

Très complet, très exhaustif, et bien rédigé. Un rendu de loin meilleur que lors de la présentation. Plusieurs logiciels mis à contribution pour produire l'analyse. On ne demande pas aux participants de devenir des experts dans un domaine. On demande cohérence et rendu des analyses. Et c'est bien fait ici. Il eut été possible de faire une analyse énergétique sur une base horaire. Cela eut indéniablement amélioré les résultats, mais ce n'est pas ce qui est nécessairement demandé. La richesse et la variété des références, le ton juste et technique sont autant de qualité de cet article. Il est aussi apprécié que les équipiers aient eu le courage de mentionner que l'un d'entre eux avait fourni un effort de moindre envergure.

**Séminaire scientifique et technique
Énergies renouvelables
École de technologie supérieure
Avril 2021, Montréal, Québec**

2021-1-ENR811-14

Analyse de l'intégration de collecteur aéraulique avec panneaux photovoltaïques dans l'élevage de porcelets au Québec

Hamza BELAHBIB (20%)
École de technologie supérieure
BELH18088705
hamza.belahbib.1@ens.etsmtl.ca

Rachid BOUDHAIR (20%)
École de technologie supérieure
BOUR15129201
rachid.boudhair.1@ens.etsmtl.ca

Youcef CHENAF (7%)
École de technologie supérieure
CHEY19099209
youcef.chenaf.1@ens.etsmtl.ca

Alexandru CIORBA (20%)
École de technologie supérieure
CIOA26097506
alexandru.ciorba.1@ens.etsmtl.ca

Catherine ST-PIERRE (33%)
École de technologie supérieure
STPC23579708
catherine.st-pierre.1@ens.etsmtl.ca

RÉSUMÉ

Le nombre d'élevage de porcelets ainsi que leur consommation d'énergie est en augmentation au Québec. En raison de leur petite taille, les grands besoins en chaleur sont généralement réponsés par des systèmes propane. Afin de réduire la consommation en propane et en électricité, cet article présente l'analyse de la faisabilité énergétique, environnementale et économique de l'intégration d'un mur solaire avec panneaux photovoltaïques (PV) dans une pouponnière de St-Hyacinthe, Qc. Par simulation numérique, le mur solaire diminue de 55%/an la consommation en propane. Avec une augmentation du rendement des panneaux PV de 5%/an et un stockage par batteries, le projet réduit la consommation électrique d'environ 15%/an. Le système intégré abaisse l'impact sur le réchauffement climatique à raison de 12,5 tonnes éq. CO₂/an. Une période de retour sur investissement de 11 ans et un coût actualisé de 0,21 \$CAN/kWh sont acceptables considérant les subventions potentielles et la grande durée de vie du mur solaire. Sur les trois plans, le projet semble viable. La poursuite de l'analyse numérique est recommandée pour vérifier et affiner les résultats obtenus.

Mots-clés: Collecteurs aérauliques avec panneaux photovoltaïques, Porcelet, Québec, Énergie

NOMENCLATURE

Symboles utilisés

PV : Photovoltaïque
GES : Gaz à effet de serre
 q : Gain ou perte de chaleur
E : Énergie produite ou consommée, kWh
A : Surface, m²
RS : Rayonnement solaire, kWh/(m²)
N : Nombre de jour

RET : RETScreen

F_{GES} : Facteur d'émissions de GES, g éq.CO₂/ kWh
CAPEX : coût d'investissements, \$ CAN
OPEX : coûts d'opération, \$ CAN/an
LCOE : Coût actualisé de l'énergie, \$ CAN/kWh

Lettres grecques

η : Rendement, %
 α : Absorptivité

Indices/Exposants

T : total
É : Électrique
th : thermique
H : horizontal
Inc : inclinée
Q : quotidien

INTRODUCTION

La production porcine est le deuxième secteur d'élevage en importance au Québec [1]. En 2019, elle a engendré 1,4 G\$ de recettes, soit 25% de la production animale [1]. Entre 1993 et 2005, la production de porcelets a augmenté de 45% et les coûts en énergie ont doublé [2]. Les besoins de chauffage dans ce type d'élevage sont importants, puisque la taille des porcelets les rend vulnérables aux basses températures. Après l'électricité, le propane est la deuxième source d'énergie utilisée dans l'élevage porcin. Il est essentiellement utilisé pour le chauffage des bâtiments [3]. Considérant l'importance économique du secteur, l'intérêt grandissant de l'élevage de porcelets ainsi que leurs

grands besoins en chauffage utilisant notamment un combustible fossile, il est intéressant de contribuer à la lutte contre les changements climatiques en réduisant la consommation énergétique des bâtiments hébergeant les porcelets (pouponnières) au Québec.

L'objectif de cet article est d'étudier la faisabilité énergétique, environnementale et économique de l'intégration d'un mur solaire avec panneaux photovoltaïques (PV) dans une pouponnière québécoise. Le mur solaire permettra de préchauffer l'air frais extérieur. Plus versatile, l'électricité produite servira à divers postes de consommation comme l'éclairage et la ventilation.

Tout d'abord, la démarche entreprise pour quantifier les performances thermiques et électriques sera explicitée. Ensuite, l'évaluation des performances globales sera suivie de l'impact environnemental et économique. Enfin, des recommandations quant à la faisabilité du projet seront formulées.



MÉTHODOLOGIE

La conception des bâtiments est intimement liée à la conduite des élevages. L'élevage en bandes, où les animaux entrent et quittent le bâtiment tous en même temps (principe tout plein/ tout vide), est fréquent [4]. Une telle structure de production présente de nombreux avantages dont la limitation de la propagation de maladies par l'assainissement des locaux entre les élevages [5]. La production porcine est devenue spécialisée: les étapes de croissance requièrent des bâtiments spécifiques.

La pouponnière étudiée est située à St-Hyacinthe (Qc) en raison de la concentration d'acteurs spécialisés dans l'agroalimentaire [6].

La figure 1 présente le plan de la nouvelle pouponnière ayant une hauteur arbitraire des murs de 3,2 m. Pour simplifier l'analyse, le bâtiment est exclusivement dédié aux porcelets. Les 26 parcs serviront à les loger. En raison de l'absence des animaux, l'entrée de 42 m² n'est pas chauffée. La superficie à chauffer est donc de 420 m². Les dimensions choisies respectent la superficie requise par animal exigé par le nouveau code de pratiques du Canada qui est donnée à l'annexe 1. La production de 1 000 places où les porcelets sortent avec une masse de 30 kg est considérée. Il y aurait environ 38 animaux/parc. Le mur solaire et les panneaux PV sont sur la façade Sud afin de maximiser l'apport de l'énergie solaire.

