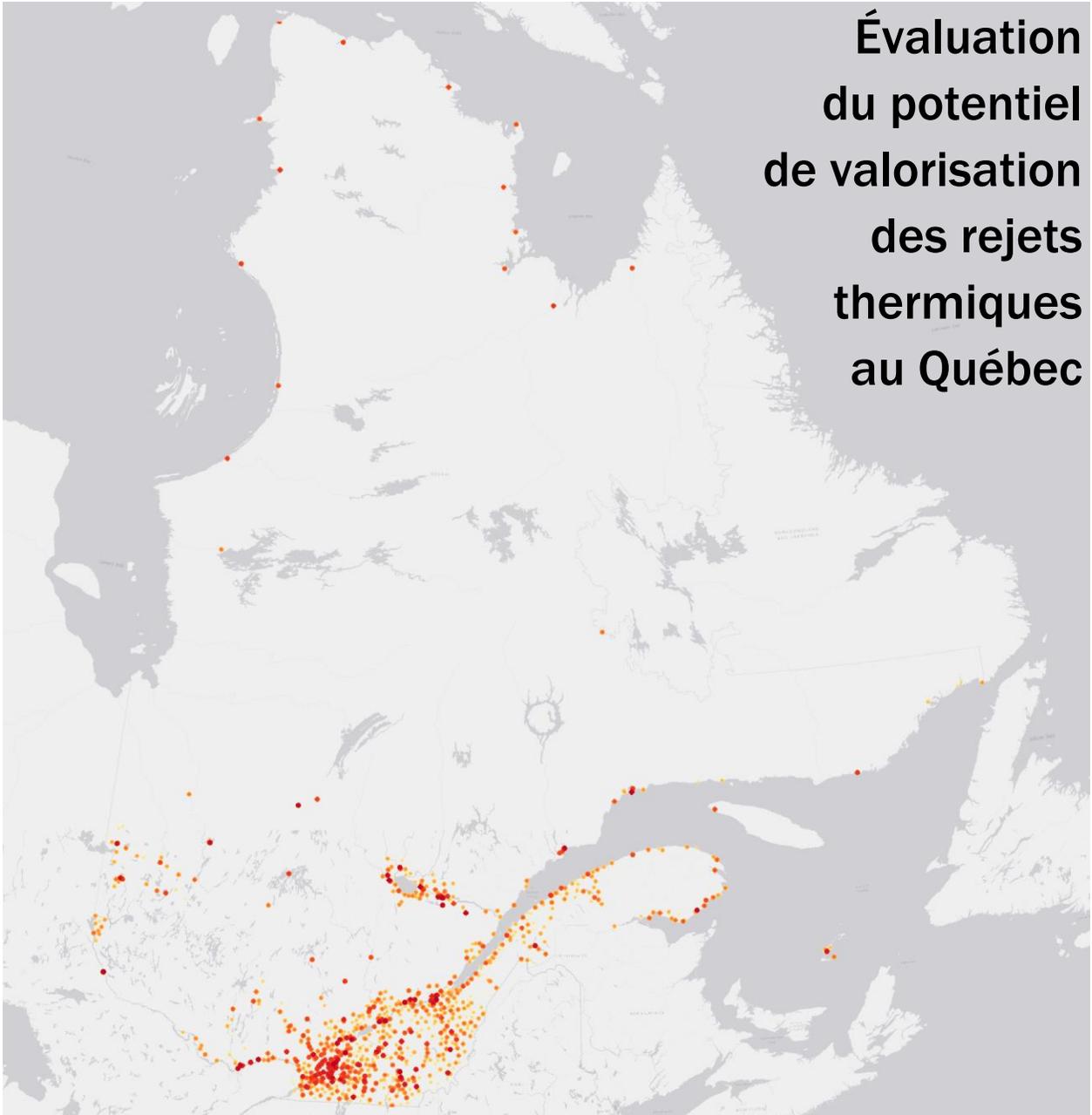


Évaluation du potentiel de valorisation des rejets thermiques au Québec



Rapport final
Août 2021

Rév. 2021-08-23

Préparé par :

Polytechnique Montréal, Département de génie mécanique

- Bruno Marcotte, B. Ing., M. Sc. – Associé de recherche
- Emilie Senécal-Léonard, CPI, M. Ing - Associée de recherche
- Michaël Kummert, ing., Ph.D – Professeur titulaire



Université de Montréal, Faculté de l'aménagement,
École d'urbanisme et d'architecture de paysage

- Franck Scherrer, Ph.D. – Professeur titulaire
- Frédéric Audy-Roy – Étudiant à la maîtrise



CTTÉI

- Pedro Ramirez, ing.
- Laurence Fiset-Sauvageau, ing. jr



CIRAIG

- Sophie Fallaha, M. Sc.
- Pierre-Olivier Roy, B. Ing., Ph.D.



Résumé

Le Québec est caractérisé par des besoins en chaleur importants en raison notamment de son climat froid, mais également par la présence d'un secteur industriel très présent qui rejette une grande quantité de chaleur dans l'environnement. On peut en outre s'attendre à une augmentation des besoins thermiques si le Québec construit plus de serres pour atteindre une plus grande autonomie alimentaire, et à une augmentation des rejets thermiques si le Québec attire plus d'industries et de centres de données pour valoriser son énergie renouvelable.

C'est dans ce cadre que le Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN) a confié à l'équipe multidisciplinaire composée de chercheurs de Polytechnique Montréal et de l'Université de Montréal, d'analystes du Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) ainsi que d'ingénieurs du Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTEI) le mandat d'évaluer le potentiel de valorisation des rejets thermiques au Québec.

Dans une première phase, les rejets thermiques industriels ont été quantifiés en mettant à jour les données de précédentes études et en développant de nouvelles méthodologies pour inclure différents sous-secteurs industriels, y compris les centrales de cogénération, les centrales électriques des réseaux autonomes, les installations de traitement des eaux usées et les centres de données informatiques. Différents types de rejet (gazeux, liquide) et différents niveaux de température ont été répertoriés et intégrés dans une base de données géoréférencée des rejets thermiques valorisables. La base de données reprend quelque 170 installations industrielles et 850 stations d'épuration qui représentent des rejets thermiques annuels valorisables de plus de 204 PJ, soit plus de 56,7 TWh – à titre de comparaison, les besoins en chaleur pour le chauffage des locaux des ménages québécois représentent environ 200 PJ (56 TWh), soit une quantité de chaleur inférieure aux rejets répertoriés.

Dans une deuxième phase, les besoins thermiques des bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels ainsi que ceux des serres ont été quantifiés dans une base de données géoréférencée. La base de données comprend quelque 620 millions de m² de bâtiments et 2.5 millions de m² de serres (250 ha), correspondant à des besoins annuels de près de 360 PJ (100 TWh).

La troisième phase du projet a consisté à croiser les résultats des deux premières phases. Pour ce faire, une méthodologie basée sur des cartes matricielles (raster map) utilisant des mailles de 250 m × 250 m a été développée pour quantifier le potentiel *actuel* de valorisation des rejets thermiques, correspondant à l'énergie pouvant transiter entre les émetteurs et les récepteurs de chaleur situés dans une zone géographique d'intérêt. Dans le cadre du projet, une carte a été produite pour illustrer le potentiel de valorisation correspondant à des réseaux de chaleur de 2 km de rayon, mais les bases de données géoréférencées établies lors des deux premières phases du projet permettent d'évaluer une infinité de scénarios, en utilisant différentes zones géographiques ou en ne conservant que certains types de rejets ou de besoins par exemple. Les cartes matricielles représentant les rejets et les besoins thermiques peuvent également être utilisées pour quantifier le potentiel *futur* de valorisation des rejets de chaleur. En considérant les rejets ou les besoins séparément, ou en considérant l'excès (ou le manque) de chaleur sur une zone géographique, on peut quantifier les synergies énergétiques qui résulteraient de

l'implantation de nouveaux émetteurs ou récepteurs de chaleur sur le site. En croisant ces informations avec d'autres types de données géoréférencées tels que le zonage des terrains, les résultats de ce projet pourront être utilisés pour informer les politiques d'aménagement du territoire – on pense particulièrement à l'implantation de nouvelles serres, de nouveaux centres de données, ou au développement de quartiers écoénergétiques autour de réseaux de partage de chaleur.

