes conditions ou selon les hauteurs différentes de foin dans la cellule. La pression statique a été mesurée en amont (PS-) et en aval du ventilateur (PS+) en mm d'eau

	12-sept	14-sept	17-sept	29-sept	02-oct	04-oct
État h= (m foin)	0	2	4	4	3,5	3,5
# ventilateur	1	1	1	1	2	2
PS- eau	-3,5	-3,3	-3	-2	-5	-5
PS+eau	2	4,4	10,4	21	45	49
PS tot	5,5	7,7	13,4	23	50	54
Q (mc/s)	14,5	14,1	13,3	12,4	9,24	9,2

Note : Les 2 et 4 octobre, les deux ventilateurs fonctionnaient. Seul le débit d'un des deux est présenté. Le second ventilateur débitait 10,33 m³/s, ce qui porte le total réel à 19,57 m³/s.

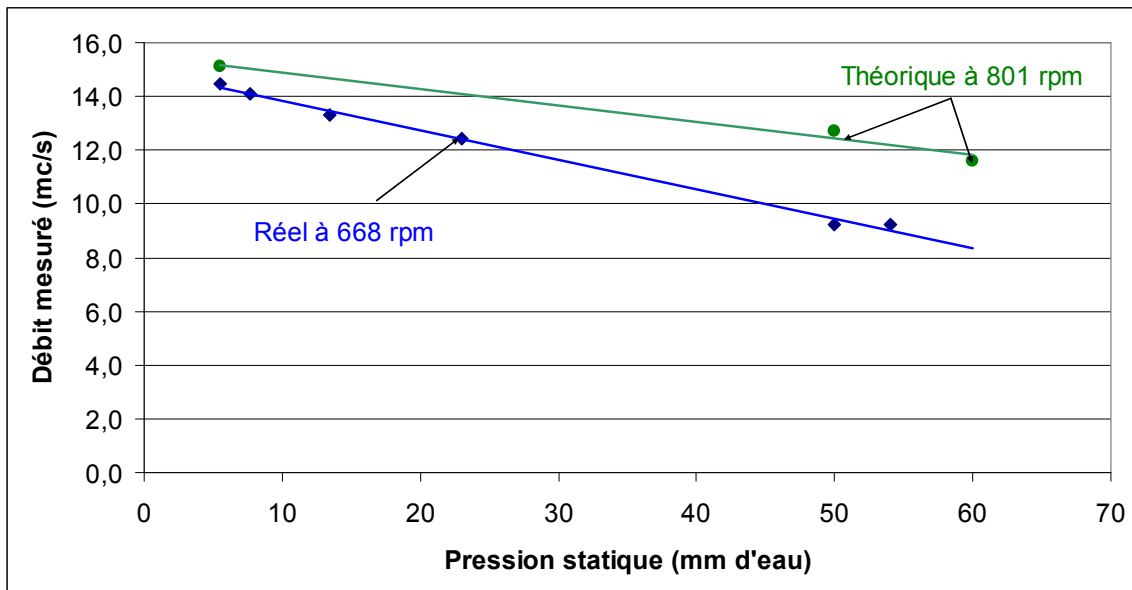


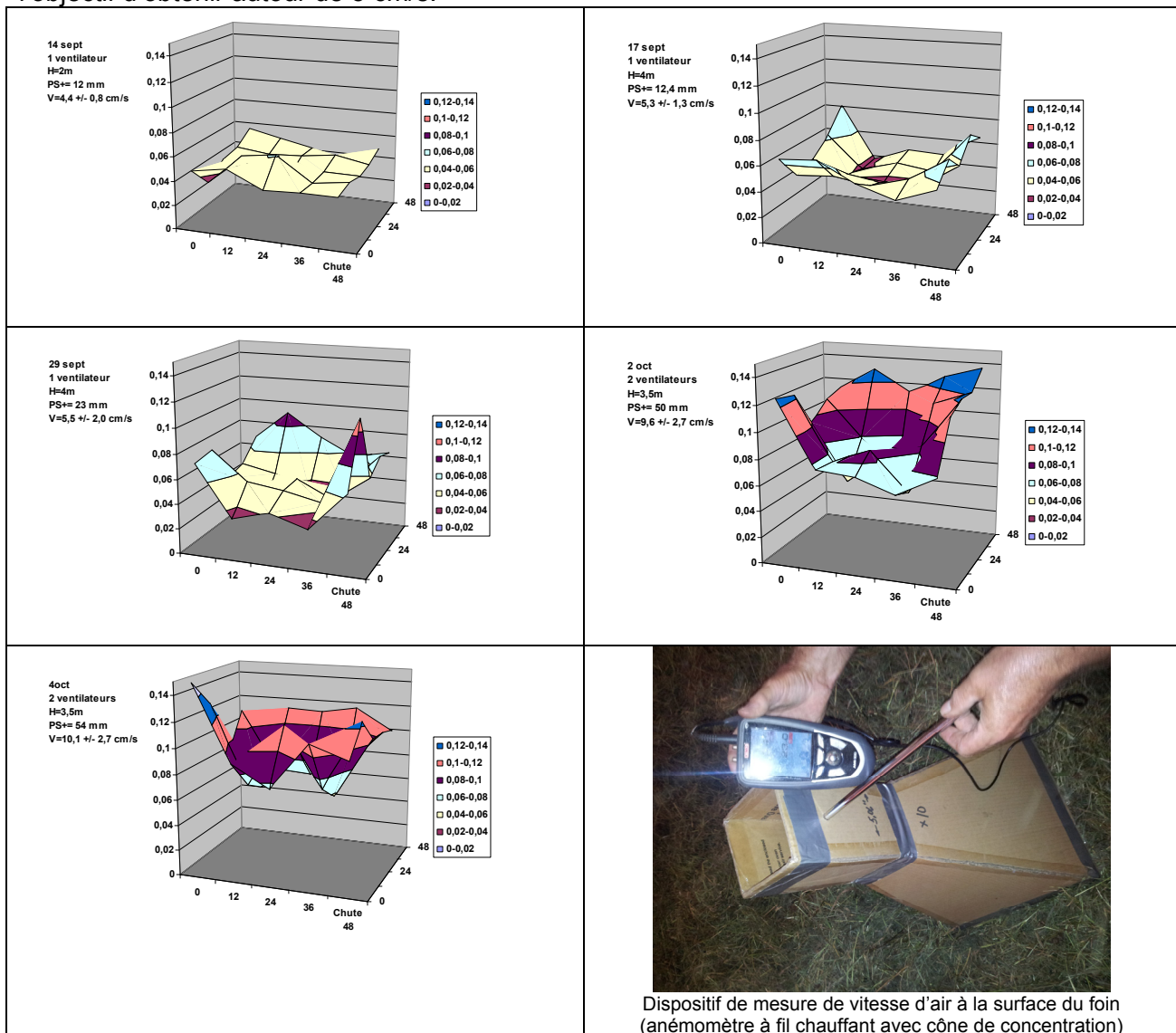
Figure 2: Débit réel de ventilation mesuré (m³/s) d'un des deux ventilateurs Cook CPS 402 selon la pression statique exercée. Ces ventilateurs ont un moteur 20 HP alimenté par du 575 V / 3 phases.

Vu les problèmes électriques rencontrés au début, le second ventilateur a été mis en marche seulement le 2 octobre. Instantanément, la pression statique a grimpée de 23 à 54 mm d'eau PS alors que la cellule contenait approximativement 4 m de foin. La pression négative en amont des ventilateurs a atteint -5 mm d'eau, ce qui est sous le seuil de -6 mm qui avait été fixé initialement. La vitesse maximale enregistrée dans les corridors des solives de toit a été de 3,5 à 4 m/s avec 2 ventilateurs en fonctionnement. Cela correspond à l'objectif d'obtenir une vitesse d'air d'au plus 4 m/s en amont des ventilateurs. Les débits mesurés à la sortie des deux ventilateurs étaient de 9,2 et de 10,3 m³/s pour un total de 19,57 m³/s @ 54 mm d'eau.

Homogénéité de distribution :

L'homogénéité de distribution de l'air a été évaluée avec différentes hauteurs de foin de même qu'en situation de débit à mi-régime (1 ventilateur) et à plein régime (2 ventilateurs). Ces données doivent permettre de valider les valeurs prévues au design, dont la vitesse d'air théorique verticale à travers la masse qui devrait être de 0,05 m/s à 0,1 m/s.

Avec un seul ventilateur, lorsqu'il y avait peu de foin 2 m, la répartition est presque parfaite. Avec 4 m de foin, mais sans compaction (17 sept), la pression augmente légèrement, et l'écoulement de l'air s'accroît le long des murs. Cela prend plus d'ampleur, lorsque le foin se compacte et pour une même hauteur avec l'ajout de foin frais (29 sept). En fonctionnant avec un seul ventilateur, la vitesse verticale de l'air se situe autour de $5,5 \pm 2$ cm/s et cela correspond à l'objectif d'obtenir autour de 5 cm/s.



Distribution et vitesse verticale de l'air dans les cellules mesurée à 25 points répartis à la surface Sur le graphique, l'air provenait de la base du mur à gauche (ouverture continue de 400 mm x 12000 mm).

Avec deux ventilateurs en opération (4 octobre), la vitesse moyenne a passé à $10,1 \pm 2,7$ cm/s, ce qui correspond aussi à l'objectif prévu. Le premier mètre près du mur est par contre une zone de fuite qui semble prendre de l'importance au fur et à mesure que la pression statique augmente. À la lumière de ces observations, la disposition des caillebotis à 1 mètre des murs n'est sans doute pas un écart excessif car cette zone semble plus ventilée qu'ailleurs. Y aurait-il avantage à laisser une périphérie libre de plus de 1 m ?

Dans l'ensemble, on peut dire que l'homogénéité est très bonne puisqu'il y eu au plus 30% de variation par rapport à la moyenne. Là où il y avait des monticules de foin, les valeurs de vitesse étaient moindres¹. Règle générale, la périphérie de la cellule semble moins compactée que le centre, dû au fait que le foin y est déposé avec plus de prudence vue la proximité du mur. Cela peut expliquer en partie que les vitesses d'air sont supérieures près des murs. On remarquait aussi que les plus basses vitesses d'air correspondaient aux endroits où il y avait des buttes de foin par rapport à l'ensemble. Il faut vraiment porter attention à bien répartir le foin en surface pour éviter ces écarts qui provoquent moins de ventilation à ces endroits et un risque accru de chauffage du fourrage.

Le caillebotis laisse une hauteur libre de 400 mm (16") à l'entrée des caillebotis et au moins 315 mm (12,5") en tout point sous les caillebotis. Cet arrangement, ne semble pas provoquer de perte de charge significative, même lorsque la ventilation est maximale. Le design a été réalisé de façon à respecter une vitesse maximale de l'air de moins de 5 m/s (1000 pi/min) en tout point de l'installation en aval des ventilateurs. En respectant cette contrainte, la distribution semble excellente.

3- Taux de captage d'énergie, gain thermique et bilan énergétique global.