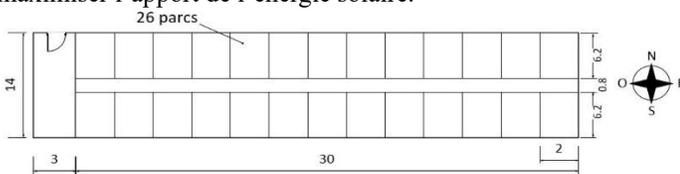


Figure 1: Plan de la pouponnière (dimensions en m)

Les méthodes pour évaluer la performance globale sont nombreuses et varient en complexité. Le manque de standards permettant cette évaluation freine l'adoption des systèmes électriques et thermiques intégrés [7]. Dans le cadre de cette étude, le rendement global est quantifié à l'aide de l'équation 1. Variant entre 0,35-40 [8], le facteur de 0,4 représente l'exergie supérieure de l'électricité comparativement à la chaleur.

$$\eta_T = \frac{\eta_E}{0.40} + \eta_{th} \quad (1)$$

Le rendement du mur solaire est obtenu à l'aide de RETScreen Expert (RET), un progiciel d'énergies propres qui évalue la pré-faisabilité de projets en efficacité énergétique et en énergies renouvelables. Il se base sur la comparaison entre un cas de référence, qui est le cas conventionnel, et un cas proposé, qui intègre la conception étudiée. En plus de contenir des bases de données météorologiques, de produits et de coûts mis à jour, il intègre une section dédiée au mur solaire dans laquelle de nombreux paramètres peuvent être définis. Également, cet outil

permet l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre (GES) et de la faisabilité économique. L'évaluation des économies énergétiques, monétaires et environnementales est ainsi facilitée.

Le rendement du système PV est calculé à l'aide de PVsyst, un logiciel de simulation et dimensionnement d'installations solaires PV. Contrairement à RET, PVsyst permet de modifier les pertes dans la chaîne de transformation d'énergie. Il est donc plus facile d'intégrer l'influence du mur solaire sur les panneaux. Ce logiciel génère un rapport complet avec diagramme de pertes qui facilite l'interprétation des résultats.



CONCEPTION MUR SOLAIRE

D'abord, il faut préciser l'emplacement des installations. Les données climatiques de Varennes sont utilisées, puisque c'est l'emplacement le plus près de St-Hyacinthe dans RET. Ensuite, les paramètres qui se rapportent à la consommation énergétique sont définis. Ils sont abordés aux sections suivantes.

CHAUFFAGE

La représentation schématique de la pouponnière est illustrée à la figure 2. En hiver, l'air pénètre par les perforations, se fait chauffer pour être introduit dans les parcs par un plafond diffuseur. À l'été, les registres de dérivation sont nécessaires pour éviter l'aspiration par le mur solaire et permettre la ventilation naturelle des PV, ce qui améliore ces performances. Aucun échangeur de chaleur permettant la récupération de la chaleur de l'air viciée pour le préchauffage de l'air d'entrée n'est considéré. L'intégration d'une seconde mesure d'efficacité énergétique réduirait les besoins en chauffage de sorte à biaiser l'impact du mur solaire. De plus, les effets croisés entre les deux mesures complexifieraient la définition du taux de récupération de chaleur, seule donnée du logiciel qui quantifie la portion de l'énergie qui est récupérée.

La période pour laquelle il y a des besoins en chauffage est estimée entre la mi-septembre à la mi-mai (8 mois), puisque c'est lors de cette période que le nombre de degrés-jours de chauffage (de base 18°C) est non nul. Le mur solaire et autres équipements de production de chaleur fonctionnent pendant 240 jours. Un bilan d'énergie permet d'identifier les apports et les pertes de chaleur comme montré à l'équation 3. Les gains considérés se rapportent aux systèmes de production de chaleur (q_{chauff}) et à la chaleur sensible de porcelets (q_{sens}). Les pertes considérées se rapportent à l'enveloppe (q_{Env}) et à la ventilation (q_{vent}). Ces termes sont abordés dans ce qui suit.

$$q_{chauff} + q_{sens} = q_{Env} + q_{vent} \quad (3)$$

Système de production de chaleur

L'aérotherme à propane UDAS-75 de Reznor, ayant un rendement thermique de 83% [9], est choisi comme système de chauffage principal. Pour éviter de chauffer inutilement des espaces n'ayant pas de porcelets, un système de chauffage localisé est nécessaire. Des tapis chauffants, qui sont des tapis matelassés de forme rectangulaire sur lesquels les porcelets s'allongent, sont choisis. Ils convertissent l'électricité en chaleur

par rayonnement. Ils ont une durée de vie 20 fois supérieure et consommant environ le tiers de la puissance électrique des lampes infrarouges [10]. Parmi le répertoire des tapis admissibles à une ancienne subvention d'Hydro-Québec (HQ), le modèle *FH-RS2B40* du fabricant Osborne est sélectionné dont les spécifications sont présentées à l'annexe 2. Puisqu'un tapis peut accueillir jusqu'à 24 porcelets et qu'il y a 38 animaux/parc, il y a 2 tapis/parc, soit 52 pour le bâtiment.

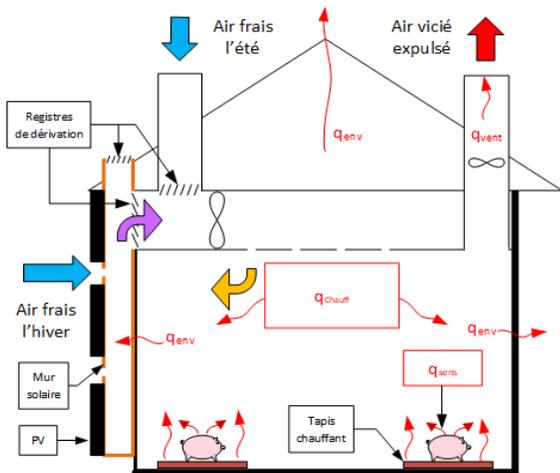


Figure 2: Schématisation des gains et pertes en chaleur

La température optimale à maintenir varie selon la masse: elle est de 35°C ap... jours de sevrage et de 27 °C à 5-20 kg [11]. Pouvant chauffer les porcelets de 16-20°C au-dessus de l'air ambiant et étant modulables [12], la température de consigne de l'aérotherme est fixée à 20 °C. Autrement dit, le système principal assure une température de 20 °C, tandis que les tapis s'ajustent pour apporter la chaleur additionnelle.

