

QUÉBEC
N° : R-4045-2018

RÉGIE DE L'ÉNERGIE

Dans l'affaire de la *Demande de fixation de tarifs et conditions de service pour l'usage cryptographique appliqué aux chaînes de blocs*

HYDRO-QUÉBEC
Demanderesse

et

LA CORPORATION D'ÉNERGIE THERMIQUE
AGRICOLE DU CANADA (CETAC)
Intervenante

**PIÈCE CETAC-5
RAPPORT D'EXPERTISE DE GOBEIL-DION & ASSOCIÉS INC.**

LA CORPORATION D'ÉNERGIE THERMIQUE AGRICOLE DU CANADA (CETAC)

RAPPORT D'ANALYSE ÉNERGÉTIQUE BLOCKCHAINDOME



CORPORATION D'ÉNERGIE THERMIQUE
AGRICOLE DU CANADA (CETAC)
À L'INTENTION DE BENOIT LALIBERTÉ

19 OCTOBRE 2018

GOBEIL DION & ASSOCIÉS INC
Ingénierie, énergie & environnement

426 Victoria, suite 14, St-Lambert (QC)
450-923-0035 | gobeildion.com

Table des matières

I. Description du mandat	1
A. Mise en contexte	1
B. Étapes du mandat	1
II. Description du procédé BlockchainDome.....	1
A. Puits canadien.....	1
B. Production de chaleur	3
i. Serveurs.....	3
ii. Transformateurs électriques.....	4
C. BlockchainDome test	5
D. Serre test	6
E. Schéma.....	7
F. BlockchainDome type	8
III. Méthodologie.....	8
A. Matériel	8
B. Protocole.....	9
IV. Démarche de calculs.....	10
V. Résultats & Analyse	11
VI. Limites de la simulation et recommandations	18
VII. Conclusion.....	19
VIII. Annexes.....	20
IX. Référence	21

I. DESCRIPTION DU MANDAT

A. Mise en contexte

Gobeil Dion & Associés inc. (GDA) est une firme de consultants spécialisée dans la gestion de projet de construction de serres et l'implantation de système de chauffage à la biomasse et de mesures d'efficacité énergétique en milieu serricole. GDA offre des services d'analyse technico-économique et de gestion de projets pour mener à terme des projets se rattachant aux domaines des serres, de l'énergie et de l'environnement.

Le 1^{er} octobre 2018, GDA a été mandaté par la Corporation d'énergie thermique agricole du Canada (CETAC) afin de réaliser une étude de faisabilité pour un projet de chauffage de serres à l'aide de BlockchainDome à Sainte-Madeline au Québec. L'objectif principal du mandat était de :

Valider que le procédé BlockchainDome représente une source de chaleur pour chauffer une serre pour les productions maraîchères et ornementales au même titre qu'un chauffage au gaz naturel, à l'électricité ou à la biomasse forestière.

B. Étapes du mandat

Les étapes sont les suivantes :

- a) Évaluer la puissance totale de la station de chaleur générée par le BlockchainDome;
- b) Évaluer la puissance transférable en serres en tenant compte des pertes thermiques durant le transfert;
- c) Déterminer la surface de serres pouvant être chauffée pour une opération se déroulant sur une période de 12 mois.

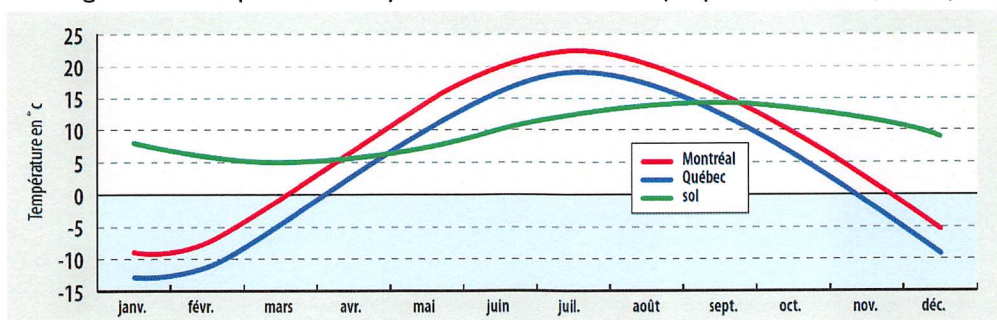
II. DESCRIPTION DU PROCÉDÉ BLOCKCHAINDOME

A. Puits canadien

Le principe de fonctionnement du puits canadien ou échangeur air-sol consiste à utiliser l'inertie thermique du sol pour rafraîchir ou réchauffer l'air provenant de l'extérieur selon les conditions climatiques. Au Québec, la température moyenne du sol varie entre 5 °C en mars à 15 °C en septembre tandis que la température moyenne extérieure varie entre -10 °C en janvier à 23 °C en juillet (Figure 1). Plus l'écart (ΔT) de température entre l'air extérieur et le sol est grand, plus la température de l'air sera

affectée afin de tendre vers la température du sol (Le puits canadien, 2012). Ainsi, puisque la fluctuation de température dans le sol est assez stable au courant de l'année en comparaison avec l'air ambiant, l'air provenant de l'extérieur est tempéré lors de son passage dans le puits canadien avant d'être soufflé sur les serveurs du BlockchainDome afin de refroidir ces derniers.