Un système d'acquisition automatique CR-1000 de Campbell Scientific recueillant les données en temps réel à 15 minutes d'intervalles a été utilisé pour faire ces mesures. Voici une brève description des capteurs :

- 3 sondes d'humidité relative/température HC2-S3-L (CSI): entrée d'air, plénum, sortie d'air;
- Radiation solaire sur le toit PI-100 (CSI);
- Anémomètre pour le vent extérieur 013 (CSI);
- Anémomètre pour la vitesse d'air sous le caillebotis 013 (CSI) (1 emplacement);
- Un capteur d'ampérage commun sur les 2 ventilateurs CS-100 (CSI);
- 7 thermocouples - type T placés dans les différents niveaux de foin

Captage solaire :

Le graphique suivant démontre le captage réel d'énergie du système. La toiture est faite de tôle émaillée noire d'une superficie totale de 592 m² dont la surface effective (ventilation sous sa surface) de captage est de 553 m². Horizontalement, cette superficie correspond à 503 m². L'énergie reçue au niveau de la toiture a été évaluée sur la base de la superficie horizontale de

¹ La répartition du foin en surface n'est pas toujours parfaite. Là où il y avait des buttes de foin, la vitesse de l'air sur la crête était toujours moindre par rapport à la base des buttes. Cela démontre l'importance de bien répartir le foin en surface avec la griffe à la fin de la journée de récolte

503 m². Compte tenu du taux de radiation mesuré au capteur, les points observés correspondent à l'augmentation de la chaleur sensible de l'air entre l'entrée et le plénum positif.

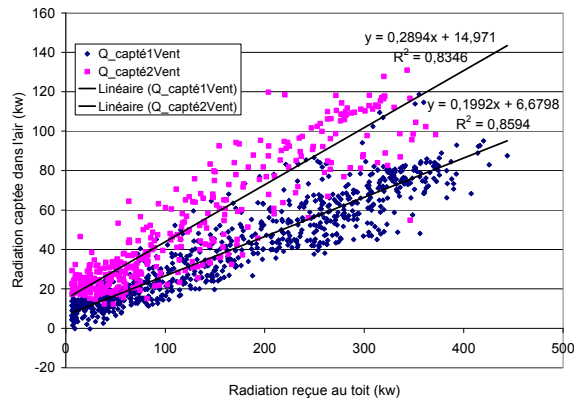


Figure 3 Taux de captage solaire lorsque 1 ou 2 ventilateurs étaient en fonction. Les données nocturnes et à moins de 10 w/m² ne font pas partie du graphique

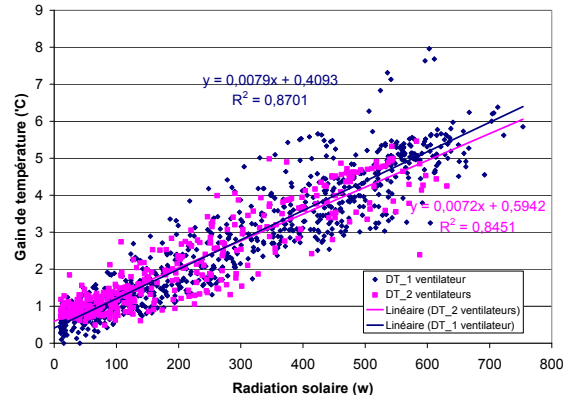


Figure 4: Élévation de température dans le capteur en fonction du taux de radiation (w/mc en X). Les points en bleus correspondent au fonctionnement d'un seul ventilateur et ceux en rose lorsque les deux ventilateurs étaient en marche

Avec un ventilateur en fonctionnement, l'efficacité de captage a été de l'ordre de 20%. Par exemple, lorsque la toiture reçoit 300 kw², le captage a été de l'ordre de 66 kw. Lorsque les deux ventilateurs fonctionnaient, l'efficacité de captage passe à 29%. Dans la même situation, plus de 102 kw était capté. L'augmentation de l'efficacité s'explique par le fait que le débit a presque doublé avec l'ajout du second ventilateur (19,8 m³/s vs 10,2 m³/s) et ce sans que le gain de température ait diminué (figure 4). L'augmentation de la vitesse de l'air sous la tôle favorise l'augmentation du taux de transfert de la chaleur et donc un gain de température similaire. Quelques mesures de vitesses d'air ont été prises dans les corridors d'air. En moyenne, avec un seul ventilateur en fonction, la vitesse s'établissait à 2 - 2,5 m/s (21 sept) et à deux ventilateurs, elle s'établissait 3,5 - 4 m/s (2 oct).

Le tableau suivant présente un bilan sommaire de l'opération du séchoir. Sur 44 jours, un ou deux ventilateurs ont fonctionné pendant 628,75 heures dont 223 heures avec deux ventilateurs simultanément. L'énergie réelle captée a été de 20011 kwh³ et la consommation électrique de 7486 kwh. L'énergie électrique des moteurs est transmise à l'air. À un ventilateur, l'élévation de température sans radiation solaire a été selon le modèle calculé de 0,4°C et à deux ventilateurs, la température de l'air s'élevait à près de 0,6 °C (Figure 4). Pour la durée de la période de séchage, l'apport de chaleur au foin se chiffre 20011 kwh. En chauffage, la valeur de l'apport d'énergie se chiffrerait à \$1400,77 avec une consommation électrique de 524\$. En d'autres termes, l'apport énergétique a été de \$2,23/h pour une consommation électrique de \$0,83/h. Les ventilateurs opéraient à 11 ampères alors qu'ils pourraient opérer à 18 ampères. Il y a probablement lieu de revenir aux poulies originales de 150 mm pour le ramener à 801 rpm, puisqu'il semble y avoir une très bonne marge de sécurité en ampérage.

² Le calcul a été effectué en multipliant le taux de radiation x 503 m² (surface horizontale)

³ Chaleur sensible captée : 9,24 m³/s ou 19,57 m³/s x Écart de température de l'air x Densité de l'air

Tableau 2: Bilan énergétique pour les 629 heures de fonctionnement du séchoir

	Heures d'opération	Compteur électrique	Energie sensible transmise
	(h)	(kwh)	(kwh)
10-sept	0	14	0
24-oct	628,75	7500	20011
Total		524,02 \$	1 400,77 \$
\$/h		0,83 \$	2,23 \$

-628,75 heures d'opération dont 223 heures à deux ventilateurs
 -Valeur basée sur un tarif \$0,07 / kwh

Partie II : Réaliser la récolte de foin vrac, sécher et évaluer la qualité des fourrages :

Les observations ont été réalisées sur une seule des deux cellules de séchage. Les mesures de performance de séchage ont été effectuées sur 3 niveaux de la cellule correspondant à une fournée (une journée de récolte). Trois fournées ont été réalisées entre le 13 et le 28 septembre et ont permis de remplir une cellule presque complètement. Deux de ces fournées ont été réalisées sur 2 jours consécutifs (13 et 14 sept) et (16 et 17 sept). Pour fin d'analyse, les trois fournées sont identifiées aux dates illustrées au tableau suivant :

Tableau 3: Résumé des opérations de récolte

Date	Type de foin	Nombre de chargements (m ³)	Matière sèche initiale -%	Position cellule Hauteur (m)
14 septembre	2' coupe graminées	15 (470)	83±2	1
17 septembre	3' Coupe graminées	15 (470)	73±4	2,5
28 septembre	3' coupe Gram & trèfle	7 (220)*	63±15*	3,5
TOTAL :		37 (1158)		
*Note : Les 5 premiers chargements réalisés le 28 septembre sont à un taux de 63% MS. Les deux derniers chargements réalisés étaient à un taux de 38% MS. L'analyse des données est séparée pour les deux lots de foin du 28 septembre.				

Ainsi, pour les trois fournées différentes (fond de cellule – 1 m (14 sept), milieu – 2,5 m (17 sept) et haut de cellule – 4 m (28 sept)). La hauteur de foin après la dernière fournée était de l'ordre de 5 m. Toutefois, après compaction, la hauteur totale est passée à environ 3,8 m.

La quantité de matière sèche placée dans le séchoir a été estimée. L'estimation est basée sur des données recueillies le 28 septembre alors que 5 contenus d'autochargeuse à des taux de matière sèche variables ont été pesés (utilisation de 4 balances : une par roue). Le poids net du contenu varie de façon importante avec le taux de matière sèche. L'extrapolation de cette courbe permet d'estimer le contenu en matière sèche à 2147 kg, valeur qui a été considérée constante pour tout contenu d'autochargeuse. Cela peut être discutable, mais c'était le meilleur moyen de déterminer la quantité de MS récoltée⁴.

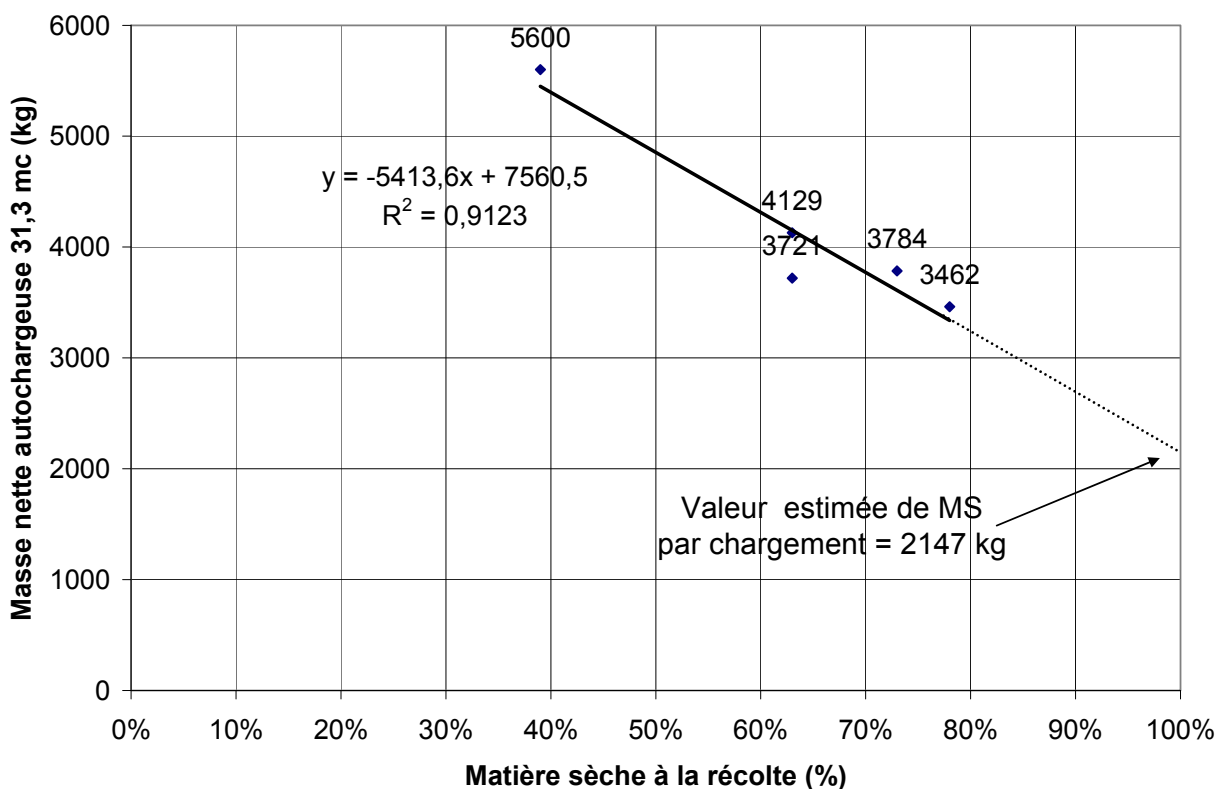


Figure 5: Poids net de chargement d'autochargeuse remplie selon le taux de matière sèche. Ces valeurs ont été recueillies une seule fois le 28 septembre sur 5 de 7 chargements. Chaque chargement a été pesé avec 4 pèse-roues en pesant les 4 roues du tracteur puis les 4 roues de l'autochargeuse avant déchargement en soustrayant le poids de l'ensemble à vide.