Pendant la quatrième phase du projet, des analyses technoéconomiques et des analyses de cycle de vie ont été réalisées sur cinq études de cas représentant une variété de situations de valorisation des rejets thermiques : le chauffage d'un complexe de serres agricoles à l'aide de rejets thermiques (air chaud à 75 °C) provenant d'une usine de papier, le chauffage d'un complexe de serres agricoles à partir des rejets thermiques (eau à 38 °C), la valorisation de rejets de chaleur secondaires (eau à 95 °C et air à 40 °C) d'une installation de cogénération à la biomasse dans un complexe agricole et un parc industriel, la valorisation de rejets thermiques (gaz à 446 °C) d'une usine de pyrolyse dans un parc industriel, et un projet de valorisation des rejets de chaleur (eau à 22 °C) d'une usine de papier pour chauffer un quartier résidentiel et commercial. Ces études ont permis de mettre en lumière les synergies techniques, économiques et environnementales des projets de valorisation des rejets de chaleur de nature diverse (projets privés ou municipaux) en quantifiant les paramètres économiques et les émissions de Gaz à Effet de Serre des différents projets. Le rôle des subventions dans la faisabilité économique est également analysé dans les études de cas.

Les résultats présentés dans ce rapport et les bases de données géoréférencées permettront à toutes les parties prenantes de mieux quantifier le potentiel de valorisation des rejets thermiques, et d'évaluer ce potentiel sur des zones géographiques d'intérêt. Les bases de données sont conçues pour être évolutives, et pourront être améliorées en intégrant les données mesurées provenant de la divulgation volontaire ou obligatoire des rejets et des besoins thermiques. Les études de cas détaillées permettront également de comprendre les synergies possibles lors du développement de projets de valorisation.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte : qu'est-ce qu'un rejet thermique?.....	1
1.2	Potentiel de valorisation des rejets thermiques	2
1.3	Objectifs du mandat.....	3
1.4	Limites de l'étude.....	4
1.5	Approche globale et structure du rapport.....	4
2	Estimations des rejets thermiques valorisables	6
2.1	Secteur industriel	6
2.1.1	Secteurs industriels étudiés et caractérisation des rejets thermiques	6
2.1.2	Méthodologie.....	8
2.1.3	Résultats et discussion	14
2.2	Centrales de cogénération	21
2.3	Centres de données	23
2.4	Stations d'épuration.....	24
2.5	Réseaux électriques autonomes	26
2.6	Résumé de l'estimation des rejets thermiques	27
3	Estimation des besoins thermiques.....	30
3.1	Besoins thermiques des bâtiments.....	30
3.1.1	Liste géoréférencée des bâtiments du Québec.....	30
3.1.2	Estimation des besoins en chaleur des bâtiments	32
3.1.3	Aperçu des résultats.....	35
3.2	Besoins thermiques des serres	36
3.2.1	Liste géoréférencée des serres du Québec	36
3.2.2	Estimation des besoins en chaleur des serres.....	37
3.2.3	Aperçu des résultats.....	37
3.3	Vérification et évolution de la base de données.....	38
3.3.1	Recensement des bâtiments.....	38
3.3.2	Besoins thermiques des bâtiments	39

3.3.3	Besoins thermiques des serres.....	41
3.3.4	Vérifications ponctuelles et évolution de la base de données.....	42
3.4	Résumé de l'estimation des besoins thermiques	42
4	Évaluation du potentiel de valorisation des rejets thermiques.....	44
4.1	Données de base : rejets et besoins sur un maillage de 250 m × 250 m	44
4.2	Potentiel actuel de valorisation des rejets thermiques	44
4.2.1	Illustration : sélection de zones d'intérêt pour développer des réseaux de chauffage	45
4.3	Potentiel futur de valorisation des rejets thermiques	48
4.3.1	Illustration : exploitation de rejets existants.....	49
5	Études de cas	52
5.1	Analyse de faisabilité technico-économique	52
5.2	Méthodologie de calculs	54
5.3	Hypothèses techno-économiques	54
5.3.1	Électricité.....	55
5.3.2	Heures d'utilisation des rejets thermiques pour le chauffage des serres.....	55
5.3.3	Heures d'opération de procédés industriels	55
5.3.4	Aides financières disponibles pour la valorisation de rejets thermiques.....	55
5.4	Sélection des cas	57
5.5	Présentation des cinq études de cas.....	58
5.5.1	Étude de cas #1 : Cascades (Cabano)	58
5.5.2	Étude de cas #2 : Rio Tinto Fer et Titane (Sorel-Tracy)	61
5.5.3	Étude de cas #3 : Centre de biomasse de Saint-Félicien	66
5.5.4	Étude de cas #4 : Xylo-Carbone (Saint-Tite)	70
5.5.5	Étude de cas #5 : Projet Zibi (Gatineau)	74
5.6	Conclusions et recommandations.....	76
6	Conclusions et recommandations	79
	Références.....	81
Annexe A:	Méthodologie de calcul de la taille du gisement de chaleur pour les études de cas	85
Annexe B:	Hypothèses techno-économiques des études de cas.....	87
Annexe C:	Tableau sommaire de l'indicateur <i>Changement climatique, PRG 100 ans</i>	89

Liste des Figures

Figure 1 : Carte illustrant l'emplacement des 71 établissements industriels recensés.....	7
Figure 2 : Graphique illustrant le nombre d'établissements industriels recensés pour chacune des 19 classes industrielles prises en compte	8
Figure 3 : Graphique présentant les ratios des rejets thermiques en fonction de la consommation énergétique provenant de Stricker Associates Inc. (2007)	12
Figure 4 : Schéma de la méthodologie permettant d'estimer les rejets thermiques d'établissements industriels.....	13
Figure 5 : Graphique illustrant la quantité de rejets thermiques estimés par classes industrielles	14
Figure 6 : Graphique illustrant la proportion des types de rejets thermiques par type de rejets thermiques pour les établissements industriels.....	16
Figure 7 : Graphique illustrant la proportion de la quantité de rejets thermiques par classes industrielles.....	16
Figure 8 : Graphique présentant les rejets thermiques estimés pour chacun des établissements recensés pour l'année 2018	17
Figure 9 : Carte présentant les emplacements des centrales de cogénération recensés	21
Figure 10 : Graphique présentant la quantité de rejets thermiques valorisables estimés en pétajoule des centrales de cogénération	22
Figure 11 : Carte présentant les emplacements des centres de données recensés.....	23
Figure 12 : Emplacements des stations d'épuration au Québec.....	24
Figure 13 : Graphique présentant les 10 stations d'épuration ayant les plus importants rejets thermiques du Québec.....	25
Figure 14 : Carte présentant les réseaux autonomes d'Hydro-Québec	26

Figure 15 : Rejets thermiques annuels en térajoules pour les réseaux autonomes de Hydro-Québec 27

Figure 16 : Carte de chaleur du Québec présentant la quantité des rejets thermiques estimés . 28

Figure 17: Graphique présentant la quantité de rejets thermiques pour chacune des catégories étudiées ventilées en fonction des types de rejets 29

Figure 18 : Cadastres (brun) et empreintes au sol (gris). Les propriétés des relevés cadastraux ont été transférés aux bâtiments en associant les surfaces brunes aux surfaces grises par découpage. 32

Figure 19 : Empreintes au sol et l'utilisation qui leur a été attribuée. On remarque qu'un seul type d'utilisation a été conservé pour chaque empreinte, et que les bâtiments du secteur commercial et institutionnel sont classifiés par sous-catégories (par exemple commerce de détail, bureaux, etc.) 32