Figure 1 – Température moyenne de l'air et du sol (Le puits canadien, 2012)



Le rendement du puits canadien, c'est-à-dire l'échange thermique, est influencé par des paramètres tels que :

- La surface de contact :
 - Une grande surface exposée (longueur et diamètre) augmente l'échange thermique;
- Le débit d'air :
 - Un faible débit d'air turbulent augmente l'échange thermique;
- Les matériaux composant le puits canadien :
 - Un matériau à conductivité thermique élevée augmente l'échange thermique.

Le système de puits canadien de la CETAC consiste en 10 paires de tuyaux d'admission (20 tuyaux au total), espacés de 2,40 m entre chaque paire. La prise d'air verticale extérieure est située à 1,2 m (4 pi) au-dessus du sol et est recouverte d'un toit et d'un grillage pour protéger contre les intempéries ainsi qu'empêcher les insectes et les animaux nuisibles d'y entrer (Figure 2). Le tuyau d'admission alimentant le tuyau horizontal de PVC noir Soleno R210 de 600 mm (24 po) de diamètre est enfoui à 2,4 m (8 pi) de profondeur afin d'obtenir une température du sol plus constante. La distance entre le point d'admission du puits canadien et le côté du BlockchainDome est de 27,40 m. Le tuyau horizontal est installé avec une pente vers l'entrée du puits canadien et une pompe à chacun de ceux-ci permet d'évacuer les condensats qui

peuvent se créer dans le puits canadien lorsque l'air extérieur chaud et humide entre en contact avec les parois plus froides du puits.

Figure 2 - Photo puits canadien (18 octobre 2018)



B. Production de chaleur

i. Serveurs

Chaque tuyau horizontal de 600 mm est connecté à 50 tuyaux verticaux de 150 mm (6 po) de diamètre et de 3.66 m (12 pi) de long en polyéthylène BNQ B1821/320 permettant de refroidir chaque boîtier de serveur (Figure 3). Le premier serveur est à une distance de 1,70 m de la bordure du BlockchainDome et la distance entre chaque serveur est de 0,22 m excepté pour le couloir central de 2,40 m entre le 25^e et le 26^e serveur.

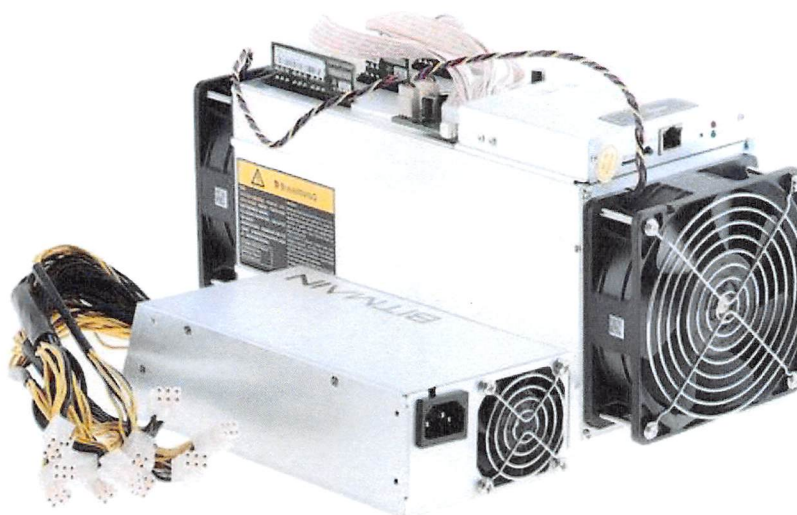
Figure 3 – Tuyaux de ventilation verticaux (10 octobre 2018)



Chaque dôme contient 1 000 serveurs Antminer S9i aillant une puissance brute individuelle de 1 372 W (Figure 4). Les vitesses du ventilateur inférieur et supérieur sont de 4 300 et 6000 rpm respectivement et la température d'entrée d'air et de fonctionnement du serveur doit se situer entre 0 et 40 °C selon les spécifications du manufacturier. Les serveurs sont conçus pour être montés hermétiquement sur les tuyaux verticaux selon une méthode de jonction exclusive développée par CETAC, ne permettant pas l'entrée d'air par les prises électriques et les tuyaux de puits.

Une pression négative se créer à l'intérieur du boitier du serveur grâce aux ventilateurs qui en expulsent l'air. La pression à l'intérieur du boitier est donc plus basse que celle à l'extérieur. L'air frais provenant du puits canadien est donc aspiré dans le boitier du serveur pour y être réchauffé par le serveur et ensuite être expulsé dans le dôme.

Figure 4 – Serveurs Antminer S9i



ii. Transformateurs électriques

Chaque dôme contient 10 transformateurs électriques Commercial C802-Series modèle DA3150V permettant de diminuer la tension du courant entrant de 600 V à 120 V (Figure 4) afin d'alimenter les serveurs. Lors de ce processus, une quantité de chaleur est dégagée par chaque transformateur et s'ajoute à l'énergie cumulative émise dans le dôme.