Le résumé journalier des différents chantiers de récolte pour remplir une des cellules de séchage indique que le contenu de 37 autochargeuses⁵ représentant 1158 m³ récoltés et placés sur le

⁴ La moyenne mathématique des 5 chargements est de 2518 ± 245 kg de matière sèche. Or, cette valeur semble plutôt élevée. La méthode par extrapolation apparaît plus conservatrice et réelle de la situation. C'est donc la valeur de 2147 kg qui a été considérée. Il y aurait lieu de faire plus de répétitions de lecture pour rendre cette valeur plus fiable.

⁵ L'autochargeuse utilisée Pottiger Europrofit 50 (50 m³) a un volume utile mesuré de 31,3 m³

séchoir avant compaction (tableau 4). Il est assumé que la quantité de foin correspond 31,3 m³ et à 2147 kg de MS par chargement. La quantité de matière sèche totale récoltée serait de 79 t MS. La compaction du foin est importante puisqu'immédiatement après la dernière fournée (28 septembre), la hauteur de foin atteignait près de 5 m de hauteur puis à 3,8 m de hauteur le 24 octobre, ce qui correspond à un volume de 749 m³. A ce volume, on peut ajouter approximativement 40 m³ au sol, en périphérie du caillebotis qui ne devrait pas être récupérer à la reprise. La densité moyenne estimée serait donc de 100,6 kg/m³ de MS (79400 kg / 789 m³) ou 117 kg/m³ de foin sec.

Le bilan de l'eau contenu dans le foin de même que l'eau retiré au séchage est présenté. Théoriquement, le foin frais contenait 30,4 tonnes d'eau dont 17,2 tonnes d'eau qui ont été retirées au séchoir.

Tableau 4 : Résumé journalier des interventions de remplissage de la cellule de séchage. Les valeurs en italique ont été calculées et les autres ont été mesurées

	13-sept	14-sept	16-sept	17-sept	28-sept	Cumulatif
Autochargeuses (n)	8	<i>7</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>7</i>	37
Cubage (mc)	<i>250,4</i>	<i>219,1</i>	<i>219,1</i>	<i>250,4</i>	<i>219,1</i>	1158,1
Cubage final (mc)						748,6
Masse humide (tonnes)	<i>20,7</i>	<i>18,1</i>	<i>19,2</i>	<i>23,6</i>	<i>28,3</i>	109,8
MS (tonnes)	<i>17,2</i>	<i>15,0</i>	<i>15,0</i>	<i>17,2</i>	<i>15,0</i>	79,4
Eau (tonnes)	<i>3,5</i>	<i>3,1</i>	<i>4,2</i>	<i>6,4</i>	<i>13,3</i>	30,4
Eau à retirer (tonnes)	<i>1,0</i>	<i>0,9</i>	<i>1,9</i>	<i>3,6</i>	<i>9,9</i>	17,2
Foin sec 88% (tonnes)	<i>19,7</i>	<i>17,2</i>	<i>17,3</i>	<i>20,0</i>	<i>18,4</i>	92,6
TMS début (%)	<i>83,1%</i>	<i>83,1%</i>	<i>78,3%</i>	<i>72,8%</i>	<i>63,2 et 38%*</i>	
Écart-type TMS (%)	<i>2,0%</i>	<i>2,0%</i>	<i>1,5%</i>	<i>3,9%</i>	<i>15,0%</i>	

*5 chargements à TMS 63,2% t
2 à 38%

Cubage= n x 31,3m³; Cubage final (hauteur finale =3,8 m); Masse Humide = MS + EAU ; MS=n x 2147 kg; EAU=(1-TMS) x MS / TMS; Eau à retirer (pour TMS=88%); TMS : Taux de matière sèche

4- Évolution du séchage.

Le taux de séchage a été calculé en utilisant les données provenant des sondes d'humidité relative dont l'une évaluait l'air à l'entrée du séchoir et l'autre était située dans le courant d'air sortant du bâtiment. La quantité d'eau dans l'air a été évaluée selon les équations⁶ pour de l'air à plus de 0°C. Le taux de séchage provient donc du calcul suivant :

$$\text{Taux séchage} = \text{Vent} \times (\text{Eau sortie} - \text{Eau entrée}) \times (1 / \text{Vol spe})$$

$$\text{Taux séchage} = (\text{kg/s});$$

$$\text{Vent} = \text{Taux de ventilation} - \text{valeur retenue} :$$

$$1 \text{ ventilateur} = 9,2 \text{ m}^3/\text{s} @ 25 \text{ mm d'eau}$$

$$2 \text{ ventilateurs} = 19,6 \text{ m}^3/\text{s} @ 54 \text{ mm d'eau}$$

⁶ Equations describing the physical properties of moist air, <http://www.conservationsphysics.org/atmcalc/atmoclc2.pdf>

Eau sortie = Concentration d'eau dans l'air de sortie (g/kg air)
 Eau entrée = Concentration d'eau dans l'air à l'entrée (g/kg air)
 Vol spe = Volume spécifique de l'air à l'entrée (m³/ kg air)

La figure suivante illustre l'évolution de la récolte et de la conduite de séchage sur une base journalière.

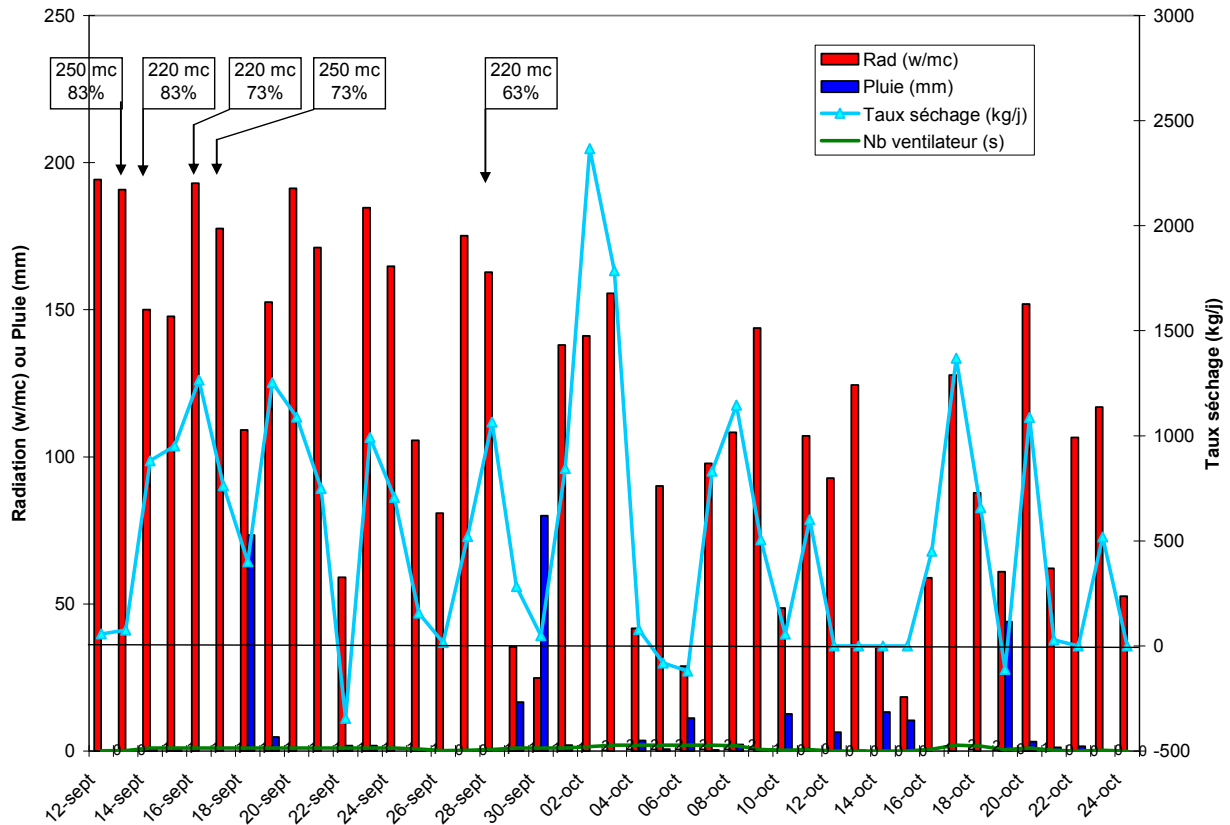


Figure 6: Du début de la récolte à la fin du séchage, ce graphique illustre la radiation solaire, la pluviométrie, le nombre de ventilateurs en fonctionnement et le taux de séchage estimé. Le taux de séchage théorique correspond à la différence de la concentration de vapeur d'eau mesurée entre la sonde d'entrée et la sonde de sortie selon le taux de ventilation. Le volume de foin engrangé et son taux de matière sèche sont illustrés aux dates correspondantes.

Pour les trois fournées réalisées, la fauche a été réalisée la veille ou l'avant-veille (en fin de journée). La première fournée (foin de deuxième coupe) était au préalable très sèche à la récolte 83% TMS). La seconde fournée était davantage humide (73%) et c'est surtout la troisième fournée qui présentait plus de risque avec un taux de 63±15% de taux de matière sèche et deux chargements à 38% TMS.

Le graphique de la figure 6 illustre la conduite de séchage durant les 41 jours d'observation faisant suite au début de récolte le 13 septembre. Ce graphique indique assez clairement l'importance de la radiation solaire sur le taux de séchage journalier. Le taux de séchage est toujours élevé lors des journées de bon ensoleillement. Par contre, lors de journées pluvieuses et/ou de fort couvert nuageux, le rendement de séchage est faible, voir même négatif (ex. : 22 septembre, 5 et 6 octobre). Les rendements journaliers négatifs de séchage sont souvent le résultat de performance fortement négative durant la nuit. Le taux maximal de séchage (2367 kg

d'eau) a été obtenu le 2 octobre alors que les 2 ventilateurs étaient en opération et que la journée était très ensoleillée. La dernière fournée de foin très humide remontait au 28 septembre. Le taux de séchage au cours des 2 jours pluvieux précédents a été faible mais nécessaire pour éviter qu'il ne chauffe. À la reprise des journées ensoleillées 1,2 et 3 octobre, le taux de séchage était élevé, particulièrement le 2 octobre où le second ventilateur a été mis en marche. Au total, 22946 kg d'eau aurait été retirée de la masse en additionnant les quantités journalières d'eau. En principe, il aurait fallu retirer 17,2 tonnes d'eau pour ramener le TMS à 88%. En principe ces deux valeurs devraient coïncider, mais l'écart est quand même faible compte tenu qu'il y a un peu d'imprécision sur la masse réelle de foin engrangée. D'autre part, le bilan de séchage a été établi par la différence de teneur en eau dans l'air mesurée par des sondes dont la précision est de l'ordre de 5%.