Puisque les systèmes de rafraîchissement de pores se basent davantage sur l'utilisation de l'eau (ex: pulvériser de l'eau aux entrées d'air) et non sur le refroidissement de l'air [13], aucun système de climatisation est considéré.

En considérant 6 élevages/an d'une durée de 7 semaines chacun, le nombre d'heures d'occupation, pour lesquelles l'aérotherme fonctionnent, est de 7055 hr/an.

Chaleur sensible des porcelets

La chaleur dégagée par les animaux réduisant les besoins en propane varie selon leur masse. Puisque les porcelets sont en croissance, une moyenne est effectuée pour la quantifier. Considérant que la chaleur sensible varie de 19 à 62 W pour des porcelets allant de 5kg à 20kg [14], elle est approximée à 41 W. Pour le cheptel de 1 000 porcelets, elle s'élève à 236 160 kWh/an. Sous *Utilisation Finale* type *Autre*, cette valeur est implantée avec un signe négatif dans le logiciel.

Pertes par l'enveloppe du bâtiment

L'enveloppe influence la consommation énergétique de plusieurs manières. Les résistances thermiques effectives globales des éléments comme les murs impactent les pertes de

chaleur et donc la consommation de propane. Les facteurs, comme les matériaux et épaisseurs, ont été pris en compte dans l'étude. L'outil complémentaire *Caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment* est utilisé pour déterminer ces valeurs qui sont présentées à l'annexe 3. En RSI, les résistances des murs (4,55) et du toit (7,67) considérés sont validés par ceux de littérature, qui sont de 4,7 et 7,8 pour les régions froides [15].

Les infiltrations naturelles d'air neuf par les fissures influencent aussi les pertes. Puisque l'évaluation n'est pas évidente, la méthode qui consiste à évaluer qualitativement les fuites à travers les murs, fenêtres et portes est employée. RET évalue les infiltrations moyennes globales à 102 CFM/a

Pertes par ventilation

Bien que nécessaire pour maintenir un taux d'humidité et une concentration de gaz nocifs comme l'ammoniac acceptables, la chaleur contenue dans l'air évacué entraîne une perte d'énergie devant être compensée. Le débit de ventilation doit donc être quantifié. L'approche utilisée se base sur un taux d'humidité maximal de 75% et non sur la concentration de gaz nocifs, puisqu'il est plus réaliste qu'un hygromètre soit utilisé dans le bâtiment qu'un appareil mesurant la concentration des gaz. La quantité de vapeur d'eau à évacuer est celle approximée par Turnbull et Huffman pour une température extérieure hivernale de -25 °C: 7,6 g d'eau/kg d'air est évacué [15]. Étant variable selon la masse, la production de vapeur d'eau pour un porcelet de 25 kg dans une température ambiante de 20 °C est considérée pour simplifier l'analyse. Elle est de 61 g d'eau/h [16]. La quantité d'air à évacuer est donnée par :

$$\text{Taux}_{\text{ventilation}} = \frac{61 \left[\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{h*porc}} \right]}{7,6 \left[\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{kg d'air}} \right]} = 8 \left[\frac{\text{kg d'air}}{\text{h*porc}} \right] \quad (4)$$

Puisque 1 kg d'air représente un volume de 820L à 15°C [15], il faut évacuer 6560 L/(hr*porcelets) ou 3,86 CFM/porcelets ou 3860 CFM pour la pouponnière. Le débit de conception totale est arrondi à 4000 CFM. Le système de ventilation doit fournir l'entièreté de l'air neuf lorsque le mur solaire n'opère pas, soit sur une durée de 4 mois. Le taux d'air neuf est ainsi approximé à 30%. Les spécifications des ventilateurs sont déterminées dans une section ultérieure.

Mur solaire

Étant de couleur noir afin d'absorber une plus grande portion de l'énergie solaire (α de 0,94) un absorbeur de métal perforé type *SolarWall* est modélisé. Puisque le capteur est intégré à la façade Sud, l'angle d'inclinaison est de 90° et l'azimut est de 0°. Un débit de ventilateur standard est choisi. Pour éviter la saleté et la neige, le capteur est à 20 cm du sol. La surface du mur solaire est donc de 90 m².

Les économies engendrées découlent de trois sources: la récupération des déperditions thermiques du mur ayant le capteur solaire, la déstratification de l'air et l'énergie solaire capturée par le mur. Puisque le transfert de chaleur est complexe les détails de calculs ne sont pas présentés au sein de cette étude. La température intérieure de 20 °C correspond à la température de consigne en chauffage. Puisque c'est à cette température que

le système au propane n'est plus nécessaire, cette température est choisie comme étant la température maximale de l'air fournie par le mur solaire. Avec des gains internes possiblement élevés en raison des tapis chauffants et de la chaleur dégagée des porcelets, un écart de température entre le plafond et le sol de 2°C est introduite. Pour maintenir une qualité optimale de l'air et simplifier l'analyse, le système opère de manière continue (24hr/7jr) pendant la durée de chauffage de 8 mois.

Le mur solaire peut induire deux effets antagonistes sur la puissance de ventilation additionnelle par rapport au système de référence [17]. D'une part, les perforations peuvent entraîner une augmentation de pertes de pression, qui exigerait un ventilateur plus puissant que dans le cas sans mur solaire. D'autre part, l'augmentation de la température de l'air dans le capteur ferait que l'air monte plus facilement vers le centre de distribution. Le ventilateur pourrait donc consommer moins d'énergie. Comme première approximation, une puissance supplémentaire annuelle d'électricité de 7 W/m² est introduite.