Figure 5 – Transformateurs (15 octobre 2018)



C. BlockchainDome test

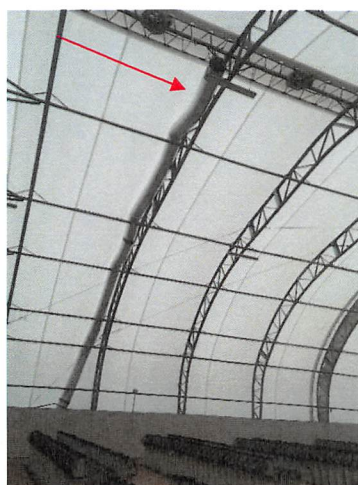
Le MegaDôme provenant des Industries Harnois mesure 36,30 m de long par 21,30 m de large et la hauteur au pignon est de 9,41 m (Figure 6). La membrane blanche de polyéthylène tissée permet une transmission lumineuse de 8,3%. Le dôme comprend 6 trappes d'air de 6 pi par 6 pi, 6 trappes de 1 pi de diamètre, 1 porte de garage de 4,27 m par 4,27 m et une porte d'homme conventionnelle.

Figure 6 – BlockchainDome (15 octobre 2018)



En plus de l'apport thermique des serveurs, le dôme absorbe une quantité d'énergie provenant du rayonnement du soleil durant le jour. Par contre, des déperditions sont encourues par la radiation, par la conduction des surfaces et par la convection naturelle. L'air provenant des serveurs est émis et mélangé dans le dôme accueillant les serveurs créant une stratification des températures. Ensuite, l'air est en partie aspiré du dôme via un conduit de ventilation flexible avec collets de 430 mm de diamètre. Ce dernier est situé au sommet du dôme, au-dessus de la 5^e et 6^e rangée de serveurs et se dirige vers la serre voisine du dôme. Plus précisément, les dimensions du conduit sont de 10,2 m du sommet du dôme au bas du dôme, 5,9 m entre le dôme et la serre à une profondeur de 0,6 m (2 pi) sous terre et 2,8 m dans la serre.

Figure 7 – Conduit de ventilation flexible (15 octobre 2018)



D. Serre test

La serre test en polyéthylène double mesure 15,40 m de long par 7,70 m de large et la hauteur à la gouttière et au pignon est de 1,90 et 4,27 m respectivement. L'air chaud provenant du dôme est aspiré dans la serre par un ventilateur 0,5 HP de VENTEC de 430 mm de diamètre situé à l'extrémité du conduit de ventilation flexible. L'air est ensuite soufflé via un tuyau de polyéthylène simple perforé à tous les 3,2 m de chaque côté (Figure 8). Cette masse d'air est dissipée dans la serre afin d'atteindre les températures de consigne souhaitées et des volets peuvent être ouverts pour réguler le débit d'air et la température de la serre. Tout comme le dôme, la serre reçoit une quantité d'énergie provenant du rayonnement du soleil, mais des déperditions sont encourues par la radiation, par la conduction des surfaces et par la convection naturelle.

Figure 8 – Conduite de chauffage de la serre (18 octobre 2018)



E. Schéma

Figure 9 - Vue du dessus

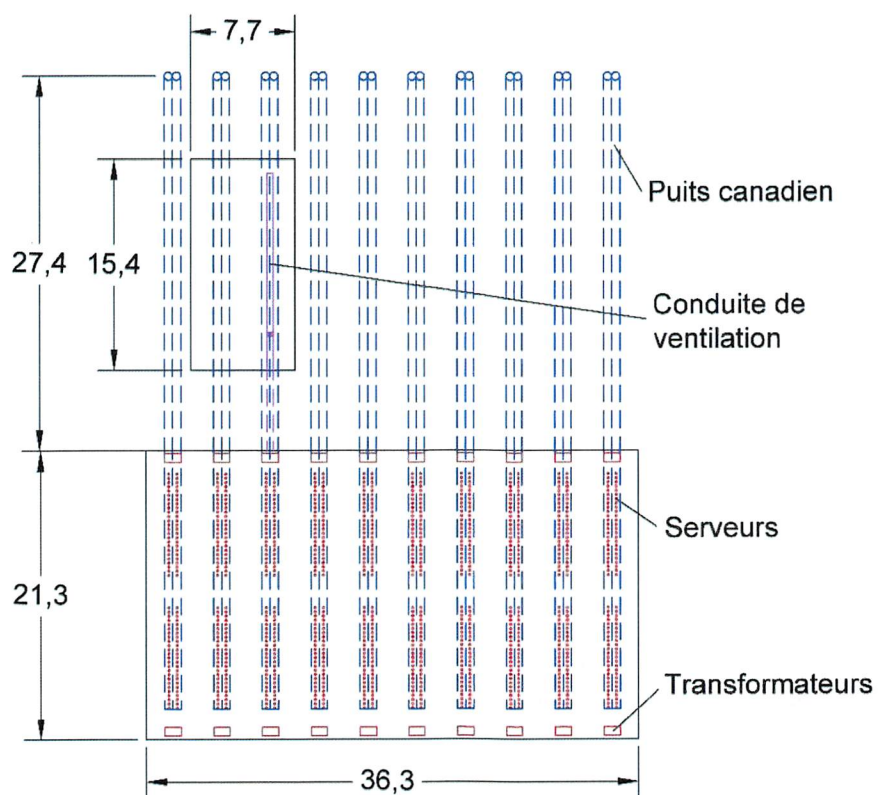
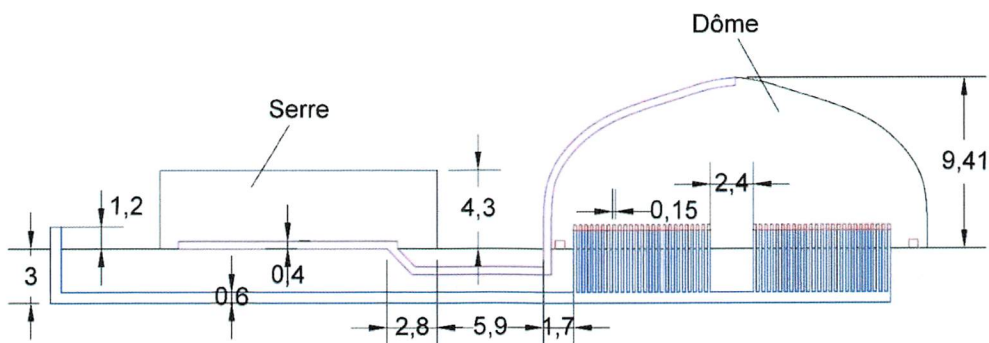