Dans le cadre de ce projet, la ventilation a été maintenue presque en tout temps surtout dans les 8-10-jours suivants la mise en cellule. En regardant de plus près l'évolution de séchage, on s'aperçoit que la nuit, on perd beaucoup d'efficacité. La figure 7 illustre ce phénomène. Le taux de séchage devient souvent négatif tôt le matin tel qu'observé le 20 et 21 septembre. Ce même phénomène semble répétitif à toutes les nuits, à l'exception des nuits qui suivent la mise en grange de foin humide. Dans ces circonstances, le taux de séchage est toutefois faible, mais il est primordial que la ventilation soit maintenue afin de prévenir tout début de chauffage qui risquerait la détérioration du foin. Par contre, après quelques jours suivant la mise en cellule, il est possiblement valable de gérer des arrêts de la ventilation. Cela mériterait d'être exploré davantage, afin de trouver la fréquence et la durée d'arrêt des ventilateurs qui favoriserait un taux optimal de séchage sans affecter sa qualité.

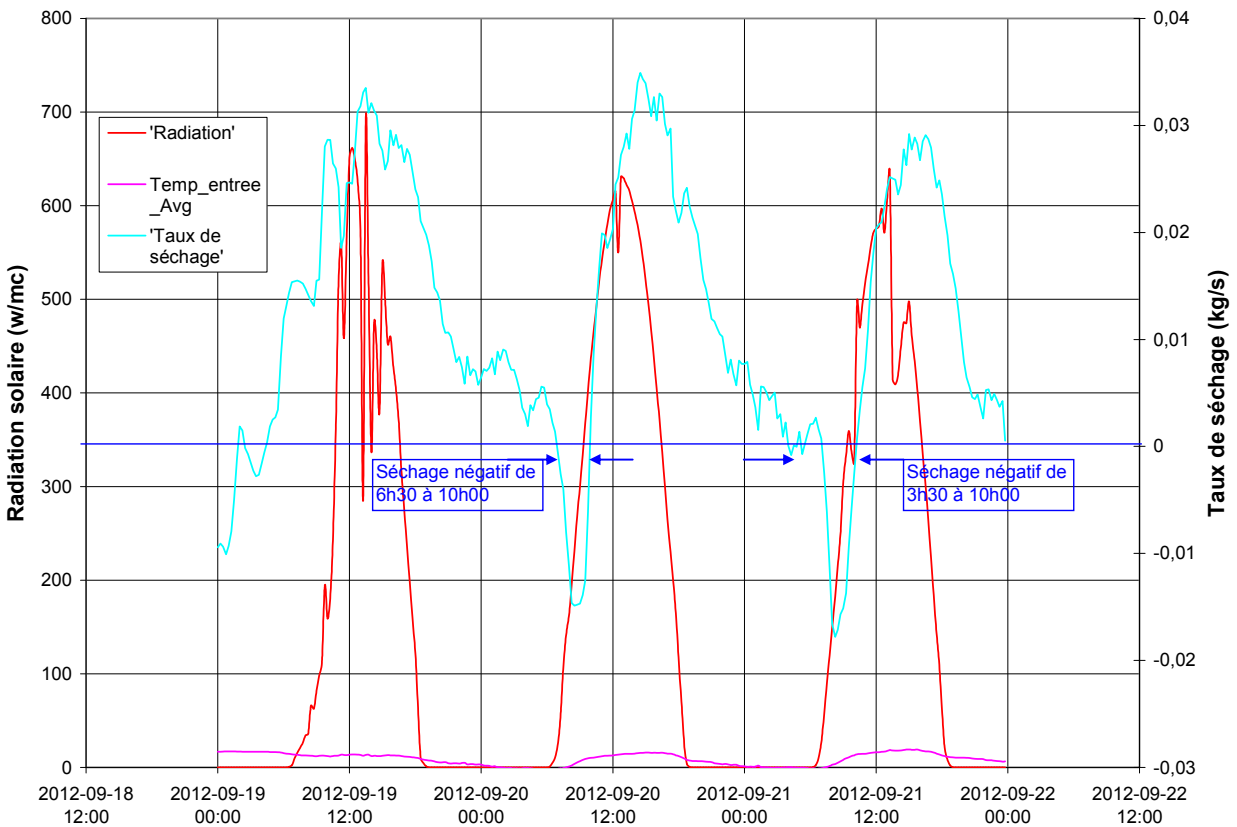


Figure 7 Évolution à 15 minutes d'intervalle du séchage de 3 journées ensoleillées (19 au 22 septembre). La ventilation a été maintenue constante avec un seul ventilateur en opération. Le taux de séchage diminuait significativement la nuit et devenait négatif tôt le matin.

Le graphique de la figure 8 illustre un exemple de l'évolution de la température dans le foin à 2 m au dessus du fond et à 3,5 m. La température du foin réagit très rapidement aux conditions de l'air extérieure et ce dès que la ventilation est démarrée. La température du foin suit presque instantanément la température ambiante surtout pour le foin à 2 m du fond. À 3,5 m la réaction est plus lente due à l'inertie thermique de la masse de foin.

Par l'arrêt prolongé du ventilateur le 27 septembre, on peut constater qu'à 2 m le foin de la première fournée est stable, ce qui n'est pas le cas pour le foin à 3,5 m qui a augmenté d'environ 2°C en 24 heures d'arrêt et ce même si la température extérieure était en baisse. Ce n'est pas critique, mais cette observation est un excellent indice du niveau de stabilité pour la conservation à long terme.

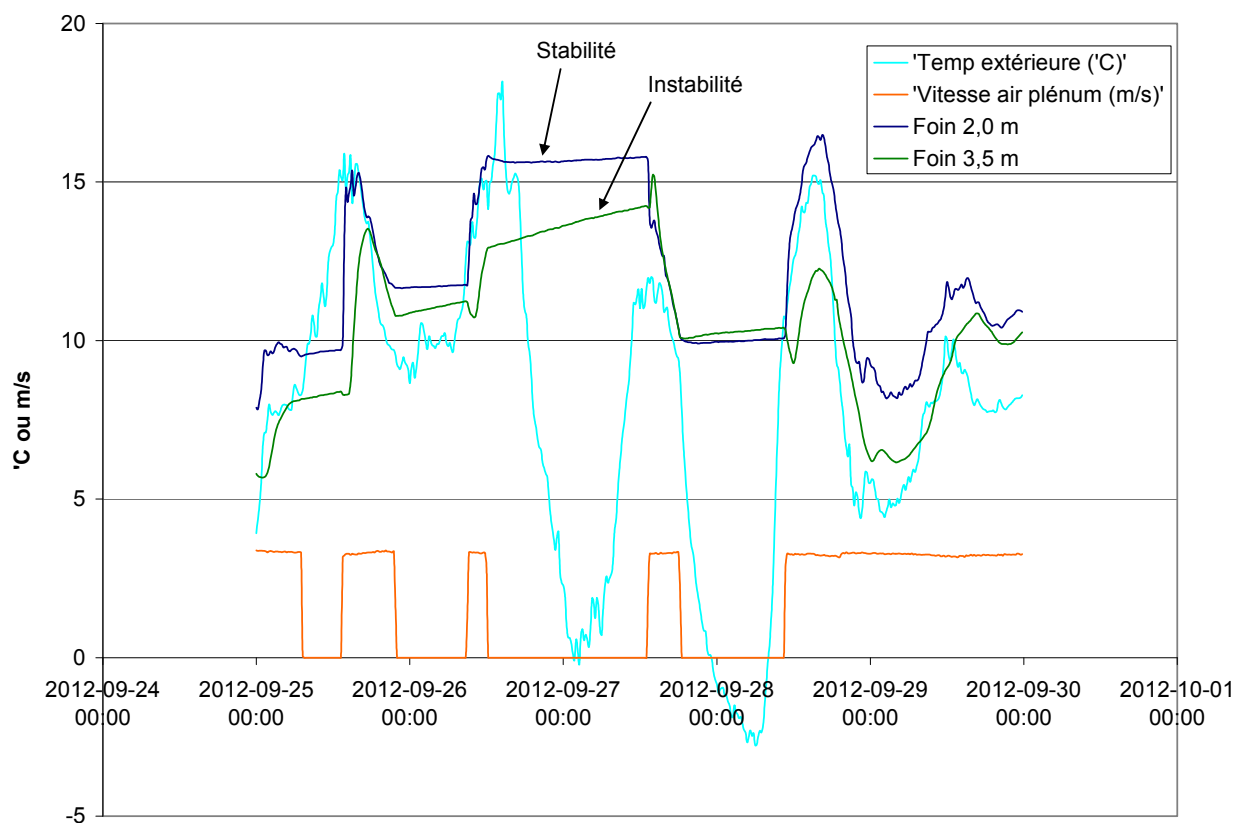


Figure 8: Évolution de la température dans le foin lorsque la cellule disposait autour de 4 m de foin entre le 25 et le 29 septembre. Le foin au niveau 2 m correspond à celui de la fournée du 13 septembre. Celui du niveau 3,5 m correspond au foin de la fournée du 17 septembre. La vitesse de l'air représente le fonctionnement du ventilateur.

5- La qualité de séchage du foin.

La presque totalité des chargements a été évaluée pour le taux de matière sèche (Certains chargements n'ont pu être évalués vu la lenteur à réaliser les tests à partir d'un testeur d'humidité de type Koster et la fréquence d'arrivée des chargements).

Pour chaque fournée, des échantillons de 200 à 800 g ont été prélevés et mis en sac ajouré (filet d'oignon - papillote de 20 cm de diamètre par 30 cm de longueur) dont 1 à 3 échantillons étaient placés dans le plénum pour séchage rapide (référence témoin) et 3 autres étaient placés directement dans la cellule de séchage pour reprise lors de l'alimentation. La comparaison des moyennes a été effectuée entre le foin qui a été placé directement dans la cellule et 1 à 3 échantillons placés dans le plénum positif et qui a été séché très rapidement. Le tableau 6 montre l'ensemble des échantillons prélevés et les liens de comparaison. La qualité de séchage dans la cellule de chaque fournée a été évaluée en comparant les trois échantillons avec leur témoin correspondant (Plénum +). Une seconde comparaison a été faite avec 9 autres échantillons prélevés au hasard dans la masse à chacun des niveaux correspondants (3 par niveau) en les comparant toujours avec les témoins correspondants.

D'autres échantillons ont été prélevés afin de tirer des informations complémentaires notamment sur le foin 'très humide' qui a été engrangé lors de la dernière fournée (SO_1; SO_2 et SO_3) La comparaison de ce foin a été faite avec les échantillons 5_1, 5_2 et 5_3 qui ont été séché rapidement au plénum+.