Le rendement thermique

Le rendement du mur solaire est défini comme la portion du rayonnement solaire reçue par le mur solaire pendant son utilisation et convertie en énergie thermique utile, comme montré à l'équation 4.

$$\eta_{th} = \frac{E_{fournie} + E_{Déperdition\ thermique}}{A_{MS} * \sum RS_{Q\ inc} * N}$$

$$\eta_{th} = \frac{28\ 058 \left[\frac{kWh}{an} \right] + 2\ 056 \left[\frac{kWh}{an} \right]}{90 [m^2] * 778,9 [kWh/m^2]} = 43 \%$$

Le numérateur exclut l'énergie par déstratification, puisque le rendement mesure l'énergie transférée à l'air entre l'entrée et la sortie du mur solaire [18]. L'interprétation du résultat est effectuée dans l'analyse énergétique.

CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

La consommation électrique des ventilateurs, de l'éclairage et des tapis chauffants sont intégrés dans RET pour évaluer les besoins du bâtiment de référence. Ces dernières sont requises pour simuler les performances des panneaux à l'aide de PVsyst.

Ventilateurs

Considérant un débit de conception totale de 4000 CFM, 4 ventilateurs d'extraction et 4 ventilateurs d'approvisionnement sont choisis. Chacun déplace 1000 CFM d'air. Le modèle d'équipement est choisi en fonction du débit d'air en fonctionnement nominal. En général, les ventilateurs axiaux sont préférables pour des bâtiments abritant du bétail, car leur coût est moindre et ils sont plus efficaces pour évacuer l'air vicié [19]. Le modèle CHORE-TIME MODEL 14RLX est choisi à une pression statique arbitraire de 0.10" H₂O. Les valeurs entrées dans RET sont présentées à l'annexe 5.

Avec un facteur de charge de 89% (rapport entre la puissance nominale par la puissance en vitesse unique directe), le rendement en condition d'opération est de 19,7%. La consommation électrique des ventilateurs est de 30 641 kWh/an.

Éclairage

Recommandées pour des plafonds inférieurs à 12', les lampes fluorescentes T8 avec ballast électronique sont sélectionnées [20]. Le modèle GE A19 de RET est considéré. L'annexe 6 présente les spécifications. Il est recommandé de varier l'éclairement dans la journée [21].

Pour le jour (8hr), un éclairement de 50 lux est recommandé [21]. Évalué à l'aide des spécifications des lampes et la superficie où est logée les porcelets, le nombre de lampes est de 9. Les détails de calculs se trouvent à l'annexe 7.

Pour la nuit (16 hr), un éclairage supplémentaire avec les mêmes équipements mais avec 4 luminaires est considéré. Les pertes diverses sont arbitrairement mises à 15%. La consommation électrique pour l'éclairage du jour et de la nuit est respectivement de 786 et 698 kWh/an.

Tapis chauffants

L'hypothèse selon laquelle les tapis fonctionnent exclusivement à leur puissance maximale pendant 8 mois est posée afin de simplifier les calculs. Sachant qu'il y a 52 tapis, la consommation d'électricité est de 59 904 kWh/(an*tapis).

CONCEPTION PANNEAUX PV DESCRIPTION DU SYSTÈME PV

Des batteries électrochimiques sont utilisées afin de combler des besoins électriques durant la nuit et lors de jours de mauvais temps. Un régulateur DC/DC est choisi afin de limiter la décharge des batteries qui a un impact important sur leur durée de vie [22]. Le courant continu généré pourra faire fonctionner des appareils mise en marche pendant la journée.

HYPOTHÈSES DE SIMULATION

Superficie des panneaux

Puisque les panneaux PV sont posés sur le mur solaire, une superficie de 4 m² est réservée aux perforations et structure supportant les panneaux. La superficie totale disponible pour les panneaux est donc de 86 m². Le dimensionnement selon la superficie disponible est choisi dans PVsyst.

Optimisation de l'orientation

L'inclinaison et l'orientation des panneaux sont des paramètres importants. Puisque les panneaux sont installés sur le mur solaire orienté plein Sud, l'inclinaison est de 90° et l'orientation de 0°. Plus le panneau PV est perpendiculaire aux radiations solaires incidentes, plus la production est élevée. La production est donc maximisée pour la période de l'hiver.

Choix de la technologie pour panneaux PV

La base de données du logiciel est utilisée pour le choix de l'équipement. Après plusieurs essais avec différents modèles de panneaux, le choix de la technologie monocristalline est la plus intéressante pour la production d'énergie, car elle offre une gamme de puissance crête plus élevée.

Profil de consommation

En période froide, le besoin est au chauffage : la consommation des tapis chauffants cherche à être réduite. Cette période est la même que pour le mur solaire. Puisque le bâtiment est occupé pour 7055hr/an, l'hypothèse que les tapis chauffants fonctionnant à leur puissance maximale pendant 20h/jr est posée.

En période chaude, ce sont les consommations en ventilation et en éclairage de base qui cherchent à être réduites, puisque les besoins en chauffage seront petits. La puissance des ventilateurs résulte de la division de la consommation annuelle d'énergie par le nombre de ventilateurs et la durée d'occupation annuelle.

Puisque la première moitié est dédiée au chauffage alors que le deuxième, aux deux autres appareils, la période d'utilisation est diminuée de moitié pour les mois de mai et septembre. L'annexe 8 détaille le profil de consommation ciblé.

Système de stockage

Les batteries au lithium-ion sont choisies en raison de leurs performances élevées : leur densité d'énergie est de 110 à 180 Wh/kg et un nombre de cycle de vie de 500 à 1000 (pour obtenir au moins 80% de la charge initiale) [23].

Amélioration du système PV

Puisque les panneaux PV sont superposés sur le mur solaire, le rendement de ces derniers est estimé plus grand en raison du refroidissement qu'engendre la circulation de l'air dans le mur solaire. Puisque l'augmentation du rendement PV du système intégrée, semblable à celui de l'étude, de l'Université Concordia est évaluée à 5% [4] le rendement utilisé est 5% supérieur à celui d'une installation sans mur solaire. Pour introduire ce gain, la composante fixe du facteur de perte thermique est ajustée de façon à obtenir une augmentation de puissance électrique produite entre le cas de panneaux avec isolation arrière et le cas avec panneaux semi intégré avec lame d'air. Le premier cas simule l'absence de mur solaire, le deuxième, le refroidissement engendré par ce dernier. En augmentant la valeur de 29 à 30 [W/(m²*K)], le gain de 5% est modélisé.

RÉSULTATS DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE

Résultats principaux du système PV

Le tableau 5 présente les résultats principaux de la simulation PVsyst. Le système se compose de 44 modules PV totalisant une superficie de 86 m² et de 4 batteries de 222 Ah ayant un volume de 1 m³ chacune. L'annexe 9 détaille la distribution des besoins satisfaits pendant l'année.