Figure 10 - Vue de côté



F. BlockchainDome type

Le BlockchainDome type qui sera potentiellement installé dans le futur est légèrement différent du BlockchainDome actuel dans lequel les tests et les mesures ont été prises.

- Longueur : 58,52 m
- Largeur : 21,3 m
- Hauteur au pignon : 9,41 m
- Serveurs : 1 500 serveurs sur 15 rangées

III. MÉTHODOLOGIE

A. Matériel

- Anémomètre Multi-Fonctions, AMI300 de KIMO
 - Sonde à fil chaud télescopique modèle FCT900
 - Sonde d'humidité et température KIMO HRI300
- Ruban à mesurer
 - Rétractable
 - Long
- Nacelle articulée
- Boîte en panneau de plastique corrugué
- Caméra infrarouge
- Perceuse
- Ruban à conduit

B. Protocole

Les mesures présentées dans la section *Résultats* ont été prises le 15 octobre 2018 entre 9 h et 16 h à la Corporation d'énergie thermique agricole du Canada (CETAC), soit au 1560 Petit Rang à Sainte-Madeline (QC). Les mesures ont été prises dans le dôme #1 contenant 1 000 serveurs Antminer S9i.

Évaluation du système de puits canadien

- a) Obtenir les dimensions et les matériaux du système pour réaliser un schéma.
- b) Mesurer la vitesse et la température de l'air à l'entrée extérieure du puits canadien à 1 m de l'entrée d'air. Prendre 7 mesures afin d'avoir un portrait global de l'écoulement de l'air. Chaque mesure est une moyenne sur 10 secondes.

Évaluation de l'ensemble des serveurs

- a) Mesurer la vitesse et la température de l'air pour le serveur #1 dans le tuyau horizontal de 15 cm de diamètre à 10 cm de l'entrée de la boîte. Prendre 3 mesures, soit milieu du tuyau (7,5 cm), mi-chemin entre la paroi et le milieu du tuyau (3,75 cm), et proximité de la paroi (1 cm). Chaque mesure est une moyenne sur 45 secondes. Répéter pour le serveur #25 et #50.
- b) Mesurer la vitesse et la température de l'air pour le serveur #1 à 10 cm de la sortie de la boîte en panneau de plastique corrugué. Prendre 3 mesures, soit milieu du tuyau (7,5 cm), mi-chemin entre la paroi et le milieu du tuyau (3,75 cm), et proximité de la paroi (1 cm). Chaque mesure est une moyenne sur 45 secondes. Répéter pour le serveur #25 et #50.

Évaluation de la distribution de chaleur dans le dôme

- a) Obtenir les dimensions et les matériaux du dôme et du conduit d'acheminement de la chaleur pour réaliser un schéma.
- b) Mesurer la température de l'air à 3 endroits, soit au sol (1 m), mi-chemin entre le sol et le sommet du dôme (4,5 m), et sommet du dôme (9 m). Chaque mesure est une moyenne sur 45 secondes.
- c) Mesurer l'humidité ambiante.

Évaluation de la distribution de chaleur dans la serre

- a) Obtenir les dimensions et les matériaux de la serre pour réaliser un schéma.
- b) Mesurer la vitesse et la température de l'air dans le tuyau de polyéthylène à 96 cm du ventilateur situé à la sortie du conduit d'acheminement de la chaleur. Prendre 3 mesures, soit milieu du tuyau (21,5 cm), mi-chemin entre la paroi et le milieu du tuyau (10,75 cm), et proximité de la paroi (1 cm). Chaque mesure est une moyenne sur 45 secondes. Répéter à une distance de 420 cm du ventilateur.
- c) Mesurer la vitesse et la température de l'air au milieu de la serre. La mesure est une moyenne sur 45 secondes.
- d) Mesurer l'humidité ambiante.

IV. DÉMARCHE DE CALCULS

Tel qu'expliqué plus en détail dans la section *Description du procédé BlockchainDome*, les échanges thermiques et massiques du procédé sont :

1. Échange de chaleur entre l'air extérieur et le sol (puits canadien)
2. Échange de chaleur entre l'air du puits et le serveur
3. Échange de chaleur entre l'air ambiant du dôme et le transformateur
4. Distribution de chaleur dans le dôme
5. Échange de chaleur entre la conduite de chauffage de la serre et le sol
6. Échange de masse dans la serre

L'échange de chaleur (en Watts) pour chacun des systèmes est calculé à l'aide de la formule suivante : $\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T$ où \dot{m} est la masse volumique (m^3/s), c_p est la chaleur spécifique ($\text{J}/\text{m}^3\text{K}$) et ΔT est la différence de température entre l'entrée et la sortie du système (K ou °C).