L'analyse infrarouge des fourrages a été réalisée sur 35 échantillons au total pour les composantes chimiques des échantillons et la matière sèche a été effectuée par chimie humide. Les analyses ont été réalisées par le Service d'analyse des aliments du bétail de Valacta. La préparation des échantillons a été faite le 24 octobre. Les échantillons ont été récupérés à leur niveau respectif et d'autres prélèvements ont été pris au hasard aux niveaux (N_1 (1m), N_2 (2,5 m) et N_3 (3m)). Les analyses par échantillon sont présentées au tableau 7 et les moyennes lorsqu'il y a des répétitions sont présentés au tableau 8.

Teneur en eau :

L'analyse montre que la totalité des échantillons à la reprise était stabilisés et contenaient de 82 à 86% de MS. La première fournée mise au séchoir était au point de départ plutôt sèche. Les fournées du 17 et du 28 septembre étaient plus humide à l'entreposage et plus particulièrement celle du 28 septembre (63% MS)

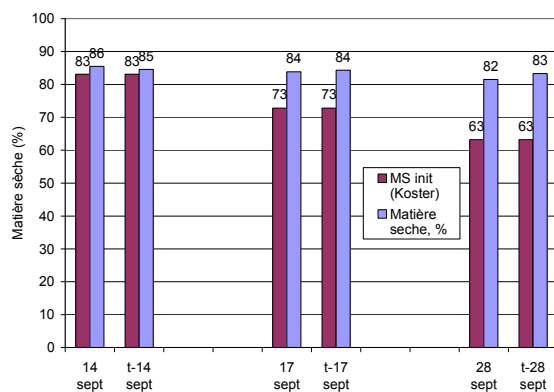


Figure 9 Taux de matière sèche initiale (Koster) et à la reprise (IR). Les moyennes (en rouge) sont jumelées avec leur témoin respectifs séchés rapidement (t-* en bleu)

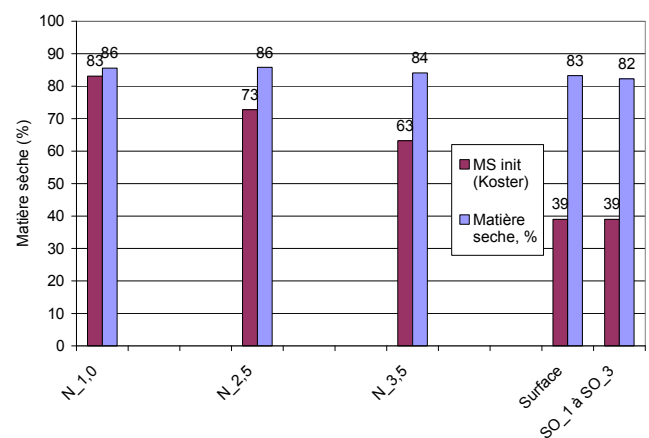


Figure 10: Taux de matière sèche initiale en rouge (Koster) et à la reprise en bleu (IR) après prélèvement au hasard des niveaux. 'Surface' représente le foin très humide récolté le 28 septembre et qui a été placé à la surface de la cellule.

Conservation :

Le critère utilisé pour évaluer s'il y a eu chauffage au niveau de la masse de fourrage et qui est également un indice de la dégradation du fourrage est la protéine liée à la fibre ou PB-ADF. Plus cet indice est élevé, plus il y a eu chauffage et plus les pertes d'énergie et de protéine sont importantes. Il est cependant normal d'observer des valeurs positives pour ce critère selon les types de fourrages et la forme sous laquelle il est entreposé. À titre indicatif voici les valeurs typiques pour le foin de graminées (tableau 3). Le foin des 3 fournées engrangées est toujours à moins de 55% NDF. On devrait donc s'attendre à un indice de 1,3% ±0,3%.

Tableau 5: Teneurs en protéine brute liée à la fibre ADF pour les foins de graminées (NRC, 2001)

Types de foin de graminées	MS (%)	PB (%)	NDF (%)	PB-ADF (valeur en %)	PBADF (écart-type en %)
Tout foin de graminées	88,1	10,6	64,4	1,1	0,5
Foin de graminées jeunes (< 55 % NDF)	84,0	18,0	49,6	1,3	0,3
Foin de graminées de maturité moyenne (55 à 60 % NDF)	83,8	13,3	57,7	1,2	0,3
Foin de graminées mature (> 60 % NDF)	84,4	10,8	69,1	1,1	0,3

La teneur PB-ADF de tous les échantillons est légèrement plus élevée que celle prévue pour un foin de graminée. On s'attendrait à une valeur qui se situerait autour de 1,3. Or, la teneur moyenne des 35 échantillons prélevés est de $1,61 \pm 0,13\%$ (Tableau 6). Pour chaque fournée, la figure 11 présente l'indice PB-ADF pour le foin de chaque fournée par rapport à son équivalent séché très rapidement. Il n'y a aucune différence pour la fournée du 17 septembre. Pour la fournée du 28 septembre, l'écart n'est que de 0,01%, ce qui est beaucoup moins que l'écart type qu'on s'attend de lire entre les répétitions. Seule la fournée du 14 septembre présente un écart notable : 1,76 (séchoir) vs 1,56 (témoin au plénum). La différence est de 0,2 ce qui est toutefois moins que l'écart-type habituel de 0,3 selon NRC, 2001. Il est donc difficile de conclure qu'il y a une différence, d'autant plus que cela correspond au foin, qui au point de départ était le plus sec lors de la récolte et qui aurait dû se conserver le mieux.

La figure 12 confirme les résultats énoncés précédemment avec à peu près les mêmes tendances. Fait étonnant, le foin très humide qui a été placé sur le dessus de la cellule ne présente pas de dégradation par rapport au foin témoin séché rapidement.

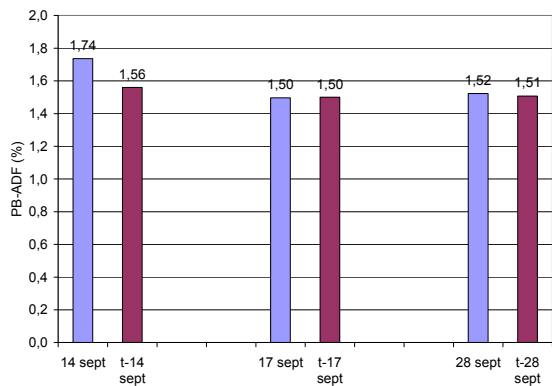


Figure 11 Indice de dégradation de chacune des fournées (bleu) par rapport au foin séché dans le plénum (rouge)

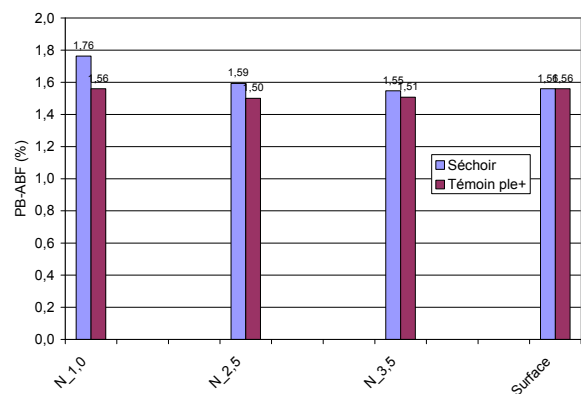


Figure 12:Indice de dégradation suite au prélèvement au niveau correspondant (bleu) par rapport au foin séché dans le plénum (rouge)

À la lumière de ces résultats, il apparaît assez clair que le foin placé au séchoir et qui a séché sur une période de l'ordre de 3-4 semaines (fournée du 28 sept) ne présente pas de dégradation de l'énergie et de la protéine.

Partie III : Les coûts

6-Coût de construction et d'aménagement du séchoir

..

Le séchoir a été aménagé dans un bâtiment neuf. L'entreprise a opté pour un bâtiment à structure d'acier de 33,5 x 15,2 m et 6,1 m de hauteur sur un solage excédant de 0,8 m le niveau du plancher. Le tableau 4 présente les coûts réels du projet. La fondation, l'érection de la structure de même que la pose de la tôle de la toiture ont été faites par un contracteur. Tout le reste a été réalisé par l'entreprise elle-même.

Le coût total réel pour l'entreprise de l'installation du séchoir incluant la griffe de manutention s'élève à 259 256,81\$. Toutefois, si on ajoute la main d'œuvre que l'entreprise a réalisée et qu'elle estime à 2400 heures de temps de travail, le montant s'élèverait à 307 256,81\$. Une partie importante du coût du projet a été consacré à l'électricité. Ce secteur de Charlevoix n'étant pas alimenté en courant triphasé, un système de conversion triphasé a dû être installé pour passer de 240 V / 1 PH à 575V / 3 PH pour les besoins des deux ventilateurs de 20 HP. D'autre part, la griffe Stepa Palfinger HDK 8012 utilisée nécessitait une alimentation à 475 V. Cela a nécessité l'installation d'un autre transformateur.

Tableau 3: Investissements pour construire le séchoir solaire à la ferme Hengil. Sans inclure la main d'œuvre familiale, l'investissement est de 259 256,81\$

FONDATION	
Coffrage + fer d'armature	14 183,46 \$
Béton	22 338,36 \$
Excavation	6 175,00 \$
Sable remplissage	1 531,25 \$
Location niveau laser	285,12 \$
	44 513,19 \$
BÂTIMENT 33,5 x 15,2 x 6,1 m	
Structure acier + rails	54 840,00 \$
Location nacelle	172,80 \$
Tôle	14 940,72 \$
Main d'œuvre toiture	8 826,00 \$
	78 779,52 \$
SÉCHOIR & Capteur solaire	
Tout bois (madrier, contreplaqué, etc...)	14 515,68 \$
Matériaux (thermofoil, scellant, portes,...)	5 570,01 \$
Location élévateur	8 700,00 \$
Électricité (1 ? 3 phases + branchements)	32 834,79 \$
Ventilateurs (2)	17 341,52 \$
	78 962,00 \$
GRIFFE À FOIN	57 002,10 \$
	57 002,10 \$
MAIN D'ŒUVRE de l'entreprise	
2400 heures @ 20\$/h	48 000,00 \$
	<u>48 000,00 \$</u>
	307 256,81 \$

7-Coût d'opération du séchoir

Ce type de séchoir bénéficie d'un apport en énergie solaire gratuit. Sans tenir compte des frais d'amortissement, d'assurances et de la main d'œuvre, le coût d'opération du séchoir se limite uniquement à l'électricité pour le fonctionnement de la ventilation et la consommation électrique de la griffe. Le coût d'opération a été de 5,66\$/tonne de foin, ce qui se compare à une étude similaire ayant été réalisée sur le séchage du foin de petites balles carrées qui présentait des frais de \$5,47/tonne⁷ uniquement pour l'électricité d'un système bi-énergie (Solaire et biomasse). Dans le cas présent, les frais d'opération de la griffe sont inclus dans les coûts d'opération du système.