Tableau 1: Résultats principaux du système PV

Nbr panneaux installés	44 (en série)
Nbr de batteries	4
Puissance installée	16,72 kWc
Besoins d'énergie annuels ciblés	61 249 kWh
Besoins satisfaits	14 691 kWh (24%)
Besoins non satisfaits	46 559 kWh (76%)

Le rendement du système PV

Comme montré à l'équation 5, le rendement total de l'installation PV est le rapport entre l'énergie électrique annuelle produite par l'énergie disponible qui est défini comme le rayonnement annuel horizontal à St-Hyacinthe. Les divers types de pertes sont illustrées au diagramme de pertes de l'annexe 10.

L'interprétation est effectuée dans la section suivante.

$$\eta_{\text{é}} = \frac{E_{\text{Produite}}}{A_{\text{PV}} * RS_{\text{annuel H}}} = \frac{14\ 691 \text{ [kWh]}}{86 \text{ [m}^2\text{]} * 1311 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}\right]} = 13,03\% \quad (5)$$

ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

RENDEMENT GLOBAL

Calculé à l'aide de l'équation 2, le rendement du système intégré est de 75%. Sachant que le rendement thermique varie de 22% à 55% et le rendement électrique de 10% à 18% pour des collecteurs aérauliques [25], ces rendements individuels et global sont jugés acceptables. Il faut souligner que ces résultats sont théoriques et sont issus d'hypothèses simplificatrices.

La section suivante détaille l'incidence du projet sur la consommation énergétique du bâtiment étudié.

IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

La figure 4 illustre l'influence du projet selon les postes de consommation. La grande diminution des besoins en propane est de 61,3 MWh (55%) qui se traduit par une économie de 8 716 L/an. Il est important de souligner l'importante influence de l'énergie économisée par la déstratification de 2°C qui représentent 41% des économies en combustible. Si les besoins en propane font abstraction de cette économie, la diminution de la consommation de propane devient 36,3 MWh/an (33%), soit de 5 160 L/an. Il faut noter que l'hypothèse concernant l'augmentation de puissance en ventilation engendrée par le mur solaire (7W/m²) augmente d'environ 3,7 MWh/an la consommation d'électricité. Représentant 4% de ce poste, cette augmentation peut être considérée négligeable. La production d'électricité des panneaux PV entraîne une diminution nette de 11 MWh/an (12%) de l'énergie consommée d'HQ.

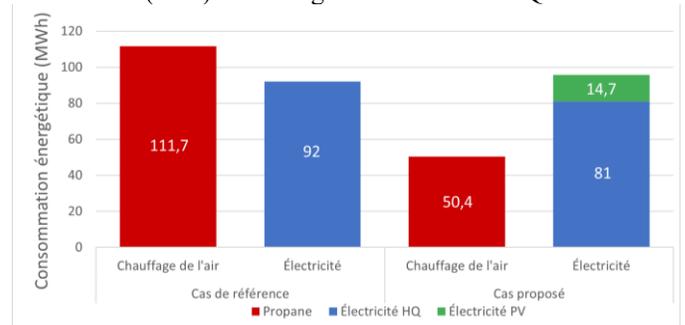


Figure 3: Comparaison de l'énergie consommée par le bâtiment sans et avec projet

Considérant le rendement global et la réduction de la consommation en propane, le projet semble viable sur le plan énergétique.

ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

Afin de quantifier l'impact sur le réchauffement climatique, l'émission équivalente de CO₂ est utilisée comme indicateur. Le tableau 7 présente les émissions des deux cas étudiés. Afin d'avoir une vue d'ensemble des émissions par source d'énergie, l'analyse détaillée de niveau 3 de RET est utilisée pour quantifier les émissions du propane et du réseau électrique québécois du cas de référence. Puisque PVsyst est utilisé pour l'analyse de la production électrique, les émissions du cas proposé pour le réseau HQ et des PV est calculé en multipliant le facteur d'émissions (F_{GES}) par l'énergie.

Le F_{GES} du propane et du réseau HQ provient de RET, tandis que celui des PV provient d'une fiche étudiant l'impact des filières de production d'électricité. Cette fiche est le résultat d'une étude comparative qui considère des données de la littérature, de *ecoinvent* v2.2, une base de données fréquemment utilisée en analyse de cycle de vie (ACV), et d'HQ [26].

Le bilan des émissions résulte en une diminution de 12,5 t. éq CO₂/an. À l'aide du calculateur d'équivalence de RET, cette valeur représente 2,3 automobiles et camions légers non utilisés pour une année ou à 5 360 L/an d'essence non consommée.

Le projet semble bénéfique sur le plan environnemental.

Tableau 2: Impact sur le réchauffement climatique

Source d'énergie	Facteur d'émissions	Cas référence	Cas proposé	Variation
	g éq. CO ₂ /kWh	t éq. CO ₂ /an	t éq. CO ₂ /an	t éq. CO ₂ /an
Propane	220	19,5	6,1	-13,4
Réseau HQ	9	0,8	0,73	-0,07
PV	64		0,94	0,94
	Total	20,4	7,77	-12,53

ANALYSE ÉCONOMIQUE

Le tableau 8 résume l'impact économique du projet. En raison de la difficulté à obtenir de l'information pour le secteur agricole, une subvention de 40 \$ par t éq. CO₂ économisé est utilisée. Il correspond à la taxe fédérale sur le carbone pour 2021 [27]. Les programmes fédéraux n'ont été considérés dû à la difficulté à obtenir de l'information. Le coût du propane est estimé à 0,44\$/L [28] et à 0,10\$/kWh pour l'électricité.

Pour des murs solaires entre 10-100 m², RET n'a qu'un coût d'investissement (CAPEX) maximal qui s'élève à 500 \$/m², ce qui semble grand. En effet, le projet se rapporte à un nouveau bâtiment pour lequel il n'y a aucun coût pour l'adaptation du système à une infrastructure existante. Considérant qu'un mur solaire *SolarWall* de 100 m² a coûté avec installation 25 300\$ [29], un coût de 250\$/m² est utilisé. À l'exception des ventilateurs, qui seront tout de même présents en l'absence de mur solaire, il n'y a pas de pièces en mouvement. Pour le mur solaire, les coûts d'opération reliée à l'entretien sont donc supposés nuls. S'élevant à 3 469\$/an, les économies en énergie considèrent la consommation supplémentaire de ventilation.