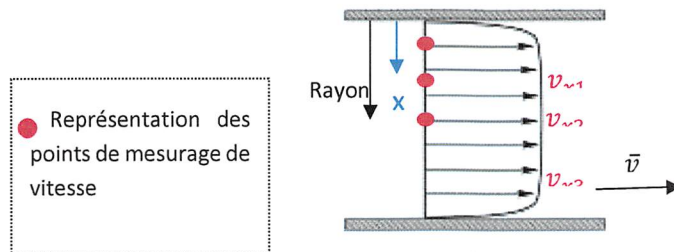
La masse volumique d'air est déterminée comme suit : $\dot{m} = A\bar{v}$ (en m^3/s), l'aire transversale du tuyau (m^2) multipliée par la vitesse moyenne (m/s).

Le débit d'air dans le puits canadien, dans le tuyau sous le serveur et dans le tuyau de distribution du dôme à la serre est turbulent, c'est-à-dire que, pour chacun des cas, le nombre de Reynold est plus grand que la valeur critique 2300. Nombre de Reynold :

$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$, où ρ est la densité de l'air (kg/m^3), v est la vitesse (m/s), D est le diamètre du tuyau (m) et μ est la viscosité dynamique.

Avec un débit turbulent, le profil de vitesse est presque uniforme sur la largeur du tuyau, à l'exception des particules circulant près de la paroi qui ont une vitesse beaucoup plus basse due à la résistance causée par la friction. Étant donné que les vitesses mesurées dans les tuyaux ont été prises à une distance x de la paroi et que $x > 0$, une moyenne des vitesses est réalisée pour obtenir \bar{v} du système. Par le fait même, les échantillons de vitesses mesurées pour chacun des tuyaux à différentes distances x montrent une constance, ce qui représente bien le profil de vitesse représenté ci-dessous, voir *Figure 1*.

Figure 11 - Profil de vitesse pour un débit turbulent



Similairement, les points de température ont été enregistrés à différentes distances x et la température moyenne ($^{\circ}\text{C}$) est utilisée pour les calculs. La chaleur spécifique c_p variant en fonction de la température est sélectionnée pour la moyenne des températures T_1 et T_2 .

V. RÉSULTATS & ANALYSE

Les résultats quantifient la puissance de production de chaleur du procédé de BlockchainDome pour la journée du 15 octobre, selon les conditions environnementales du moment. Ainsi, un changement de température extérieure, de température du sol, du rayonnement solaire, de la vitesse du vent, du pourcentage d'humidité relative aura un impact sur les résultats. Étant donné que le système de production de chaleur utilise l'air comme moyen de distribution, la température de l'air entrant dans le système affecte directement la température de l'air sortant du système et donc la puissance thermique générée par les serveurs et les

transformateurs qui peut être acheminée aux serres. Les résultats de ce présent rapport ne peuvent donc pas être utilisés pour une projection annuelle puisqu'ils sont représentatifs des conditions de la journée de collecte de données du 15 octobre 2018. Les conditions ambiantes de cette journée étaient :

- Température extérieure : 9,9 °C
- Vitesse du vent : 4 km/h
- Humidité relative : 92%
- Rayonnement solaire (estimé) : 50 W/m²

1. Échange de chaleur entre l'air extérieur et le sol (puits canadien)

- T₁ : Température de l'air à l'entrée du puits
- T₂ : Température de l'air à la sortie du puits (sous le serveur)

Dans les conditions du 15 octobre, la chaleur provenant d'une ligne de puits canadien (connectée à 50 serveurs) est de 9 243 W. L'apport thermique total des 20 lignes de puits canadien est de **185 kW**.

2. Échange de chaleur entre l'air du puits et le serveur

- T₁ : Température de l'air en dessous du serveur
- T₂ : Température de l'air au-dessus du serveur

Les mesures ont été prises sur 3 serveurs (2 serveurs aux extrémités et 1 serveur au centre) d'une même rangée pour représenter le profil de température et débit tout au long d'une ligne de puits. Le serveur #1 étant le premier serveur à la sortie du puits, le serveur #25 étant situé au centre du dôme et le serveur #50 étant le dernier serveur d'une ligne d'alimentation du puits. Bien que le nombre de trois échantillons mesurés soit faible pour dresser une conclusion, il est observé que la température de l'air sortant du serveur le plus éloigné du puits (serveur #50) a une température plus élevée et un débit plus petit que le serveur le plus près du puits (serveur #1). Ce phénomène s'explique par le fait que la vitesse de l'air le long du conduit principal du puits réduit légèrement dû aux connexions divisant le débit pour alimenter chaque serveur. De plus, ceci est dû à un débit plus petit. L'air qui se rend au dernier serveur (#50) a traversé une plus longue distance dans le sol à une vitesse plus basse et a donc absorbé une plus grande quantité de chaleur. L'air sortant des serveurs éloignés des puits est donc plus chaud que l'air des serveurs situés près des puits.