Tableau 6: Coût d'opération du séchoir lors de la troisième coupe

	Tonnes	Coût d'opération	Coût d'opération par tonne
Quantité de foin récolté (88% MS)	92,6	524,02 \$	5,66 \$
Quantité de matière sèche (t MS)	79,4	524,02 \$	6,60 \$

CONCLUSION :

Le mode de récolte de foin en vrac est répandu en Europe. Cette technique semble assez bien maîtrisée sous leurs conditions d'utilisation, mais encore méconnue au Québec. Ce projet a permis de vérifier l'adaptabilité de cette technique sous nos conditions. Le projet devait initialement être réalisé pour la récolte entière de l'entreprise, mais compte-tenu du contretemps lié à l'acquisition de la griffe à foin, le projet a été réalisé uniquement en septembre-octobre sur du foin de seconde et de troisième coupe où les conditions climatiques sont habituellement moins favorables à la récolte du foin sec. Tout de même, il a été possible de faire du foin de bonne qualité et avec peu de stress. Voici les principaux éléments à retenir de ce projet :

Aménagement :

- 1- Gain thermique du capteur solaire de 5-6°C en septembre-octobre (Tôle noire);
- 2- Taux de captage de 20% à 29% selon l'usage d'un ou deux ventilateurs;
- 3- Balancement de ventilation facile : Entrée d'air des deux côtés du bâtiment avec plénum central;
- 4- Moins de 5 m/s de vitesse d'air en tout point en aval des ventilateurs;
- 5- Moins de 4 m/s de vitesse d'air en tout point en amont des ventilateurs (perte de charge inférieure à 10%);
- 6- Vitesse d'air verticale dans la cellule de l'ordre de 5,5 à 10,1 cm/s
- 7- Bonne homogénéité de distribution : caillebotis éloigné à 1 m du mur = minimum requis;

Séchage :

⁷ René Morissette et Philippe Savoie, Le séchage artificiel du foin avec l'énergie solaire et la biomasse, Demi journée d'information scientifique sur les fourrages, Victoriaville, 15 février 2011

- 8- Toutes les fournées ont été réalisées avec du foin fauché la veille;
- 9- Le taux de MS (TMS) à la récolte a varié de 83 à 63% et n'a présenté aucun problème de séchage. Dans le cadre de ce projet, une petite quantité de foin à 38% MS a aussi été séché adéquatement. Toutefois, le foin ne constituait qu'une couche mince en surface ;
- 10- Efficacité : proportionnellement liée aux conditions d'ensoleillement;
- 11- Gain thermique inchangé lorsque la ventilation est doublée;
- 12- Sous condition d'ensoleillement, rendement de séchage maximal en après-midi;
- 13- Rendement de séchage nul et même négatif la nuit et tôt le matin;
- 14- Arrêt du système possible durant la nuit (si foin stabilisé);
- 15- Séchage complet en 3 à 4 semaines;
- 16- Coût d'opération de 5,66\$/tonne de foin ou 6,60\$/t MS

La faiblesse du système demeure la faible performance de séchage lors des journées de pluie et la nuit. Toutefois, le maintien de la ventilation fait en sorte qu'en tout temps, il est possible d'empêcher le foin de chauffer. Est-ce suffisant pour maintenir la qualité ? Ce projet ne peut y répondre, mais une chose est sûre, s'il y a dégradation elle est assurément lente si la ventilation est maintenue. Le séchage est alors décalé dans le temps. Afin d'optimiser la technique de séchage avec ce type de séchoir, certains éléments mériteraient de porter plus d'attention :

- I. Pour éviter les pertes d'air le long des cloisons : Éloigner le caillebotis à plus de 1 m du mur ou placer plus de foin le long de la cloison;
- II. Éviter les monticules de foin – bien répartir le foin uniformément ailleurs au centre;
- III. Ne pas hésiter à manipuler le foin avec la griffe le lendemain matin afin de défaire certaines mottes denses et humides. Le foin en surface est toujours en situation plus critique que celui des couches inférieures;
- IV. Gérer les arrêts / départs des ventilateurs dans le but d'optimiser le séchage sans qu'il y ait dégradation (Possibilité d'arrêt la nuit ou le matin)

Les essais ont été réalisés sous des conditions automnales. Il est possible qu'en juin ou juillet où la radiation solaire est supérieure que le rendement de séchage puisse être encore meilleur que ce qui a été mesuré dans le cadre de ce projet. Les rendements obtenus sont déjà satisfaisants et prometteurs pour les entreprises qui désireraient implanter ce mode de récolte.

Autres informations :

Pour voir une vidéo sur l'autochargeuse à la ferme Hengil:
<http://www.youtube.com/watch?v=3AW9CQ31SXC&feature=youtu.be>

Pour voir le déchargement de l'autochargeuse dans le débarcadère à la ferme Hengil:
<http://www.youtube.com/watch?v=P60fhul5th0&feature=youtu.be>

Pour voir le transfert de foin à la cellule de séchage à l'aide de la griffe à foin à la ferme Hengil:
<https://www.youtube.com/watch?v=Svsts39Xdrw>

Tableau 4 : Identification des échantillons pour analyse chimique. Les flèches indiquent les blocs d'échantillons à comparer

COMPARAISON				Remarques
Date	Niveau (m)	# echan	Témoin (ple+)	Remarques
14-sept	1	1_1	1_7	
14-sept	1	1_2		
14-sept	1	1_3		
16-sept	1,5	2_1		Données non analysées (Pas de témoin)
16-sept	1,5	2_2		
16-sept	1,5	2_3		
17-sept	2,5	3_1	3_7	
17-sept	2,5	3_2		
17-sept	2,5	3_3		
28-sept	3,5	4_1	4_7	
28-sept	3,5	4_2	4_8	
28-sept	3,5	4_3	4_9	
			4_10	
STRATE				
	1	N1_1	1_7	Prélèvement au hasard Niveau 1 m
	1	N1_2		
	1	N1_3		
	2	N2_1	3_7	Prélèvement au hasard Niveau 2 m
	2	N2_2		
	2	N2_3		
	3,5	N3_1	4_7	Prélèvement au hasard Niveau 3,5 m
	3,5	N3_2	4_8	
	3,5	N3_3	4_9	
			4_10	
AUTRES ÉCHANTILLONS				
28-sept		SO_1	5_1	Foin 39% MS (surface cellule) 5_1 à 5_3 placé au plénum +
28-sept		SO_2	5_2	
28-sept		SO_3	5_3	

Les échantillons 3_4 et 3_6 ont subi des gains de poids durant le séchage, car ils étaient constamment raménées à la surface pour reprise de poids

Tableau 5: Analyse infra-rouge des 35 échantillons. Les résultats sont présentés sur la base de matière sèche (MS) et sur la base tel que servi (TQS)