Figure 20 : Exemple de résultat de calcul des besoins en chaleur sur des mailles de 250 m × 250 m pour Mont-Laurier. Le résultat peut être exprimé comme une image dans laquelle chaque pixel représente une maille et est coloré en fonction de l'intensité des besoins (somme des besoins thermiques annuels en GJ sur la maille en question). 35

Figure 21 : Représentation des besoins de chaleur annuels des bâtiments en sommant les besoins sur des mailles de 250 m × 250 m. Chaque maille est colorée en fonction des besoins de chaleurs totaux sur la zone représentée, ce qui est équivalent à une représentation de la densité des besoins en GJ/m² avec un facteur d'échelle approprié. 36

Figure 22 : Serres reprises dans la base de données. Chaque point vert représente une serre, indépendamment de sa taille. Il y a quelque 350 serres au total dans la base de données. 38

Figure 23 : Les dix emplacements avec le potentiel de transfert thermique le plus élevé du Québec 46

Figure 24 : Graphique présentant les dix emplacements ayant le potentiel de transfert thermique le plus élevés au Québec 46

Figure 25 : Carte présentant la zone circulaire de 2 km de rayon lors du calcul du potentiel de transfert thermique situé dans la ville de Gatineau 47

Figure 26 : Graphique présentant le profil annuel des rejets et besoins thermiques situés à l’intérieur de la région circulaire présentée à la Figure 25 47

Figure 27 : Les dix emplacements avec le plus grand potentiel de valorisation thermique futur au Québec 49

Figure 28 : Graphique présentant les rejets thermiques des dix emplacements ayant le plus grand potentiel de valorisation thermique futur 50

Figure 29 : Carte montrant les sources de rejets thermiques à la ville de Témiscaming 50

Figure 30 : Graphiques montrant la ventilation des rejets thermiques annuels pour les sources de rejets thermiques à la ville de Témiscaming 51

Figure 31 : Exemple de schémas de principe pour la valorisation énergétique sur Prosim Plus.. 53

Figure 32 : Modèles d’affaires pour la valorisation de l’air des hottes de Cascades 59

Figure 33 : Schéma de principe de la valorisation thermique de l’air des hottes de Cascades 59

Figure 34 : Bilans de matière et d’énergie de la valorisation thermique de l’air des hottes de Cascades 60

Figure 35 : Modèles d’affaires pour la valorisation thermique de l’eau de refroidissement de RTFT 62

Figure 36 : Schéma de principe de la valorisation thermique de l’eau de refroidissement de RTFT 62

Figure 37 : Bilans de matière et d’énergie de la valorisation thermique de l’eau de refroidissement de RTFT 63

Figure 38 : Cartographie des récepteurs potentiels à proximité de l’usine de RTFT 65

Figure 39 : Modèles d’affaires du réseau BT de la Ville de Saint-Félicien 66

Figure 40 : Modèles d’affaires pour le réseau HT de la Ville de Saint-Félicien 66

Figure 41 : Schéma de principe du réseau BT de la Ville de Saint-Félicien.....	67
Figure 42 : Schéma de principe du réseau HT de la Ville de Saint-Félicien	67
Figure 43 : Bilans de matière et d'énergie du réseau BT de la Ville de Saint-Félicien	68
Figure 44 : Bilans de matière et d'énergie du réseau HT de la Ville de Saint-Félicien	69
Figure 45 : Modèles d'affaires de la valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone	71
Figure 46 : Schéma de principe de la valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone	71
Figure 47 : Bilans de matière et d'énergie de la valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone	72
Figure 48 : Cartographie du Projet Zibi	74
Figure 49 : Modèles d'affaires de la valorisation thermique de l'eau de production de Kruger ..	75
Figure 50 : Schéma de principe de la valorisation thermique de l'eau de production de Kruger	75
Figure 51 : Bilans de matière et d'énergie de la valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone	76

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Groupes et classes industrielles pris en compte	11
Tableau 2 : Quantité de rejets thermiques estimés par type de rejets en fonction des classes industrielles	15
Tableau 3 : Comparaison entre les résultats d'INNOVAGRO Consultants (2010) et les résultats de cette étude	20
Tableau 4: Tableau présentant le nombre d'établissement recensés ainsi que la quantité de rejets thermiques par catégories de source	29
Tableau 5 : Intensité Énergétique pour le chauffage des locaux et l'eau chaude pour les différents types de bâtiments d'après l'édition 2018 de la BNCE. Les valeurs d'intensité sont moyennées sur les années 2014 à 2018, la superficie de plancher est celle de 2018.....	33
Tableau 6 : Fraction des besoins de chauffage et des rejets de climatisation pour les mois de l'année.....	34
Tableau 7 : Superficie de plancher des différentes catégories de bâtiments d'après l'édition 2018 de la BNCE et superficie des bâtiments représentés dans la bae de données des besoins thermiques. Le secteur résidentiel n'a pas été séparé en sous-catégories dans la base de données..	39
Tableau 8 : Besoins thermiques estimés des différentes catégories de bâtiments d'après l'édition 2018 de la BNCE et besoins thermiques des bâtiments représentés dans la bae de données des besoins thermiques. Les besoins thermiques unitaires par superficie de plancher sont identiques dans les deux estimations et proviennent des moyennes des intensités énergétiques entre 2014 et 2018 dans la BNCE.....	41
Tableau 9 : Tableau synthèse des cinq cas d'étude sélectionnés	58
Tableau 10 : Coûts associés à la valorisation thermique de l'air des hottes de Cascades.....	61
Tableau 11 : Analyse d'investissement initial et analyse d'investissement avec aide financière : valorisation thermique de l'air des hottes de Cascades	61

Tableau 12 : Coûts associés à la valorisation thermique de l’eau de refroidissement de RTFT ...	63
Tableau 13 : Analyse d’investissement initial et analyse d’investissement avec aide financière : valorisation thermique de l’eau de refroidissement de RTFT	64
Tableau 14 : Analyse d’investissement initial et analyse d’investissement avec aide financière : valorisation thermique de l’eau de refroidissement de RTFT	65
Tableau 15 : Coûts associés à la valorisation thermique du réseau BT de la Ville de Saint-Félicien	69
Tableau 16 : Coûts associés à la valorisation thermique du réseau HT de la Ville de Saint-Félicien	69
Tableau 17 : Analyse d’investissement initial et analyse d’investissement avec aide financière : réseaux BT et HT de la Ville de Saint-Félicien	70
Tableau 18 : Étude de marché de la valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone	72
Tableau 19 : Analyse d’investissement initial et analyse d’investissement avec aide financière : valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone	73
Tableau 20 : Récapitulatif du bilan de matière et énergie des cas d’étude	77
Tableau 21 : Récapitulatif du bilan financier des cas d’étude.....	78
Tableau 22 : Hypothèses techno-économiques pour les 5 cas	87
Tableau S-1 : Sommaire des résultats de l’indicateur <i>Changement climatique, PRG 100 ans</i>	89

Nomenclature

BNCE	Base de données nationale sur la consommation d'énergie
CAPEX	Coûts d'investissement
CEUD	<i>Comprehensive Energy Use Database</i>
CO ₂ e	CO ₂ équivalent
COP	Coefficient de performance
DTL	<i>District Thermal Loop</i>
GES	Gaz à effet de serre
MAHM	Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
OPEX	Solde d'exploitation
PRI	Période de retour sur investissement
SCIAN	Système de classification des industries de l'Amérique du Nord
SCR	Système de Coordonnées de Référence
SIG	Système d'information géographique
VRT	Valorisation de rejets thermiques

1 Introduction

1.1 Contexte : qu'est-ce qu'un rejet thermique?

Au Québec, on estime les besoins en énergie utile à environ 1000 PJ, soit 280 TWh (Whitmore & Pineau, 2021). Cependant, la consommation d'énergie primaire représente légèrement plus du double de cette quantité. En d'autres termes, un peu plus de la moitié de l'énergie consommée au Québec correspond à des pertes de conversion et de distribution. Ces pertes traduisent des inefficacités du système énergétique québécois. Elles se retrouvent sous forme de rejets thermiques qui peuvent être diffus et à faible température (par exemple l'échauffement des fils lors du transport de l'électricité) mais qui peuvent aussi parfois représenter une source intense de chaleur à haute température (par exemple gaz chauds produits par des processus de combustion inefficaces).