Détaillé à l'annexe 11, le CAPEX du système PV comprend les panneaux, le régulateur, les 4 batteries et un parafoudre. La

durée de vie supposée de l'installation PV étant de 20 ans, le coût d'opération (OPEX) considère le changement des batteries qui ont une durée de vie approximée de 10 ans [30].

Tableau 3: Impact économique du projet proposé

		Mur solaire	PV	Système intégré
CAPEX	\$	22 500	29 104	51 604
OPEX	\$CAN/an		829	829
Économies énergétiques	\$CAN/an	3 469	1 469	4938
Subventions	\$CAN/an	536		536
LCOE	\$CAN/an		0,21	
PRI	Année			11,1

Détaillé à l'annexe 12, le coût actualisé de la production électrique (LCOE) est considéré acceptable. Malgré qu'il soit deux fois supérieur au coût d'HQ, il est du même ordre de grandeur. Il faut aussi souligner que les panneaux PV peuvent diminuer la pointe électrique dans la période la plus cruciale de l'année et que des subventions, non considérées dans le LCOE, additionnelles peuvent augmenter la viabilité financière. Il faut savoir que le mur solaire peut avoir des vies utiles jusqu'à 30 ans [31] et qu'uniquement les subventions provinciales sont prises en considération.

Sur le plan économique, le projet semble viable.

CONCLUSION

L'intérêt et les besoins énergétiques croissants de l'élevage de porcelets favorisent l'implantation de mesures pouvant diminuer la consommation énergétique des pouponnières. Pouvant diminuer les demandes en chauffage et en électricité, la faisabilité énergétique, environnementale et économique de l'intégration d'un mur solaire avec panneaux PV dans une pouponnière à St-Hyacinthe est examinée dans cet étude.

L'approche utilisée pour quantifier les performances globales consiste à augmenter le rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité de 5%. Situé du côté plein Sud, le mur solaire est constitué d'un absorbeur perforé en métal sur lequel 44 panneaux PV monocristallin sont posés. 4 batteries Li-ion permet de stocker l'électricité produite afin de partiellement répondre aux besoins des tapis chauffants pendant 8 mois et aux besoins en ventilation et en éclairage pendant 4 mois. Le projet permet de diminuer la consommation de propane de 55%/an, celle de l'électricité, de 15%/an. Une réduction de 12,5 t. éq. CO₂/an est notée. Bien que le LCOE est deux fois supérieur au prix d'HQ, le PRI de 11 ans est considéré acceptable compte tenu des subventions potentielles possibles non prises en considération et de la durée de vie du mur solaire pouvant dépasser le double de cette valeur.

Cette étude de faisabilité indique que le projet est viable autant sur le plan énergétique, qu'économique et environnemental. En raison d'hypothèses simplificatrices comme l'absence d'effet des panneaux PV sur le mur solaire, il est recommandé de poursuivre l'analyse. L'utilisation de logiciels plus complets comme TRNSYS est suggérée.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le Professeur Daniel Rousse et M. Patrick Turcotte pour leur enseignement autant dynamique que formateur du cours ENR811.

REFERENCES

- [1] « Agriculture », *MAPAQ*. <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/md/statistiques/Pages/production.aspx> (consulté le avr. 07, 2021).
- [2] G. Tétreault, « L'énergie dans la production agricole et le secteur des pêches au Québec », p. 55.
- [3] J.-P. Revéret, C. Brodeur, et C. Michaud, « Profil de consommation d'énergie à la ferme dans six des principaux secteurs de production agricole au Québec », Québec, 1, déc. 2006. [En ligne]. Disponible à: https://www.serres.quebec/download/publications/Energie/efficacite_energetique/Profil-de-consommation-denergie-a-la-ferme_-RapportFinal-Volet1-.pdf.
- [4] R. Fillion et F. Pouliot, « Les systèmes de production porcine et leurs répercussions sur la conception des bâtiments », présenté à La production porcine en région, c'est important de s'en parler, Abitibi-Témiscamingue, 2001, Consulté le: mars 12, 2021. [En ligne]. Disponible à: <https://www.agrireseau.net/porc/documents/69618/les-systemes-de-production-porcine-et-leurs-repercussions-sur-la-conception-des-batiments?a=1&r=conduite+en+bande>.
- [5] H. Hebert, A. Lurette, C. Fourichon, H. Seegers, et C. Belloc, « Modalités de conduite en bandes en élevage porcin : effet sur les contacts entre animaux », p. 6.
- [6] « Investir à Saint-Hyacinthe », *Saint-Hyacinthe Technopole*. <https://st-hyacinthetechnopole.com/investir-a-saint-hyacinthe/> (consulté le mars 12, 2021).
- [7] E. D. Rounis, A. Athienitis, et T. Stathopoulos, « Review of air-based PV/T and BIPV/T systems - Performance and modelling », *Renew. Energy*, vol. 163, p. 1729-1753, janv. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.10.085.
- [8] R. Kumar et M. A. Rosen, « A critical review of photovoltaic-thermal solar collectors for air heating », *Appl. Energy*, vol. 88, n° 11, p. 3603-3614, nov. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.04.044.
- [9] Reznor, « Unit heater Catalog », 2017. <https://literature.nortek HVAC.com/pdf/C-UH.pdf?docuid=760E6C57-03EF-44F1-945C-9F9D874905F4&brandkey=Reznor&lgt=51963561613556a506175498928391668> (consulté le mars 23, 2021).
- [10] « Des tapis chauffants pour le confort des porcelets | Secteur porcin - Agri-Réseau | Documents ». <https://www.agrireseau.net/porc/documents/69187/des-tapis-chauffants-pour-le-confort-des-porcelets> (consulté le févr. 02, 2021).
- [11] « Conseil National Pour Les Soins Aux Animaux d'Élevage - Porc Code ». <https://www.nfacc.ca/codes-de-pratiques/porcs-code> (consulté le févr. 02, 2021).
- [12] « Stanfield Heat Pad (2 x 4 ft.) S2B4 », *Osborne Livestock Equipment*. <https://osbornelivestockequipment.com/product/stanfield-heat-pad-s2b4/> (consulté le avr. 06, 2021).
- [13] B. Marquis, « Aspects pratiques et nouveautés en ventilation », *Porc Québec*, p. 29-31, juin 2013.
- [14] P. Massabie, *Manuel de chauffage et de ventilation pour les bâtiments d'élevage porcin*. paris: IFIP - Institut du porc, 2006.
- [15] J. E. Turnbull et H. E. Huffman, « Principes et taux de ventilation mécanique », Consulté le: mars 25, 2021. [En ligne]. Disponible à: https://www.agrireseau.net/documents/document_93242.pdf.
- [16] P. Massabie, « L'abreuvement des porcs », *Tech.-Porc*, vol. 24, n° 6, p. 6, 2001.
- [17] Apprentissage virtuel RETScreen, *Chauffage solaire de l'air - ventilation*. 2020.
- [18] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, et M. Mahdavi Adeli, « An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector », *Appl. Energy*, vol. 87, n° 7, p. 2328-2339, juill. 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.01.001.
- [19] J. E. Turnbull, « CHOIX DES VENTILATEURS POUR LES BÂTIMENTS ABRITANT DU BÉTAIL », p. 10.
- [20] C. Brodeur, D. Crowley, X. Desmeules, et C. Durox, « Audit énergétique sommaire en production porcine », 2008. <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs2670243> (consulté le mars 16, 2021).
- [21] A. Orounla Onouadjé, « Guide d'amélioration de l'efficacité énergétique en production animale : lait-porc-volaille ». UPA Mauricie c'est moi, [En ligne]. Disponible à: <https://www.agrireseau.net/energie/documents/GUIDE%20EIE.pdf>.
- [22] A. Houria, « Le régulateur de charge et de contrôle dans », p. 2, 2014.
- [23] O. Lazzari, « Les accumulateurs lithium-ion au Japon », p. 12, juill. 2006.
- [24] SolarWall, « Institutional John Moslon School of Business Concordia University, Montréal », *Solaripedia*. <https://www.solaripedia.com/files/241.pdf> (consulté le mars 24, 2021).
- [25] C. S. Rajoria, R. Kumar, A. Sharma, D. Singh, et S. Suhag, « Development of flat-plate building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system: A review », *Mater. Today Proc.*, oct. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.790.
- [26] P. Tirado-Seco, G. Martineau, S. Fallaha, F. Saunier, et R. Samson, « Comparaison des filières de production d'électricité et des bouquets d'énergie électrique », Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG), Montréal, nov. 2014. Consulté le: avr. 02, 2021. [En ligne]. Disponible à: <https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/comparaison-filieres-et-bouquets.pdf>.
- [27] T. Roquette, « Taxe carbone : la Cour suprême donne raison à Ottawa », *Radio-Canada.ca*, mars 26, 2021.