- Chaleur produite mesurée (moyenne des 3 serveurs) : 1,203 W/serveur
- Consommation électrique d'un serveur (selon les spécifications): 1,372 W/serveur
- Rendement thermique d'un serveur : 88%

Sachant que le débit massique total entrant dans les puits canadiens est égal au débit massique total sortant des serveurs puisque l'on assume qu'aucune perte de masse n'est réalisée dans le système, les mesures obtenues ont été calibrées. L'apport thermique des 1000 serveurs est donc estimé à **1 013 kW**.

3. Échange de chaleur entre l'air ambiant et le transformateur

- T_1 : Température de l'air en dessous du serveur
- T_2 : Température de l'air au-dessus du serveur
- Chaleur produite par le transformateur : 1 935 W
- Dôme 1 : installation de 10 transformateurs : **19 kW**

4. Distribution de chaleur dans le dôme

La température ambiante en hauteur dans le dôme 1 n'a pas pu être mesurée puisque le sol en structure de palettes de 2'x4' n'aurait pas pu supporter le poids d'une nacelle. À l'aide de la nacelle élévatrice, la température dans le dôme 2 a été mesurée à trois hauteurs différentes : la première au niveau du sol, la deuxième à 4,5 m du sol et la dernière à 1 m sous le plafond. Une différence de seulement 0,3 °C a été observée entre le point au sol (38 °C) et le point le plus haut (38,3 °C). Ceci signifie que la distribution de chaleur dans le dôme est très uniforme grâce aux multiples ventilateurs des serveurs mélangeant l'air de manière homogène. De ce fait, la température ambiante mesurée au centre du dôme 1 est assumée comme étant la température à l'entrée du tuyau d'acheminement au sommet du dôme et l'hypothèse de stratification des températures dans le dôme est infirmée.

5. Déperdition du dôme et perte d'air

- T_1 : Température ambiante à l'intérieur du dôme
- T_2 : Température extérieure

La déperdition du dôme est calculée par les pertes de chaleur du toit, des murs, du périmètre et considérant un échange d'air à l'heure. Le coefficient de transfert thermique de la toile blanche du dôme est estimé à 4,55 W/m²K et la transmission lumineuse est de 8,3% selon les spécifications du fournisseur. La perte du dôme 1 est ainsi calculée à **122 kW**.

Toutefois, selon la conception actuelle du dôme 1 et de la petite serre, une grande partie de la chaleur produite par les serveurs et les transformateurs est perdue par les ouvertures au dôme telles que la porte de garage, les six trappes de ventilation de 6 pieds par 6 pieds et les six bouches d'air au toit ayant un diamètre d'environ 1 pied. Cette situation de perte du surplus de la chaleur est temporaire assumant que toute cette chaleur générée pourrait être redirigée vers une serre ayant le dimensionnement approprié.

6. Échange de chaleur entre le conduit de chauffage de la serre et le sol
 - T_1 : Température de l'air à l'entrée du tuyau au plafond du dôme
 - T_2 : Température de l'air à la sortie du tuyau dans la serre
 - Perte de chaleur : **0,5 kW**

La perte de chaleur est due à l'échange thermique du tuyau avec le sol.

7. Apport thermique dans la serre

Tableau 1 – Résultats des transferts de chaleur du système de BlockchainDome actuel avec le dôme 1

Transferts de chaleur		Puissance totale (kW)
Apports	Puits canadien (20 unités)	355
	Serveurs (1000 unités)	1 013
	Transformateurs (10 unités)	19
	Radition soleil sur le dôme	3
	Total apports	1 390
Pertes	Enveloppe du dôme	122
	Distribution dôme à la serre	0,5
	Total pertes	122,5
Total chaleur potentielle pour la serre		1 268

L'apport potentiel de chaleur dans la serre est la somme de la puissance créée par les puits, la puissance des serveurs et la puissance des transformateurs moins la déperdition thermique de l'enveloppe du dôme et la perte de chaleur du tuyau de distribution du dôme à la serre.

$$\dot{Q}_{\text{Chauf.serre}} = \dot{Q}_{\text{Apports}} - \dot{Q}_{\text{Déperditions}}$$

$$\dot{Q}_{\text{Apports}} = \dot{Q}_{\text{Puits}} + \dot{Q}_{\text{Serveurs}} + \dot{Q}_{\text{Transfo}} + \dot{Q}_{\text{Soleil.dôme}}$$

$$\dot{Q}_{Déperditions} = \dot{Q}_{Enveloppe.d\hat{o}me} + \dot{Q}_{Perte.distribution}$$

Selon les conditions de la journée de mesurage, une puissance potentielle de chauffage de 1 387 kW est disponible pour la serre la nuit en excluant l'apport thermique du soleil sur le dôme.

8. Dimensionnement de la serre

Le dimensionnement de la serre potentielle est évalué, en fonction de la puissance générée par le dôme. La déperdition de la serre est calculée de la même manière que celle du dôme, c'est-à-dire que les pertes de chaleur du toit, des murs, du périmètre sont considérées en tenant compte d'un changement d'air à l'heure. Le coefficient de transfert thermique du polyéthylène double est de 3,97 W/m²K et la transmission lumineuse est de 70%. Le besoin de puissance de chauffage d'une serre par unité de superficie est estimé à 100 W/m² pour les saisons de printemps et d'automne assumant des températures de consigne de 22 °C dans la serre et une température extérieure descendant jusqu'à 0 °C. Ainsi, avec une puissance générée de 1 268 kW une superficie de serre de 12 000 m² pourrait être chauffée par un BlockchainDôme de 773 m² pour la période de mi-avril à fin octobre

Projection des résultats pour la période hivernale

Une adaptation et des modifications au système actuel sont nécessaires pour assurer le fonctionnement adéquat du système de BlockchainDôme en hiver. Plus précisément, la température du fonctionnement des serveurs doit être maintenue au-dessus de 0 °C et en dessous de 40 °C selon les spécifications du manufacturier. Or, en période hivernale, les journées très froides peuvent atteindre une température de -20 °C et la capacité estimée du puits canadien est limitée à un réchauffement de l'air de 7 °C (Le puits canadien, 2012). Ainsi, la température fournie par le puits aux serveurs serait de -13 °C, ce qui ne convient pas pour le fonctionnement des serveurs.