L'énergie utile est également rejetée dans la nature en fin de cycle, le plus souvent sous une forme diffuse inexploitable (par exemple la chaleur perdue à travers les murs d'une résidence), mais parfois sous une forme plus facile à valoriser (par exemple effluents liquides à moyenne température, tels que les eaux usées).

Il est donc important de faire la différence entre pertes énergétiques (inefficacités) et rejets thermiques valorisables. L'exemple simple ci-dessous montre que même si « rien ne se crée, rien ne se perd », ces deux concepts sont différents,

Pertes ≠ Rejets thermiques valorisables : un exemple simple

Pensons à un chauffe-eau au gaz produisant de l'eau chaude domestique pour une résidence. Avec une efficacité de combustion de 80 %, un cinquième (20 %) de l'énergie chimique contenue dans le gaz naturel est rejetée dans les gaz de combustion, ce qui correspond aux pertes de conversion. Ensuite, si la tuyauterie jusqu'au point d'utilisation est longue, les pertes de distribution (pertes thermiques des tuyaux) peuvent représenter 10 % de cette énergie. L'énergie que l'on retrouve dans l'eau chaude au point d'utilisation (énergie utile sous forme de chaleur dans l'eau) représente donc 70 % de l'énergie contenue dans le gaz naturel. Lors de l'utilisation, une partie de chaleur est dissipée dans la pièce, et une partie se retrouve dans le drain évacuant les eaux usées. Si on suppose qu'on retrouve 80 % de la chaleur de l'eau chaude dans les eaux usées, cette quantité de chaleur correspondra à $80 \% \times 70 \% = 56 \%$ de l'énergie contenue dans le gaz. Sur les 100 % d'énergie chimique contenue dans le gaz naturel, on aura donc perdu 20 % sous forme de gaz à relativement haute température, 56 % sous forme de rejet liquide à moyenne température (drain), et le reste (24 %) sous forme diffuse (pertes des tuyaux et rejets dans la pièce où l'eau est utilisée). Ce simple exemple montre que dans ce cas, bien que l'énergie utile représente 70 % de l'énergie consommée, les rejets thermiques potentiellement valorisables (gaz chauds et eaux usées tièdes) représentent 76 % de l'énergie consommée.

Toutes les pertes ne sont pas valorisables, et tous les rejets thermiques valorisables ne proviennent pas de pertes.

Une fois cette distinction faite entre pertes et rejets, il reste néanmoins vrai que le grand pourcentage de pertes associées aux inefficacités du système énergétique québécois (proche de 50 %) laisse présager d'un potentiel immense de valorisation des rejets thermiques. Cette valorisation permettrait d'améliorer l'efficacité du système énergétique, de réduire les coûts économiques et environnementaux associés à la consommation d'énergie, et de réduire les rejets de chaleur dans l'environnement. Elle offrirait donc de multiples bénéfices tout en contribuant à la transition énergétique, et les initiatives de valorisation sont actuellement encouragées par un appel à propositions du Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (<https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/affaires/appel-de-propositions/valorisation-des-rejets-thermiques>).

1.2 Potentiel de valorisation des rejets thermiques

Le potentiel de valorisation d'un rejet thermique dépend essentiellement de 3 paramètres :

- 1) **L'intensité du rejet** : la valorisation sera d'autant plus intéressante économiquement qu'une grande quantité d'énergie est rejetée en un « endroit », par exemple dans un débit d'effluents gazeux ou liquides.
- 2) **La température du rejet** : la « valeur » de l'énergie rejetée, c'est-à-dire la possibilité d'obtenir une chaleur utile à partir du rejet, dépend de sa température. En prenant un exemple simple, si on veut fournir de la chaleur à un réseau d'eau chaude à 60 °C, on pourra le faire directement avec un effluent liquide à 70 °C à travers un échangeur de chaleur, et on aura donc un Coefficient de Performance (COP) pour le transfert d'énergie infini (en négligeant l'énergie de pompage). En revanche, si on a un rejet de chaleur à 30 °C, il faudra utiliser une pompe à chaleur qui aurait un COP maximal théorique de 10, et un COP réaliste de l'ordre de 5 – autrement dit, pour transférer 5 unités d'énergie, on en consommerait 1. La « valeur » de l'énergie rejetée dans ce cas de figure serait donc réduite de 20 % par rapport à un rejet à 70 °C.
- 3) **La correspondance avec des besoins thermiques** à combler. La proximité de grands consommateurs est un paramètre clé pour la rentabilité économique d'un projet de valorisation : les rejets et les besoins doivent être proches dans l'espace, et correspondre temporellement.

Au Québec, l'étude la plus complète du potentiel de valorisation des rejets thermiques industriels a été réalisée en 2010 par INNOVAGRO (INNOVAGRO Consultants, 2010). Cette étude avait estimé des rejets thermiques de l'ordre de 270 GJ : 55 % sous forme de rejets gazeux à une température < 177 °C, 20 % sous forme de rejets gazeux à une température > 177 °C, et 25 % sous forme d'effluents liquides à une température < 60 °C. L'étude avait considéré 5 grands secteurs industriels : les pâtes et papiers, le raffinage de pétrole, la production d'alumine et d'aluminium primaire, les fonderies d'autres métaux non-ferreux, et la production d'électricité thermique. La proximité géographique avec des besoins thermiques à combler n'était pas une priorité de l'étude, mais un recensement par région administrative avait été effectué.

Le Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN) a confié à l'équipe multidisciplinaire composée de chercheurs de Polytechnique Montréal, de l'Université de Montréal, d'analystes du Centre

international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) ainsi que d'ingénieurs du Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTEI) le mandat d'évaluer le potentiel de valorisation des rejets thermiques au Québec.

1.3 Objectifs du mandat

L'objectif global du projet consiste à évaluer le potentiel de valorisation des rejets thermiques à l'intérieur du territoire québécois. Les objectifs spécifiques permettant d'effectuer cette évaluation sont les suivants :

- Cartographier au Québec les sources de rejets thermiques d'intensité significative dans le secteur industriel incluant les centres de données
- Cartographier au Québec les besoins en chaleur des bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels, et des serres agricoles
- Cartographier au Québec le potentiel actuel de valorisation des rejets thermiques;
- Réaliser une évaluation des synergies et des impacts environnementaux de 5 études de cas de valorisation des rejets thermiques :
 - Analyse technoéconomique
 - Analyse du cycle de vie

Outre le présent rapport, les livrables du projet incluent des bases de données géoréférencées correspondant aux principaux objectifs. Ces bases de données se veulent évolutives et ouvertes et seront livrées sous forme utilisable dans des logiciels SIG (Systèmes d'Information Géographique) tels que QGIS (QGIS Development Team, 2021) qui est un logiciel libre. Les bases de données produites sont les suivantes :

- Sources de rejets thermiques valorisables
 - Industries
 - Station d'épuration des eaux
 - Centre de données
 - Centrales de Cogénération
 - Centrales thermiques de production d'électricité en réseau autonome
- Besoins thermiques
 - Parc immobilier du Québec
 - Serres
- Potentiel de valorisation des rejets thermiques
- Potentiel de valorisation actuel
- Potentiel de valorisation futur (d'attraction de sources de rejets ou de besoins thermiques)

1.4 Limites de l'étude

Une des priorités du mandat était d'évaluer le potentiel de valorisation des rejets thermiques industriels, qui représentent a priori le meilleur potentiel technico-économique. Outre les secteurs classiques considérés dans l'étude d'INNOVAGRO (2010), d'autres secteurs prioritaires tels que la transformation alimentaire ou les centres de données ont été ajoutés.