<https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1779709/taxe-carbone-decision-cour-supreme-climat> (consulté le avr. 01, 2021).

- [28] « Le point sur les prix du gaz naturel | Comptes et facturation | Votre Maison », *Liberty Utilities*. <https://naturalgasnb.com/fr/votre-maison/comptes-et-facturation/le-point-sur-les-prix-du-gaz-naturel> (consulté le avr. 08, 2021).
- [29] G. Juneau, « Solar Air Heating Systems ». http://www.omafr.gov.on.ca/english/engineer/facts/sol_air.htm (consulté le avr. 02, 2021).
- [30] « LG Chem RESU Battery Review », *CLEAN ENERGY REVIEWS*. <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-battery-storage-lg-chem-leads-tesla> (consulté le avr. 10, 2021).
- [31] S. Deutsch, « Solar Walls Save Money », *National Hog Farmer*, nov. 15, 2007. <https://www.nationalhogfarmer.com/facilities-equipment/solar-walls-save-money> (consulté le avr. 02, 2021).

ANNEXES

Annexe 1 : Démonstration du respect du code pratiques pour le soin et la manipulation des porcs au Canada

$S = 0,0335 * P^{0.667}$ où S : Superficie minimale à respecter (m²/place) ; P : masse de sortie des porcelets (kg)

$S = 0,0335 * 30^{0.667} = 0,32 \text{ m}^2/\text{place}$

La superficie d'élevage dans le bâtiment étudié est de :

$$S_{\text{Bâtiment}} = \frac{26 \text{ parcs} * (2 * 6,2) \text{ m}^2 / \text{parc}}{1000 \text{ places}} = 0,32 \text{ m}^2 / \text{place}$$

Annexe 2 : Spécifications du tapis chauffant FH-RS2B40 d'Osborne

DESCRIPTION

American-made Stanfield Farrowing Heat Pads provide safe, reliable heat for growing pigs. They are the safest, most economical way to promote good health and growth. Heat is distributed evenly and provides a uniform lying area 30-35° F (16-20° C) above air temperature (at full power). **Temperature controls are recommended to maintain optimum surface temperature and extend energy savings.**

Made of Osborne-engineered fiberglass reinforced plastic composite material, the heat pads are 100% water-tight and easy to clean. The treaded surface provides sure footing for piglets and the evenly distributed heat keeps them away from the sow to reduce crush-losses.

[Learn more about Stanfield Heat Pads](#)

Note: Pricing shown for 120V North America heat pads only. Heat pads made to country-specific electrical specifications (voltage, frequency, plug type) are also available. [Request a quote](#) for pricing for country-specific electrical requirements.

SPECS	
CATALOG NUMBER	FH-RS2B40
MODEL NUMBER	S2B4
SIZE	2 X 4 FT. (0.61 X 1.22 M)
ANIMALS SERVED	UP TO 24
MAXIMUM POWER OUTPUT	200 WATTS
VOLTAGE*	120
POWER CORD*	10 FT. (3 M)
MAXIMUM ENERGY USED	4.80 KWH/DAY
TEMPERATURE	30-35° F (16-20° C) ABOVE AIR TEMPERATURE

* HEAT MATS MADE TO COUNTRY-SPECIFIC ELECTRICAL REQUIREMENTS (VOLTAGE, FREQUENCY, PLUG TYPE, ETC.) ALSO AVAILABLE.