MS	1_1	1_2	1_3	1_7	2_1	2_2	2_3	3_1	3_2	3_3	3_7	4_1	4_2	4_3	4_7	4_8	4_9	4_10	5_1	5_2	5_3	N1_1	N1_2	N1_3	N2_1	N2_2	N2_3	N3_1	N3_2	N3_3	SO_1	SO_2	SO_3	3_6	3_4					
Matière sèche, %																																								
Protéine brute, %	10,17	9,75	11,95	9,43	12,38	15,51	13,54	11,99	14,09	14,06	13,79	11,26	11,80	11,73	13,65	13,77	12,61	11,49	13,49	13,71	14,88	10,45	11,13	11,41	15,81	11,44	12,16	13,17	14,52	13,02	13,10	13,46	13,03	15,09	19,72					
Protéine soluble, %	1,27	1,22	2,25	1,35	2,35	2,69	2,28	1,91	2,73	2,71	2,59	1,07	1,14	0,54	2,36	2,38	1,85	1,17	1,84	2,14	2,35	1,77	1,82	1,77	2,54	1,56	1,86	2,37	2,75	2,25	2,26	2,48	1,94	2,38	3,06					
PB-ADF, %	1,63	1,70	1,88	1,56	1,71	1,65	1,65	1,47	1,51	1,51	1,50	1,42	1,53	1,62	1,52	1,53	1,55	1,43	1,54		1,59	1,74	1,87	1,68	1,62	1,50	1,66	1,49	1,58	1,57	1,54	1,61	1,53	1,66	2,25					
ADF, %	33,18	34,04	35,45	33,74	34,73	30,32	32,02	31,74	30,15	29,78	30,48	27,65	29,01	30,01	29,72	28,60	29,71	28,77	29,59	29,28	29,59	37,02	36,20	33,40	30,35	32,29	34,12	31,44	31,09	31,98	30,11	29,89	29,63	30,78	35,29					
NDF, %	49,04	53,99	52,77	50,96	54,57	50,13	53,71	49,89	45,37	44,15	46,17	45,58	48,87	49,49	43,43	42,64	44,79	46,80	44,24	45,76	45,32	51,88	51,81	52,82	50,26	53,82	55,79	47,00	44,24	48,71	43,41	42,77	44,72	45,14	52,89					
lignine, %	7,70	7,47	8,63	6,91	6,97	5,42	5,72	5,43	5,97	5,83	5,52	4,95	5,01	5,80	5,89	6,54	6,25	5,24	6,23	5,55	6,27	8,56	8,94	6,98	5,04	5,29	6,18	5,70	6,48	6,44	6,37	7,16	6,00	6,61	8,29					
GNF, %	28,79	24,26	23,28	27,61	21,05	22,36	20,75	26,12	28,54	29,79	28,04	31,16	27,33	26,78	30,92	31,59	30,60	29,71	30,27	28,53	27,80	25,67	25,06	23,77	21,93	22,74	59,55	27,83	29,24	26,27	31,49	31,77	30,25	27,77	15,39					
ENL, Mcal/kg	1,36	1,34	1,31	1,35	1,32	1,43	1,39	1,39	1,43	1,44	1,42	1,49	1,46	1,44	1,44	1,47	1,44	1,47	1,45	1,45	1,45	1,27	1,29	1,36	1,43	1,38	1,34	1,40	1,41	1,39	1,43	1,44	1,44	1,42	1,31					
ENE, Mcal/kg	1,38	1,34	1,29	1,35	1,32	1,49	1,42	1,43	1,50	1,51	1,48	1,59	1,54	1,50	1,51	1,55	1,51	1,55	1,52	1,53	1,52	1,22	1,26	1,37	1,49	1,41	1,34	1,44	1,46	1,42	1,50	1,51	1,52	1,47	1,29					
ENG, Mcal/kg	0,80	0,77	0,72	0,78	0,74	0,90	0,84	0,85	0,90	0,92	0,89	0,99	0,94	0,91	0,92	0,96	0,92	0,95	0,92	0,93	0,92	0,66	0,69	0,79	0,90	0,83	0,76	0,86	0,87	0,84	0,90	0,91	0,92	0,88	0,72					
UNT, %	60,47	59,63	58,26	59,92	58,96	63,25	61,59	61,87	63,41	63,77	63,09	65,85	64,52	63,55	63,83	64,92	63,84	64,76	63,96	64,26	63,96	56,73	57,53	60,25	63,22	61,33	59,55	62,16	62,50	61,63	63,45	63,67	63,92	62,80	58,41					
Calcium, %	0,05	0,13	0,01	0,12	0,06	0,12	0,15	0,15	0,13	0,20	0,04	0,14	0,15	0,15	0,06	0,23	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,20	0,16	0,12	0,01	0,13	0,07	0,18	0,31	0,15	0,18	0,22	0,10	0,17	0,04					
Phosphore, %	0,10	0,17	0,14	0,12	0,22	0,20	0,22	0,21	0,20	0,18	0,20	0,17	0,19	0,19	0,19	0,16	0,17	0,19	0,20	0,20	0,23	0,12	0,09	0,14	0,24	0,23	0,25	0,20	0,20	0,19	0,18	0,14	0,19	0,22	0,34					
Potassium, %	1,92	1,90	1,53	2,01	2,57	2,34	2,45	3,12	3,09	3,04	3,39	2,65	2,67	2,61	2,83	2,57	2,73	2,68	2,88	3,05	3,05	2,01	1,54	1,80	2,53	2,37	2,43	2,80	2,71	2,76	2,47	2,43	2,64	3,06	2,81					
Magnésium, %	0,14	0,11	0,12	0,13	0,16	0,19	0,17	0,16	0,19	0,18	0,17	0,16	0,16	0,17	0,20	0,17	0,17	0,18	0,17	0,19	0,12	0,12	0,14	0,19	0,16	0,15	0,18	0,19	0,18	0,19	0,18	0,20	0,17	0,19	0,18					
TQS																																								
Matière sèche, %	85,64	85,51	85,41	84,57	83,52	83,78	84,61	84,41	83,25	83,83	84,34	82,02	81,19	81,35	83,93	84,47	83,14	81,76	84,83	84,13	80,85	85,36	85,54	85,89	86,14	84,73	86,54	83,11	83,97	85,10	80,86	82,42	83,53	79,72	81,82					
Protéine brute, %	8,71	8,34	10,21	7,97	10,34	12,99	11,46	10,12	11,73	11,79	11,63	9,24	9,58	9,54	11,46	11,63	10,48	9,39	11,44	11,53	12,03	8,92	9,52	9,80	13,62	9,69	10,52	10,95	12,19	11,08	10,59	11,09	10,88	12,03	16,13					
Protéine soluble, %	1,09	1,04	1,92	1,14	1,96	2,25	1,93	1,61	2,27	2,27	2,18	0,88	0,93	0,44	14,98	2,01	1,54	0,96	1,56	1,80	1,90	1,51	1,56	1,52	2,19	1,32	1,61	1,97	2,31	1,91	1,83	2,04	1,62	1,90	2,50					
PB-ADF, %	1,40	1,45	1,61	1,32	1,43	1,38	1,40	1,24	1,26	1,27	1,16	1,24	1,32	1,28	1,29	1,29	1,17	1,31	9,09	1,29	1,49	1,60	1,44	1,40	1,27	1,44	1,24	1,33	1,34	1,25	1,33	1,28	1,32	1,84						
ADF, %	28,42	29,11	30,28	28,53	29,01	25,40	27,09	26,74	25,10	24,96	25,71	22,68	23,55	24,41	24,94	24,16	24,70	23,52	25,10	24,63	23,92	31,60	30,97	28,69	26,14	27,36	29,53	26,13	26,11	27,21	24,35	24,64	24,75	24,54	28,87					
NDF, %	42,00	46,17	45,07	43,10	45,58	42,00	45,44	42,11	37,77	37,01	38,94	37,38	39,68	40,26	36,45	36,02	37,24	38,26	37,53	38,05	36,64	44,28	44,32	45,37	43,29	45,60	48,28	39,06	37,15	41,45	35,10	35,25	37,35	35,99	43,27					
lignine, %	6,59	6,39	7,37	5,84	5,82	4,54	4,84	4,58	4,97	4,89	4,66	4,06	4,07	4,72	4,94	5,52	5,20	4,28	5,28	4,67	5,07	7,31	7,65	6,00	4,34	4,48	5,35	4,74	5,44	5,48	5,15	5,90	5,01	5,27	6,78					
GNF, %	24,66	20,74	19,88	23,35	17,58	18,73	17,56	22,05	23,76	24,97	23,65	25,56	22,19	21,79	25,95	26,68	25,44	24,29	25,68	24,00	22,48	21,91	21,44	20,42	18,89	19,27	51,53	23,13	24,55	22,36	25,46	26,18	25,27	22,14	12,59					
ENL, Mcal/kg	1,16	1,15	1,12	1,14	1,10	1,20	1,18	1,17	1,19	1,21	1,20	1,22	1,19	1,17	1,21	1,24	1,20	1,23	1,22	1,17	1,08	1,10	1,17	1,23	1,17	1,16	1,17	1,18	1,18	1,16	1,19	1,20	1,13	1,07						
ENE, Mcal/kg	1,18	1,15	1,10	1,14	1,10	1,25	1,20	1,21	1,25	1,27	1,25	1,30	1,25	1,22	1,27	1,31	1,26	1,27	1,29	1,29	1,23	1,04	1,08	1,18	1,28	1,19	1,16	1,20	1,23	1,21	1,21	1,24	1,27	1,17	1,06					
ENG, Mcal/kg	0,69	0,66	0,61	0,66	0,62	0,75	0,71	0,72	0,75	0,77	0,75	0,81	0,76	0,74	0,77	0,81	0,76	0,78	0,78	0,78	0,74	0,56	0,59	0,68	0,78	0,70	0,66	0,71	0,73	0,71	0,73	0,75	0,77	0,70	0,59					
UNT, %	51,79	50,99	49,76	50,67	49,24	52,99	52,11	52,22	52,79	53,46	53,21	54,01	52,38	51,70	53,57	54,84	53,08	52,95	54,26	54,06	51,71	48,42	49,21	51,75	54,46	51,96	51,53	51,66	52,48	52,45	51,31	52,48	53,39	50,06	47,79					
Calcium, %	0,04	0,11	0,01	0,10	0,05	0,10	0,13	0,11	0,17	0,03	0,11	0,12	0,05	0,19	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,17	0,14	0,10	0,01	0,11	0,06	0,15	0,26	0,13	0,15	0,18	0,08	0,14	0,03						
Phosphore, %	0,09	0,15	0,12	0,10	0,18	0,17	0,19	0,18	0,17	0,15	0,17	0,14	0,15	0,15	0,16	0,14	0,14	0,16	0,17	0,17	0,19	0,10	0,08	0,12	0,21	0,19	0,22	0,17	0,17	0,16	0,15	0,12	0,16	0,18	0,28					
Potassium, %	1,64	1,62	1,31	1,70	2,15	1,96	2,07	2,63	2,57	2,55	2,86	2,17	2,17	2,12	2,38	2,17	2,27	2,19	2,44	2,57	2,47	1,72	1,32	1,55	2,18	2,01	2,10	2,33	2,28	2,35	2,00	2,00	2,21	2,44	2,30					
Magnésium, %	0,12	0,09	0,10	0,11	0,13	0,16	0,14	0,14	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,14	0,17	0,14	0,14	0,15	0,14	0,15	0,10	0,10	0,12	0,16	0,14	0,13	0,15	0,16	0,15	0,15	0,16	0,14	0,15	0,15					

Tableau 6: Moyennes des répétitions s'il ya lieu des 35 échantillons. Les résultats sont présentés sur la base de matière sèche (MS)

MS	tém		tém		tém		N_1,0	N_2,5	N_3,5	T_hum	SO_1 à	SO_3	3_4 +3_6	MOY	ET
	14 sept	t-14 sept	16 sept	17 sept	t-17 sept	28 sept									
Matière seche, %															
Protéine brute, %	10,62	9,43	13,81	13,38	13,79	11,60	12,88	11,00	13,14	13,57	14,03	13,20	17,41	12,91	1,97
Protéine soluble, %	1,58	1,35	2,44	2,45	2,59	0,92	1,94	1,79	1,99	2,46	2,11	2,23	2,72	2,04	0,53
PB-ADF, %	1,74	1,56	1,67	1,50	1,50	1,52	1,51	1,76	1,59	1,55	1,57	1,56	1,96	1,61	0,13
ADF, %	34,22	33,74	32,36	30,56	30,48	28,89	29,20	35,54	32,25	31,50	29,49	29,88	33,04	31,63	2,10
NDF, %	51,93	50,96	52,80	46,47	46,17	47,98	44,42	52,17	53,29	46,65	45,11	43,63	49,02	48,51	3,39
lignine, %	7,93	6,91	6,04	5,74	5,52	5,25	5,98	8,16	5,50	6,21	6,02	6,51	7,45	6,40	0,94
GNF, %	25,44	27,61	21,39	28,15	28,04	28,42	30,71	24,83	34,74	27,78	28,87	31,17	21,58	27,59	3,69
ENL, Mcal/kg	1,34	1,35	1,38	1,42	1,42	1,46	1,46	1,31	1,38	1,40	1,45	1,44	1,37	1,40	0,05
ENE, Mcal/kg	1,34	1,35	1,41	1,48	1,48	1,54	1,53	1,28	1,41	1,44	1,52	1,51	1,38	1,44	0,08
ENG, Mcal/kg	0,76	0,78	0,83	0,89	0,89	0,95	0,94	0,71	0,83	0,86	0,92	0,91	0,80	0,85	0,07
UNT, %	59,45	59,92	61,27	63,02	63,09	64,64	64,34	58,17	61,37	62,10	64,06	63,68	60,61	61,98	2,04
Calcium, %	0,06	0,12	0,11	0,16	0,04	0,15	0,12	0,16	0,07	0,21	0,10	0,17	0,11	0,12	0,05
Phosphore, %	0,14	0,12	0,21	0,20	0,20	0,18	0,18	0,12	0,24	0,20	0,21	0,17	0,28	0,19	0,05
Potassium, %	1,78	2,01	2,45	3,08	3,39	2,64	2,70	1,78	2,44	2,76	2,99	2,51	2,94	2,58	0,49
Magnésium, %	0,12	0,13	0,17	0,18	0,18	0,16	0,18	0,13	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,17	0,02
Matière seche, %	85,52	84,57	83,97	83,83	84,34	81,52	83,33	85,60	85,80	84,06	83,27	82,27	80,77	83,76	1,54
MS init (Koster)	83,10	83,10	78,30	72,80	72,80	63,20	63,20	83,10	72,80	63,20	39,00	39,00		67,80	15,40