D'un autre côté, la caractérisation des besoins thermiques s'est concentrée sur les bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels, et sur les serres agricoles.

Ces deux types d'acteurs ont donc été considérés dans des rôles prédéfinis d'émetteur et de récepteur de chaleur. Une tendance récente est de s'éloigner du concept de fournisseur et consommateur de chaleur pour évoluer vers un partage de chaleur entre bâtiments et installations industrielles reliés par des réseaux de partage de chaleur. Dans ce contexte, les bâtiments commerciaux et institutionnels peuvent devenir des sources de rejets thermiques s'ils ont des besoins de climatisation ou de réfrigération importants, et certaines industries pourraient être caractérisées comme des sources de besoins thermiques si leurs besoins sont compatibles avec des rejets existants ou avec la chaleur fournie par des pompes à chaleur utilisant ces rejets. Pour considérer ce genre de scénarios, la base de données géoréférencée des rejets thermiques (reprenant les industries y compris les centres de données) devrait être étendue pour inclure les besoins en chaleur, et la base de données des besoins thermiques (bâtiments et serres) devrait être étendue pour inclure les rejets thermiques liés à la climatisation et à la réfrigération.

La temporalité des rejets et des besoins thermiques joue un rôle important dans l'intérêt technoéconomique de certains scénarios de valorisation des rejets thermiques. Comme les rejets industriels sont en général plus constants dans le temps, leur caractérisation temporelle n'a pas été priorisée. Pour ce qui est des besoins thermiques des bâtiments et des serres, la priorité a été donnée à la géolocalisation des besoins et à leur caractérisation annuelle. Une méthode simple est utilisée pour obtenir une approximation des besoins mensuels pour raffiner les études de valorisation. Une caractérisation temporelle plus précise demanderait un niveau de modélisation différent qui sort du cadre de cette étude.

1.5 Approche globale et structure du rapport

Pour atteindre les objectifs listés dans la section précédente, le projet a été délimité en trois phases :

- Phase 1 : Identification et caractérisation des sources de rejets thermiques valorisables
- Phase 2 : Identification des besoins thermiques des potentiels consommateurs de chaleur
- Phase 3 : Évaluation du potentiel de valorisation des rejets thermiques
- Phase 4 : Études de cas avec analyse technoéconomique et analyse du cycle de vie

La première et la deuxième phase consistent respectivement à quantifier les rejets et les besoins thermiques ainsi qu'à les localiser de manière précise sur le territoire québécois. La connaissance de la position géographique des sources et des besoins de chaleur permettra, lors de la troisième phase,

d'évaluer le potentiel de valorisation en prenant en compte la distance entre les émetteurs et les consommateurs de chaleur. Cette dernière étant un paramètre important à considérer lors de l'évaluation du potentiel de projets de valorisation de chaleur. Cette phase permettra aussi d'identifier les emplacements avec le plus fort potentiel de valorisation de chaleur sur le territoire québécois. La phase 4 du projet consiste en une analyse approfondie de cinq cas de valorisation de chaleur. Pour chacun de ces cinq cas, la faisabilité technique, économique ainsi que les impacts environnementaux seront évalués à l'aide d'analyses de faisabilité technoéconomique ainsi qu'à l'aide d'analyses de cycle de vie.

Les deux premières phases du projet de recherche sont détaillées aux sections 2 (rejets) et 3 (besoins) du rapport. La phase 3 (potentiel de valorisation) est, quant à elle, couverte par la section 4 du rapport. Enfin, la quatrième phase du projet est décrite à la section 4 qui porte sur l'évaluation du potentiel de valorisation de chaleur tandis que la cinquième section couvre les analyses de faisabilité technoéconomique ainsi que les principaux résultats de l'analyse de cycle de vie des cinq études de cas réalisées. L'analyse de cycle de vie complète a été réalisée dans un rapport technique indépendant ayant pour titre « Profil environnemental de divers scénarios de valorisation des rejets thermiques » (Roy et al., 2021). Les conclusions et recommandations du projet sont présentées à la section 5.

2 Estimations des rejets thermiques valorisables

Pour estimer les rejets thermiques valorisables du Québec, les établissements appartenant aux catégories suivantes ont été recensés:

- Secteur industriel
- Centrales de cogénération
- Centres de données
- Station d'épuration des eaux
- Réseaux électriques autonomes

Ces secteurs ont été identifiés comme ayant un fort potentiel de rejets thermiques valorisables. Pour chacun de ces secteurs une méthode spécifique d'estimation des rejets thermiques a été développée.

2.1 Secteur industriel

À notre connaissance, l'étude intitulée « Potentiel énergétique des rejets thermiques industriels au Québec » qui a été réalisée par INNOVAGRO Consultants (2010) est la seule publication quantifiant les rejets thermiques des établissements industriels du Québec. Cette étude se démarque par rapport aux autres études répertoriées, car elle est directement appliquée au territoire québécois. Par contre, certaines données utilisées n'étaient pas accessibles puisqu'elles faisaient référence à des études internes réalisées par INNOVAGRO Consultants et utilisaient aussi des sources de données publiques qui ne sont plus mises à jour actuellement. C'est pourquoi, une nouvelle méthodologie a été développée. Cette dernière est décrite à la sous-section 2.1.2.

2.1.1 Secteurs industriels étudiés et caractérisation des rejets thermiques

La méthodologie développée a permis d'estimer les rejets thermiques de 71 établissements industriels appartenant à 19 classes industrielles pour l'année 2018. Leurs emplacements sont illustrés sur une carte du Québec à la Figure 1. La Figure 2 illustre le nombre d'établissements recensés en fonction de leur classe industrielle. Sur cette figure, le code inscrit entre crochet pour chacune des classes canadiennes provient du Système de classification des industries de l'Amérique de Nord (SCIAN).

Les rejets thermiques recensés sont groupés en cinq catégories distinctes :

- Pertes par cheminées : gaz de combustion et air chaud provenant de séchoir (150 °C à 800 °C)
- Pertes de vapeur : proviens de vapeur à basse et moyenne pression (100 °C à 257 °C; 15 à 650 psi)

- Gaz et vapeur de procédés : air humide et gaz provenant de procédé industriel (80 °C à 500 °C)
- Effluents liquides à basse température (29 °C à 50 °C)
- Effluents liquides à haute température (50 °C à 122 °C)