Annexe 3 : Résistance thermiques des éléments de l'enveloppe

	Murs	Portes	Toit	Plancher	Dalle
Résistance thermique (en R, m ² *°C/W)	4,55	0,70	7,67	1,02	0,88

Annexe 4 : Température des charges pour le mur solaire

	Intérieure	Air chaud fournie par mur solaire (min-max)	Stratification
°C	20	0-20	2

Annexe 5 : Spécifications des ventilateurs entrés dans RETScreen

Réglage	Débit	Capacité	Efficacité globale	Vitesse plein régime
	CFM	kWh	%	Rpm
Vitesse unique directe	1230	0,122	20	1685

Annexe 6 : Spécifications des lampes utilisé pour l'éclairage

- Éclairage – calculatrice
- Type d'éclairage
- Rendement
- Charge électrique par lampe
- Nombre de lampes par luminaire

Cas de référence

Cas proposé

	Fluorescent T8 - ballast électronique	Fluorescent T8 - ballast électronique
lm/W	85.5	85.5
W	26	26
	1	1

Annexe 7 : Détails du calcul du nombre de lampes pour l'éclairage du jour

$$N_{lum} = \frac{\text{Éclairage}}{\eta_T * P_{lampe} / A}$$

$$= \frac{50 [lux]}{85.5 [lm/W] * 26 [W/luminaire] / 420 [m^2]}$$

$$= 9 \text{ luminaires}$$

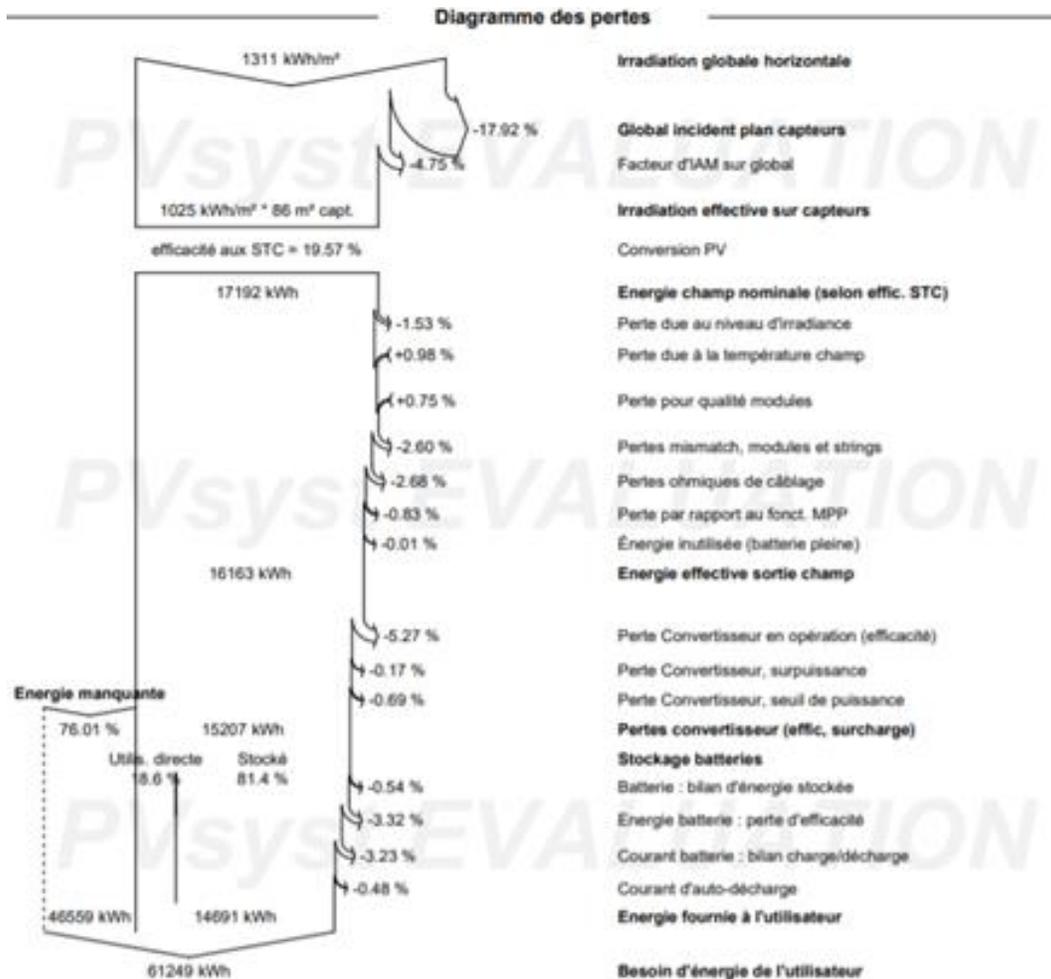
Annexe 8 : Détails Besoins d'électricité ciblés dans PVsyst

Période	Équipement	Nbre	Puissance W	Utilisation Hr/jour
Oct.-avr.	Tapis chauff.	52	200	20
Mai et sept.	Tapis chauff.	52	200	10
	Ventilateurs	8	538	10
	Lampes	9	30	4
Juin-août	Ventilateurs	8	538	20
	Lampes	9	30	8

Annexe 9: Proportion des besoins comblés par la production électrique par mois

Mois	Période hivernale Tapis chauff. (%)	Période estivale	
		Ventilateurs (%)	Lampes (%)
Janvier	20,8		
Février	15,7		
Mars	21,0		
Avril	23,4		
Mai	28,4		
Juin		0	100
Juillet		39,6	100
Août		41,3	100
Septembre	38,0	53,2	100
Octobre	19,9	0	100
Novembre	22,8		
Décembre	16,5		

Annexe 10 : Diagrammes des pertes de PVsyst



Annexe 11 : Détails du CAPEX système PV

Élément	Quantité unités	Coût CAD	Total CAD
Modules PV			
PS-M72-380	44	242.83	10'684.52
Supports des modules	44	30.00	1'320.00
Batteries	4	4'147.02	16'588.08
Régulateurs			320.00
Autres composants			
Parafoudre	1	191.05	191.05
Total			29'103.65

Annexe 12 : Calcul LCOE du système PV

$$LCOE = LFC + LVC$$

$$LCOE = \left(\frac{CAPEX * r}{1 - (1+r)^{-T}} \right) / E_p + \frac{OPEX}{E_p} \text{ où } r : \text{taux d'actualisation ; } T : \text{durée de vie du projet PV } E_p : \text{Énergie annuelle produite}$$

$$LCOE = \left(\frac{29\,104 [\text{\$}] * 0,05}{1 - (1 + 0,05)^{-20}} \right) / 14\,691 [\text{kWh}] + \frac{829 [\text{\$}]}{14\,691 [\text{kWh}]}$$