Un mélange d'air devra être réalisé entre l'air provenant du puits et l'air ambiant dans le dôme pour fournir aux serveurs une température de refroidissement optimale. Tel que les résultats le démontrent, la puissance dégagée par les serveurs augmente la température de l'air d'approximativement 20 °C. Ainsi, pour maintenir une température ambiante en dessous de 40 °C, la température entrant dans les serveurs doit être en dessous de 20 °C.

La température résultante d'un mélange d'air est calculée de la manière suivante. Le débit de chaleur entrant dans un système égale le débit d'énergie sortant pour un système fermé.

$$\dot{Q}_{sortant} = \dot{Q}_{entrant}$$

Sachant que le transfert de chaleur est défini par $\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T$ et que c_p est une constante pour une même différence de température, le système est défini par la formule suivante :



$$\dot{m}_{mélange} T_{mélange} = \dot{m}_{puits} T_{puits} + \dot{m}_{dôme} T_{dôme}$$

Comme il s'agit d'un transfert de chaleur et que la masse reste constante, le débit massique entrant est la somme du débit massique provenant du puits et du dôme.

$$\dot{m}_{mélange} = \dot{m}_{puits} + \dot{m}_{dôme}$$

De plus, il est assumé que la température du dôme est équivalente à la température du mélange avant le serveur plus sont apport thermique de 20 °C.

$$T_{dôme} = T_{mélange} + 20 \text{ °C}$$

Voici les hypothèses pour le calcul du mélange d'air :

Température extérieure en hiver (°C)	-20,00
Apport du puits - Delta T (°C)	7
Apport des serveurs - Delta T (°C)	20
Apport des transformateurs - Delta T (°C)	4
Déperdition dôme (W/m ² °C)	6,57
Déperdition serre (W/m ² °C)	5,91

Quelques scénarios avec des proportions variées de mélange d'air provenant du puits et du dôme ont été évalués pour une journée à -20 °C, voir le tableau 2. En fonction des températures calculées fournies aux serveurs, les scénarios en rouge ne sont pas techniquement favorables. Un pourcentage entre 40-50% d'apport du puits au mélange d'air représente la solution idéale. Selon ces scénarios, une puissance de chauffage de 834 kW serait disponible pour un mélange d'air avec 50% de l'air du puits et 50% de la recirculation de l'air du dôme. Cette puissance disponible pourrait chauffer une superficie de serre d'environ 3 000 m² en hiver.

Tableau 2 – Résultats des scénarios de mélange d'air et puissance générée

Proportion massique mélange (%)		Température (°C)		Apports(kW)				Pertes (kW)			Puissance de chauffage disponible (kW)	Superficie potentielle de serre (m ²)
Puits	Dôme	Entrée du serveur	Sortie du serveur	Puits	Serveurs	Transformateurs	Total apports	Dôme	Chauffage du mélange	Total pertes		
100%	0%	-13,0	7,0	355	1013	19	1387	137	0	137	1 250	7 831
75%	25%	-6,3	13,7	266	1013	19	1298	171	68	239	1 059	5 322
50%	50%	7,0	27,0	177	1013	19	1210	239	136	375	834	3 003
40%	60%	17,0	37,0	142	1013	19	1174	290	164	453	721	2 139
30%	70%	33,7	53,7	106	1013	19	1139	375	191	566	573	1 316
25%	75%	47,0	67,0	89	1013	19	1121	442	205	647	474	922
0%	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 3 – Débit massique versus débit volumique pour les mélanges d'air

Proportion massique mélange (%)		Température (°C)		Puits			Dôme		
Puits	Dôme	Entrée du serveur	Sortie du serveur	Densité l'air (kg/m ³)	Débit massique (kg/s)	Débit volumique (m ³ /s)	Densité l'air (kg/m ³)	Débit massique (kg/s)	Débit volumique (m ³ /s)
100%	0%	-13,0	7,0	1,357	50,3	37,1	1,357	0,0	0
75%	25%	-6,3	13,7	1,357	37,7	27,8	1,323	12,6	12,6
50%	50%	7,0	27,0	1,357	25,1	18,5	1,260	25,1	31,8
40%	60%	17,0	37,0	1,357	20,1	14,8	1,217	30,2	30,2
30%	70%	33,7	53,7	1,357	15,1	11,1	1,151	35,2	35,2
25%	75%	47,0	67,0	1,357	12,6	9,3	-	37,7	37,7
0%	100%	-	-	1,357	0,0	0,0	-	50,3	-

VI. LIMITES DE LA SIMULATION ET RECOMMANDATIONS

La simulation réalisée a été simplifiée et comporte des limites qui doivent être prises en compte. Une analyse plus approfondie permettrait de préciser les conclusions relatives à l'utilisation du système de BlockchainDome pour le chauffage de serres. Nous présentons à ce stade-ci les limites et des recommandations qui permettraient d'améliorer la performance du système.