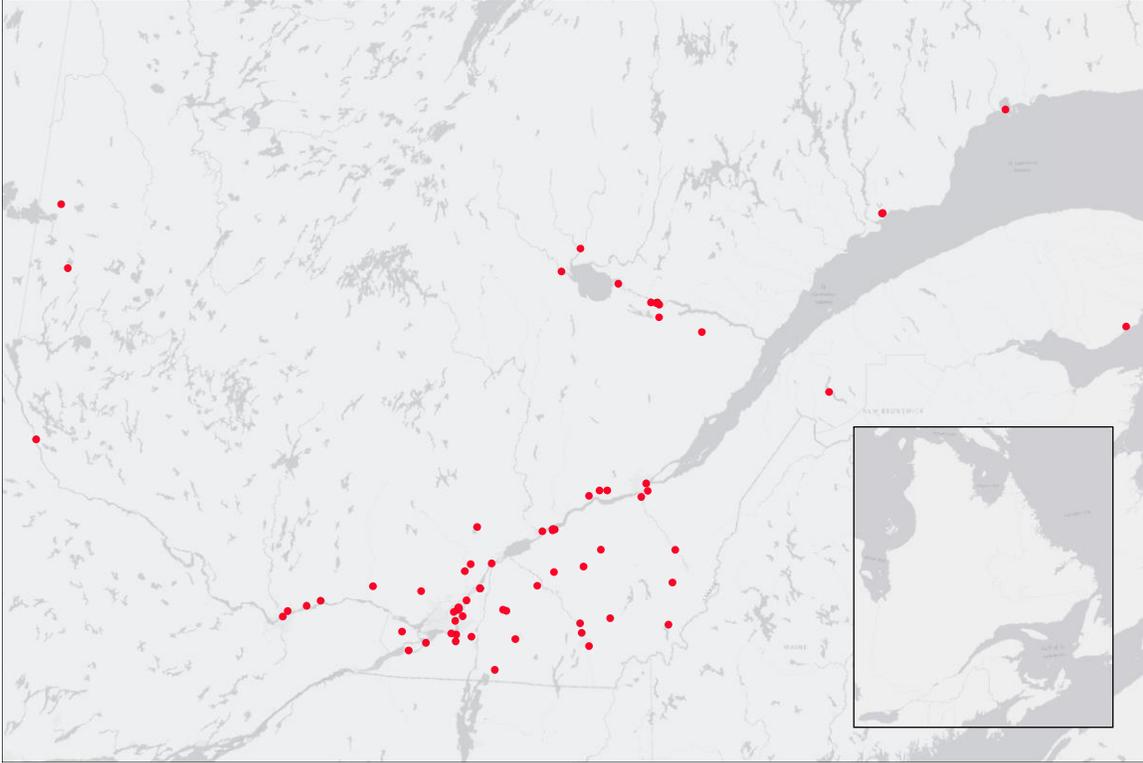


Figure 1 : Carte illustrant l'emplacement des 71 établissements industriels recensés

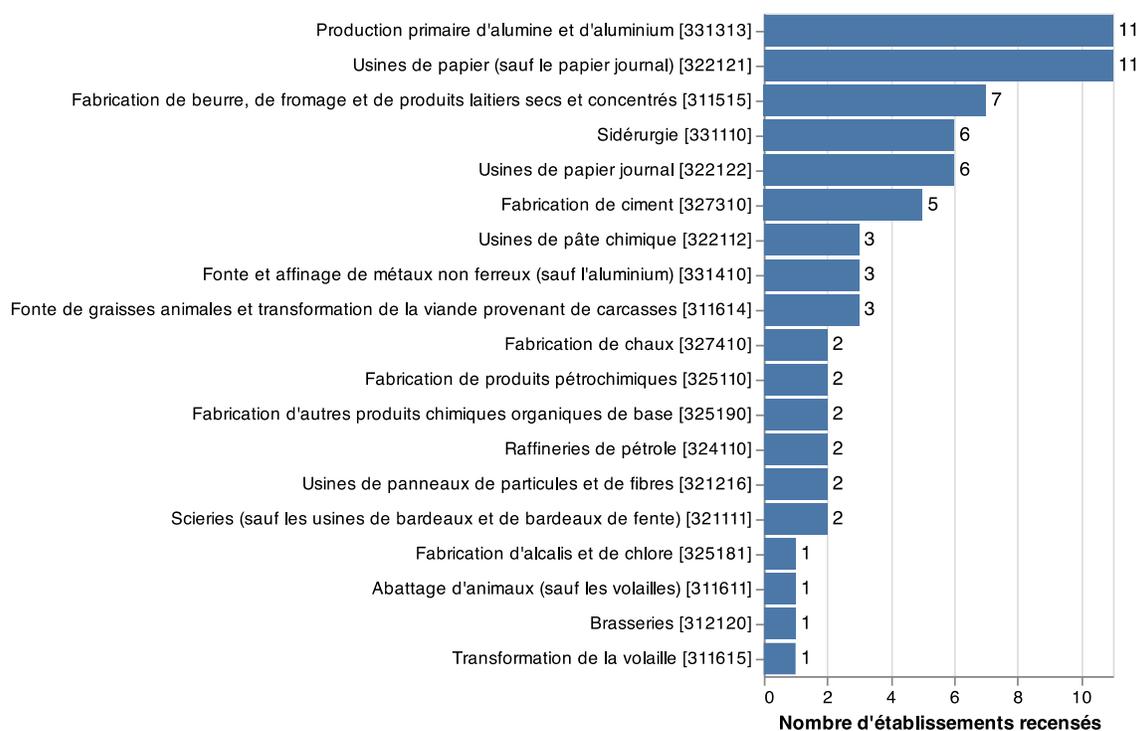


Figure 2 : Graphique illustrant le nombre d'établissements industriels recensés pour chacune des 19 classes industrielles prises en compte

2.1.2 Méthodologie

L'estimation des rejets thermiques est réalisée en partie en utilisant le rapport de Stricker Associates Inc. (2007) intitulé « Market study on waste heat and requirements for cooling and refrigeration in Canadian industry » qui permet d'estimer les rejets thermiques de 8 sous-secteurs manufacturiers ventilés en 17 groupes ou classes industrielles. Ce rapport, qui a été mandaté par CanmetÉNERGIE à Varennes, avait pour objectif d'estimer les rejets thermiques du secteur industriel sur l'ensemble du territoire canadien. Les résultats du rapport de Stricker Associates Inc. (2007) ont été obtenus en réalisant des bilans de masse et d'énergie sur les procédés utilisés par les industries. Ces bilans sont basés sur l'ouvrage « Energy Analysis of 108 Industrial Processes » de Brown (1996), qui effectue une analyse des intrants et extrants énergétiques de cent huit procédés industriels. Lorsque comparée à d'autres études semblables, telle que l'étude réalisée par INNOVAGRO Consultants (2010), l'étude de Stricker Associates Inc. (2007) permet de catégoriser les rejets thermiques de manière plus détaillées en termes de température et d'effluents. C'est pourquoi nous nous sommes basés sur cette étude pour estimer l'estimation des rejets thermiques.

Il est important de mentionner que pour estimer des rejets thermiques à l'échelle des établissements industriels, il est nécessaire d'utiliser des données à cette même échelle, soit par établissement et non par région ou pays. Une des seules sources de données publiques ayant

cette granularité est le registre des émissions de gaz à effet de serre canadien (Environnement et Changement climatique Canada, 2020b). Ce registre est utilisé pour recenser les établissements industriels ainsi que pour en extraire la quantité de CO₂e déclarée par ces établissements. Cette dernière est utilisée comme principal indicateur pour quantifier l'intensité des rejets thermiques des établissements industriels. De la même manière, d'autres études ont aussi utilisé les émissions de CO₂e comme indicateur pour estimer les rejets thermiques (McKenna & Norman, 2010; Velichko et al., 2018).

L'estimation de la consommation énergétique des établissements industriels a été réalisée en convertissant les déclarations d'émission de CO₂e présents dans le registre canadien en consommation énergétique. Pour ce faire, un ratio de conversion a été calculé en utilisant les données d'émissions de gaz à effet de serres et de consommation énergétique agrégées sur le territoire canadien par classe industrielle. Pour mieux représenter le contexte industriel québécois, il aurait été préférable d'utiliser des informations agrégées sur ce même territoire, mais n'étant pas disponible publiquement, les informations agrégées sur le territoire canadien ont été utilisées.

Le ratio de conversion est calculé en utilisant les données d'émission de gaz à effet de serre provenant de l'Inventaire officiel des gaz à effet de serre du Canada (Environnement et Changement climatique Canada, 2020a) ainsi qu'en utilisant les données de Statistique Canada portant sur la consommation énergétique des différents groupes et classes industriels (Statistique Canada, 2020b). Puisque l'Inventaire officiel des gaz à effet de serre du Canada ne regroupe pas la totalité des classes industrielles prises en compte dans cette étude, une deuxième source de données a été utilisée pour combler cette lacune. Pour ces cas particuliers, les données de la Base de données Nationale sur la Consommation d'Énergie (BNCE) ont été utilisées. Plus particulièrement les tableaux suivants : Tableau 6 : Émissions de GES par industrie – excluant les GES liés à l'électricité (Ressources naturelles Canada, 2020b) et Tableau 3 : Consommation d'énergie secondaire par industrie (Ressources naturelles Canada, 2020a). Il est important de noter que l'Inventaire officiel des gaz à effet de serre du Canada prend en compte les émissions des GES provenant de procédés industriels ainsi que ceux de la combustion d'énergies fossiles ce qui n'est pas le cas des données provenant du BNCE qui eux ne font que prendre en compte les GES provenant de la combustion des énergies fossiles. C'est pourquoi les informations provenant de l'Inventaire officiel des gaz à effet de serre du Canada ont été priorisées par rapport à celle de BNCE. Il est à noter que cette approche pose comme principale hypothèse que la consommation énergétique des établissements industriels est proportionnelle à leurs déclarations d'émissions de gaz à effet de serre. Enfin, il est important de noter que dans tous les cas les émissions excluent celles liées à l'électricité utilisée sur le site, et que le contexte particulier du Québec (faibles émissions liées à l'électricité) ne cause donc pas de problème d'interprétation des données.