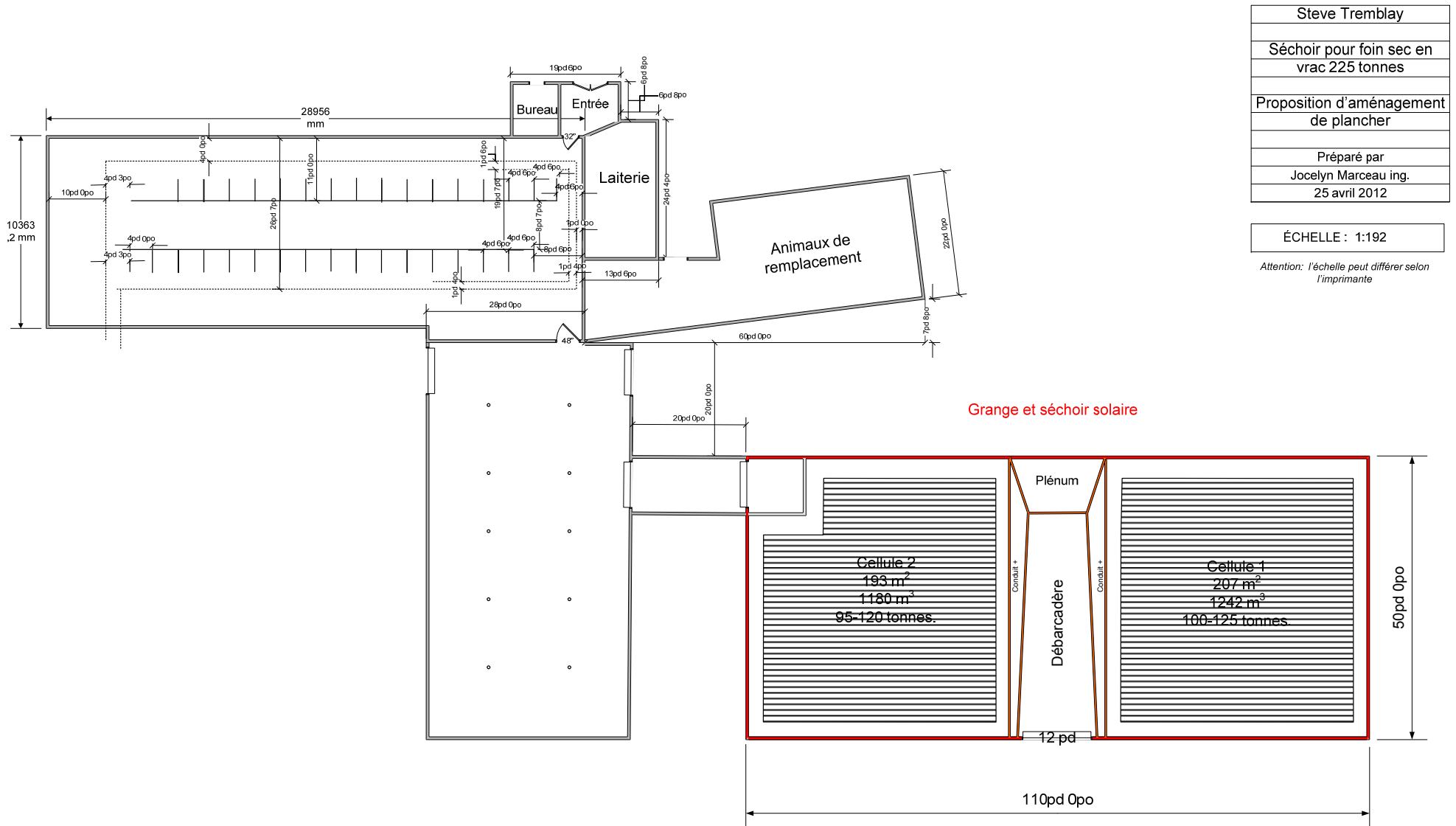
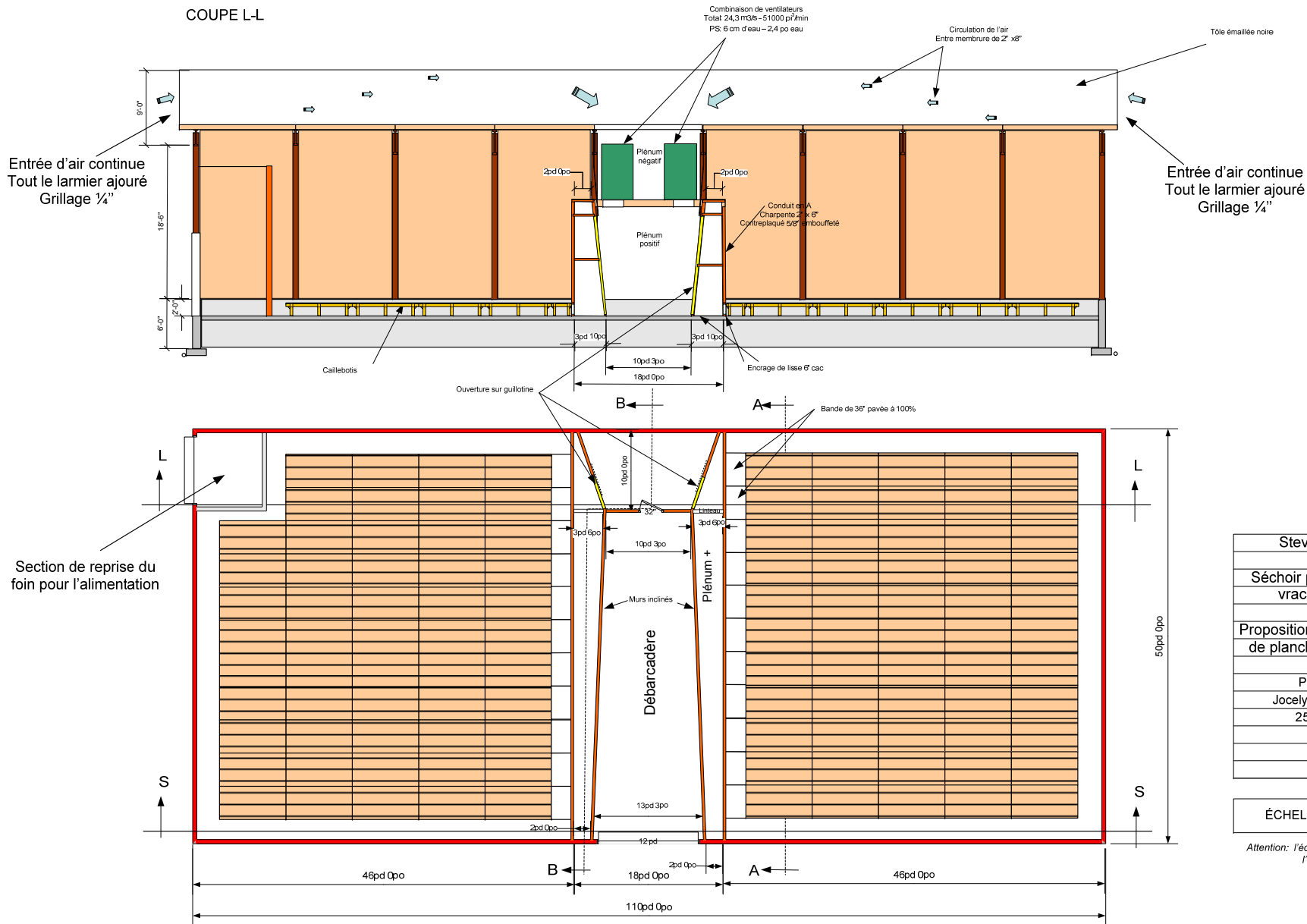


Figure 13: Aménagement du séchoir par rapport à l'étable



Steve Tremblay
Séchoir pour foin sec en vrac 225 tonnes
Proposition d'aménagement de plancher et coupe L-L
Préparé par Jocelyn Marceau ing. 25 avril 2012

ÉCHELLE : 1:128

Attention: l'échelle peut différer selon l'imprimante

Figure 14 Deux cellules de séchage: à gauche 197 m², à droite 207 m² . Entreposage jusqu'à 5,5 m de hauteur. Capacité théorique 200 à 225 tonnes

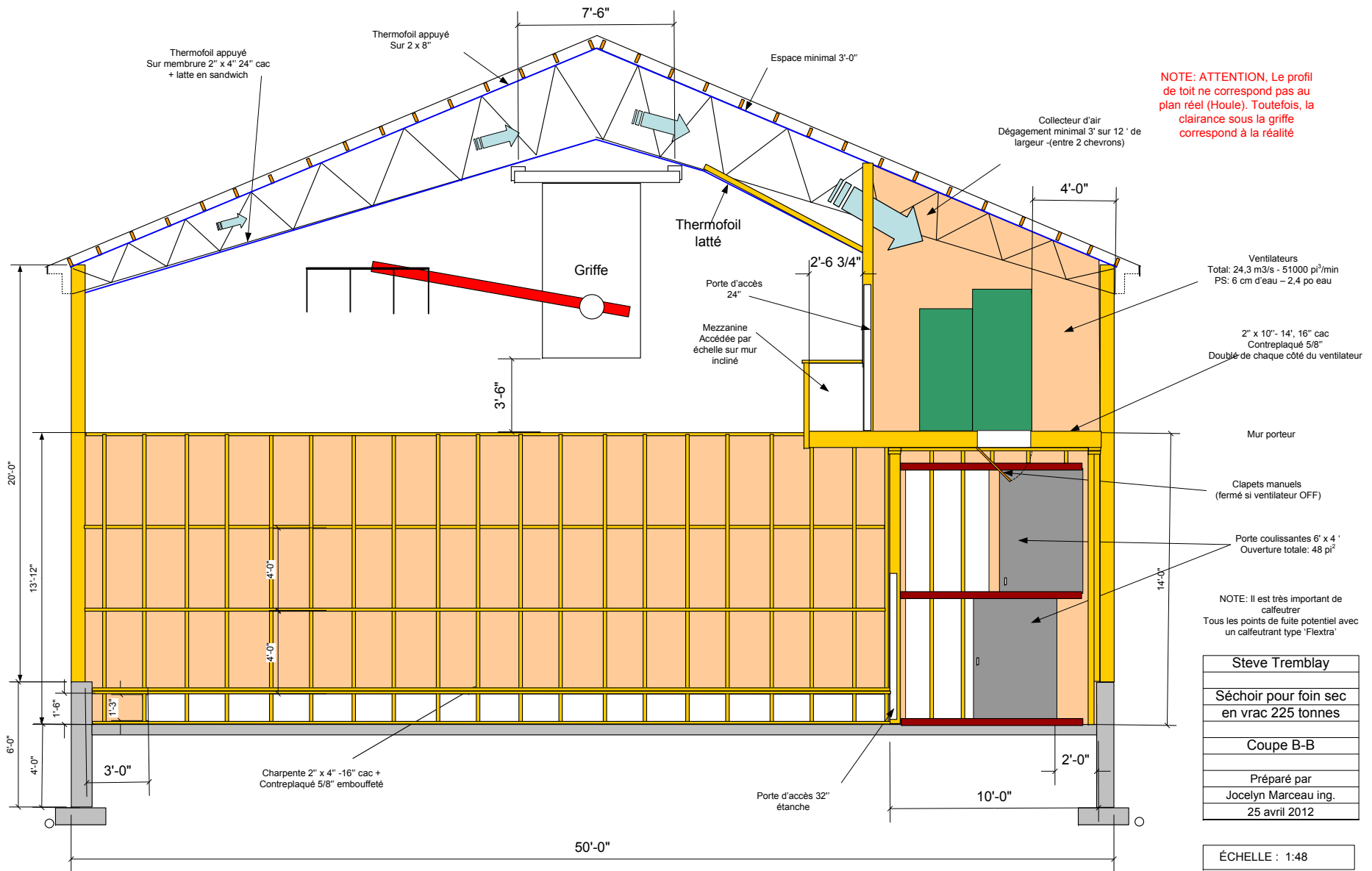


Figure 15: Vue en coupe à travers le plénum de distribution de l'air. Comme il y a deux ventilateurs, l'un des deux est muni d'un clapet pour éviter le retour d'air qui provoquerait l'inversion du second ventilateur à l'arrêt et des complications au démarrage.