Hypothèses

- En hiver, un gain thermique de 7 °C par le puits canadien est assumé en se basant sur la littérature et les mesures prises le 15 octobre 2018. En été, une perte thermique de 7 °C par le puits canadien est assumée en se basant sur la littérature. Des mesures terrain supplémentaires sont nécessaires afin de confirmer cette hypothèse selon le système de CETAC.
- Tout au long de l'année, un gain thermique de 20 °C par les serveurs est assumé en se basant sur les mesures prises le 15 octobre 2018. Des mesures terrain supplémentaires sont nécessaires afin de confirmer cette hypothèse selon le système de CETAC.
- Chaque système est considéré individuellement et de manière isolée lors de l'analyse des résultats. Par exemple, la température ambiante du dôme est considérée la même que la température de sortie des serveurs sans prendre en considération que les déperditions du dôme réduiraient sa température. Une simulation plus approfondie est nécessaire afin de prendre en compte les interactions des systèmes lors des scénarios d'hiver.

Agronomie

- L'impact agronomique de la vitesse considérable de l'air entrant dans les serres n'a pas été évalué.
- L'impact agronomique d'un apport d'air constant (sans arrêt) dans la serre n'a pas été évalué. Lorsque la température de consigne dans les serres est atteinte, une recirculation de l'air dans le puits ou une évacuation de l'air à l'extérieur doit être envisagée puisque la température de consigne sera dépassée et des problématiques de surchauffe des serres peuvent se produire.

Prises de mesures

- Des mesures supplémentaires seraient nécessaires afin de dresser un meilleur profil de la vitesse de l'air à l'entrée du puits canadien.

- Des mesures supplémentaires seraient nécessaires afin d'augmenter la précision des mesures.
- La valeur significative des résultats pourrait être plus représentative en augmentant la quantité de mesures et les échelonner sur une période d'une année complète.

Faisabilité technique

- Afin d'utiliser au maximum la puissance de chauffage disponible générée, plusieurs conduits de ventilation flexible (à déterminer) devront être installés pour transporter la quantité nécessaire d'énergie pour le chauffage des serres.
- Lors des mois d'hiver, une recirculation de l'air des serres directement à l'entrée des serveurs permettrait de réduire et même d'éliminer l'apport du puits canadien. Cela permettrait d'augmenter la puissance de chauffage disponible puisque l'air provenant des serres est plus chaud que l'air provenant du puits en hiver.
- Un système de chauffage d'appoint des serres doit être envisagé en cas de panne de courant.
- La fonctionnalité, la viabilité et le design du système de recirculation de l'air passif pour la période hivernale n'ont pas été évalués.

VII. CONCLUSION

Étant donné le court délai entre l'octroi du mandat et le dépôt du rapport, les résultats présentés sont des résultats préliminaires. Tel qu'indiqué à la section précédente *Limites de la simulation et recommandations*, la collecte et l'analyse de données additionnelles permettraient d'optimiser la simulation et conduire à des résultats différents. Toutefois, à la lumière de notre analyse, nous considérons que le système BlockchainDome représente un réel potentiel de source de chaleur pour le chauffage de serres.



Guillaume Proulx-Gobeil, ing.

#OIQ : 5006572

VIII. ANNEXES

Annexe 1 – Caractéristiques du Dôme

Dimensions	Dôme
Nb de chapelles/sections	1
Longueur serre/bâtiment	36,3 m 119 pi
Largeur chapelle/section	21,3 m 70,0 pi
Largeur bloc de serres/bâtiment	21,3 m 70 pi
Hauteur à la gouttière	1,57 m 5,2 pi
Hauteur au pignon	9,41 m 30,9 pi
Superficie par chapelle	774 m ²
Superficie totale au sol	774 m ² 8 330 pi ² 0,077 ha
Volume	5 668 m ³ 200 179 pi ³

Surface toit	314 m ²
<i>(polyéthylène tissé)</i>	3 376 pi ²
Surface murs	271 m ²
<i>(polyéthylène tissé)</i>	2 912 pi ²
Surface totale	584 m ² 6 287 pi ²

Annexe 2 – Caractéristiques de la serre

Dimensions	Serres
Nb de chapelles/sections	1
Longueur serre/bâtiment	15,4 m 51 pi
Largeur chapelle/section	7,7 m 25,3 pi
Largeur bloc de serres/bâtiment	7,7 m 25,3 pi
Hauteur à la gouttière	1,90 m 6,2 pi
Hauteur au pignon	3,50 m 11,5 pi
Superficie par chapelle	119 m ²
Superficie totale au sol	119 m ² 1 276 pi ² 0,012 ha
Volume	356 m ³ 12 574 pi ³

Surface toit	59 m ²
<i>(polyéthylène tissé)</i>	639 pi ²
Surface murs	52 m ²
<i>(polyéthylène tissé)</i>	564 pi ²
Surface totale	112 m ² 1 203 pi ²

IX. RÉFÉRENCE

Le puits canadien, IMB, Inter-mécanique du bâtiment, Vol. 27, N.4, mai 2012