Le Tableau 1 synthétise les groupes et classes industrielles qui sont pris en compte ainsi que la source de donnée qui est utilisée pour obtenir leur ratio de conversion. Il est important de noter que l'Inventaire officiel canadien des émissions de gaz à effet de serre regroupe les émissions de gaz à effet de serre en secteurs économiques. Par contre, aucune documentation n'indique à

quels codes SCIAN sont inclus dans ces groupes. Une correspondance avec le personnel d'Environnement et Changement climatique Canada nous a confirmé que cette information n'est pas disponible. Grâce aux descriptions de chacun des groupes utilisés par l'inventaire officiel canadien des émissions de gaz à effet de serre, nous avons été en mesure de déterminer quels codes SCIAN leurs sont associés. Cette association est indiquée à l'intérieur de ce tableau.

Tableau 1 : Groupes et classes industrielles pris en compte

Sous secteurs industriels	Groupes ou classes industriels étudiés par Stricker Associates Inc. (2007)	Inventaire des émissions de gaz à effet de serre canadien	Base de données nationale sur la consommation d'énergie (BNCE)
Fabrication d'aliments [311]	Fabrication de produits laitiers [3115]	X	✓
	Fabrication de produits de viande [3116]	X	✓
Fabrication de boissons et de produits du tabac [312]	Brasseries [31212]	X	✓
Fabrication de produits en bois [321]	Scieries (sauf les usines de bardeaux et de bardeaux de fente) [321111]	X	✓
	Usines de panneaux de particules et de fibres [321216]	X	✓
Fabrication du papier [322]	Usines de pâte chimique [322112]	✓	Pâtes et papiers
	Usines de papier [32212]		NA
Fabrication de produits du pétrole et du charbon [324]	Raffineries de pétrole [32411]	✓	Raffinage du pétrole
Fabrication de produits chimiques [325]	Fabrication de produits pétrochimiques [32511]		
	Fabrication d'alcalis et de chlore [325181]	✓	Produits chimiques et engrais
	Fabrication d'autres produits chimiques organiques de base [32519]		
	Fabrication d'engrais [32531]*		NA
Fabrication de produits minéraux non métalliques [327]	Fabrication de ciment [32731]	✓	Ciment
	Fabrication de chaux [32741]	✓	Chaux et gypse
Première transformation des métaux [331]	Sidérurgie [3311]	✓	Sidérurgie
	Production primaire d'alumine et d'aluminium [331313]	✓	Fonte et raffinage (métaux non ferreux)
	Fonte et affinage de métaux non ferreux (sauf l'aluminium) [33141]		

✓: Inclus

X: Non inclus

* Aucun établissement sur le territoire québécois

Tel que présenté en début de section, l'estimation des rejets thermiques est réalisée en utilisant le rapport de Stricker Associates Inc. (2007). Dans ce rapport, les rejets thermiques sont classés en quatre catégories. Pour les besoins de cette étude, les effluents liquides, qui étaient regroupés en une seule catégorie, ont été séparés en deux groupes : basse et haute température. Cela a été possible en utilisant les résultats intermédiaires de ce rapport qui détaillent les niveaux de température des effluents. Comme présenté plus tôt, les cinq catégories de rejets thermiques pris en compte sont les suivantes :

- Pertes par cheminées : gaz de combustion et air chaud provenant de séchoir (150 °C à 800 °C)
- Pertes de vapeur : proviens de vapeur à basse et moyenne pression (100 °C à 257 °C; 15 à 650 psi)
- Gaz et vapeur de procédés : air humide et gaz provenant de procédé industriel (80 °C à 500 °C)
- Effluents liquides à basse température (29 °C à 50 °C)
- Effluents liquides à haute température (50 °C à 122 °C)

La Figure 3 montre le ratio des cinq types de rejets thermiques en relation à l'énergie consommée pour les 17 classes industrielles étudiés par Stricker Associates Inc. (2007). Il peut être remarqué que les rejets thermiques de la classe « Fabrication d'Autres produits chimiques organiques de base [32519] » représentent 174% de leur consommation énergétique. Cela est causé par les procédés exothermiques utilisés par les établissements de cette classe industrielle.

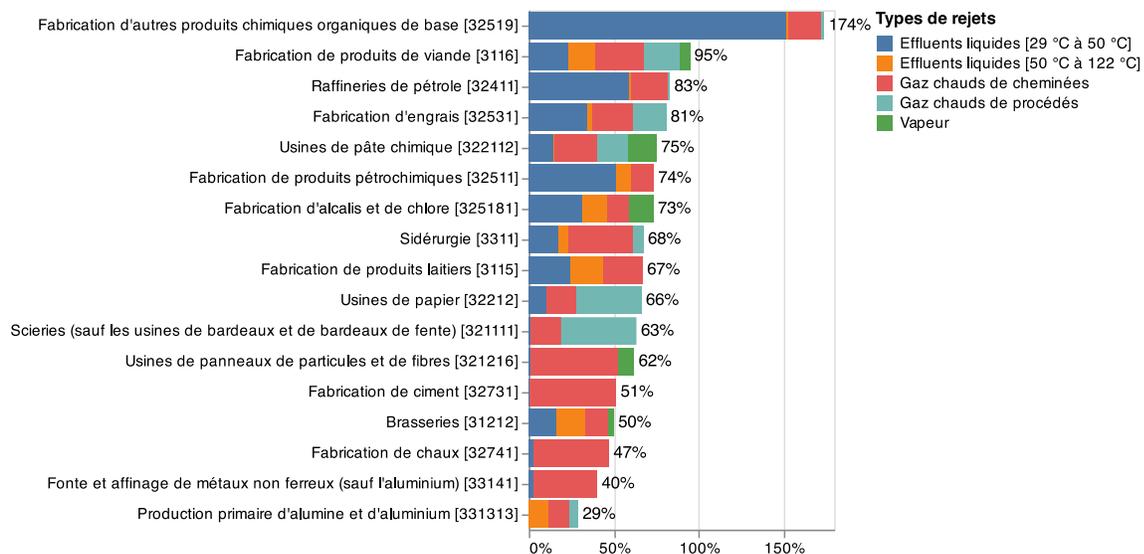
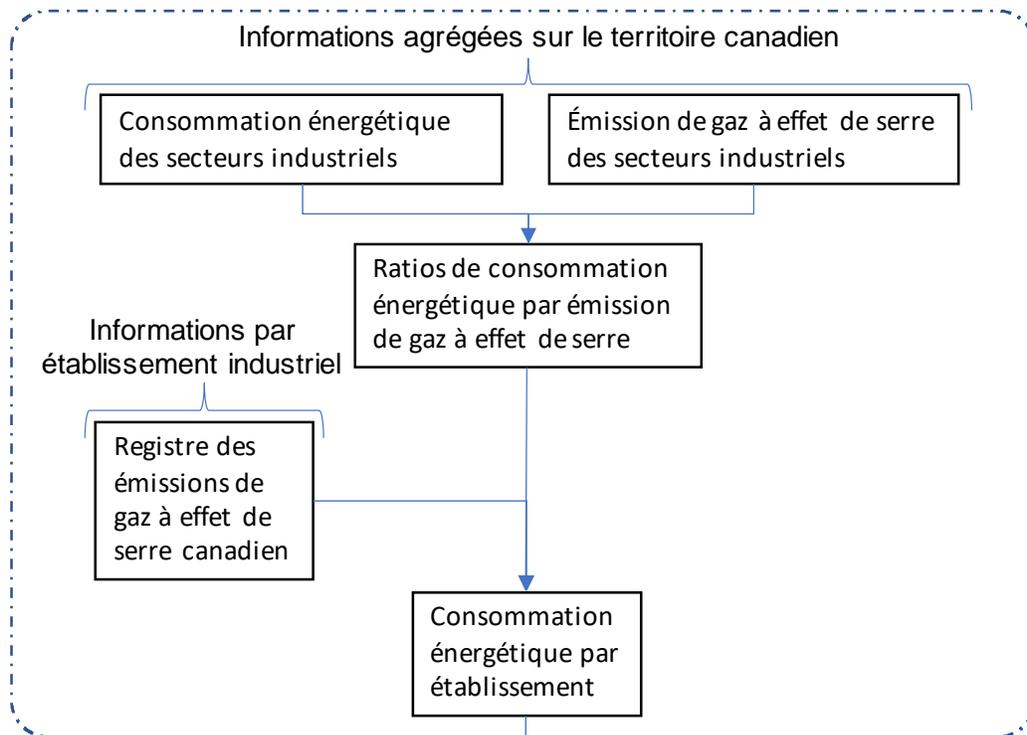


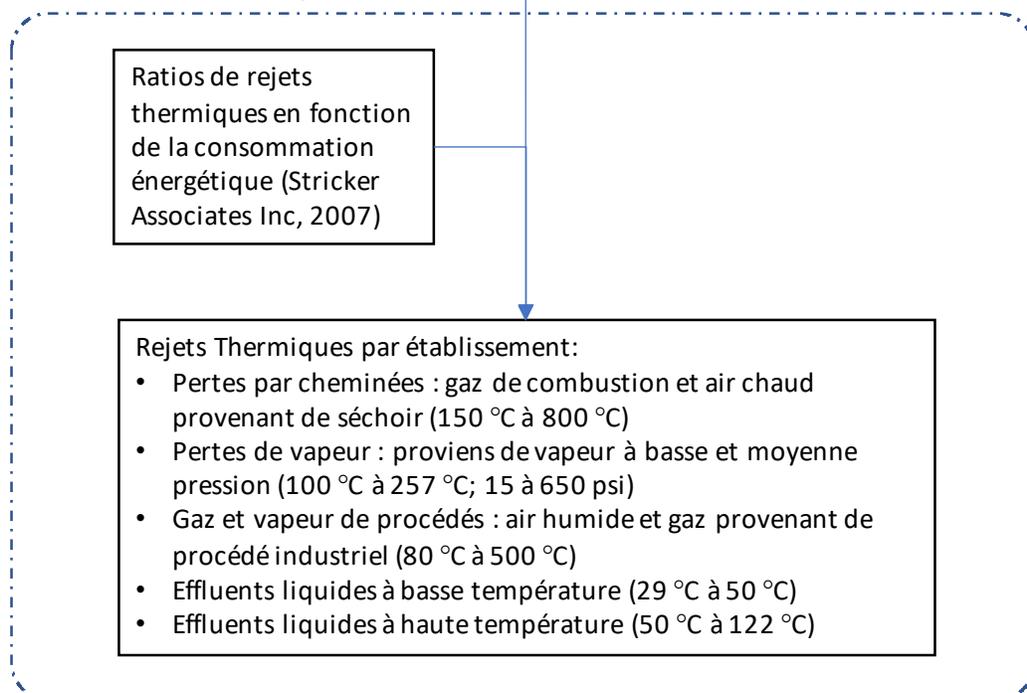
Figure 3 : Graphique présentant les ratios des rejets thermiques en fonction de la consommation énergétique provenant de Stricker Associates Inc. (2007)

La présente méthodologie est schématisée à la Figure 4.

1. Estimation de la consommation énergétique des établissements industriels



2. Estimation des rejets thermiques



- Rejets Thermiques par établissement:
- Pertes par cheminées : gaz de combustion et air chaud provenant de séchoir (150 °C à 800 °C)
 - Pertes de vapeur : proviens de vapeur à basse et moyenne pression (100 °C à 257 °C; 15 à 650 psi)
 - Gaz et vapeur de procédés : air humide et gaz provenant de procédé industriel (80 °C à 500 °C)
 - Effluents liquides à basse température (29 °C à 50 °C)
 - Effluents liquides à haute température (50 °C à 122 °C)

Figure 4 : Schéma de la méthodologie permettant d'estimer les rejets thermiques d'établissements industriels

2.1.3 Résultats et discussion

Les résultats présentés sont pour l'année 2018 sauf mention contraire. Au total, les rejets thermiques de 71 établissements industriels ont été estimés pour un total de 171 PJ (millions de GJ). La carte présentée à la Figure 4 représente l'intensité de tous les rejets thermiques recensés sur le territoire québécois. La ventilation des rejets thermiques par classes industrielles est présentée à la Figure 5 et détaillée au Tableau 2. La classe industrielle ayant le plus de rejets thermiques est « Production primaire d'alumine et d'aluminium » pour 38,6 PJ suivie de la classe « Raffineries de pétrole » pour 27,9 PJ.

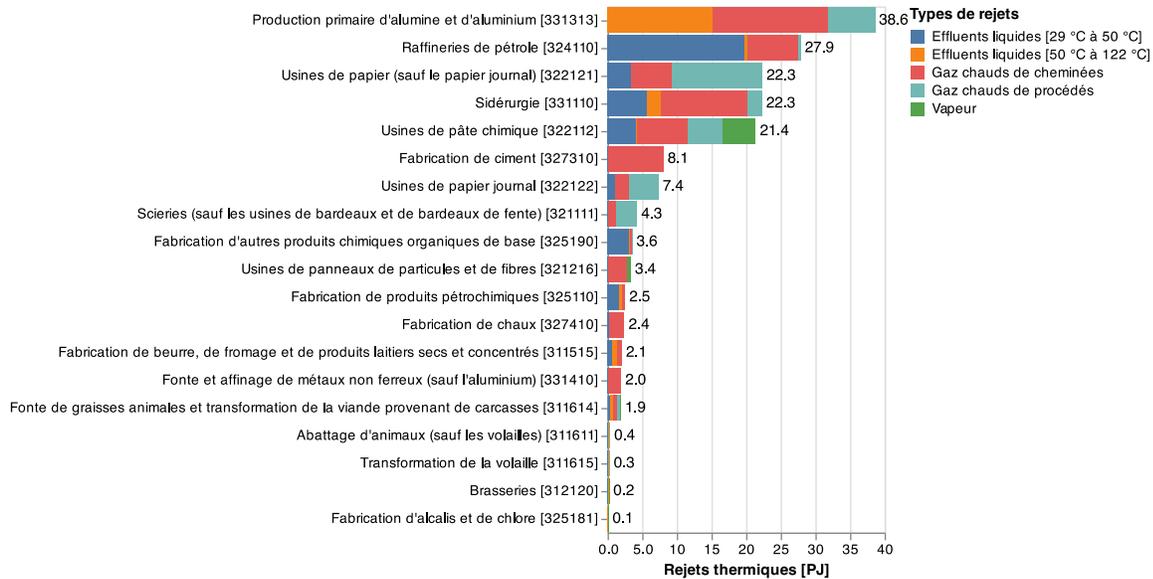


Figure 5 : Graphique illustrant la quantité de rejets thermiques estimés par classes industrielles

Tableau 2 : Quantité de rejets thermiques estimés par type de rejets en fonction des classes industrielles

Classes industrielles	Effluents liquides (29 °C à 50 °C) [PJ]	Effluents liquides (50 °C à 122 °C) [PJ]	Gaz chauds de cheminée [PJ]	Gaz chauds de procédés [PJ]	Vapeur [PJ]	Total [PJ]
Production primaire d'alumine et d'aluminium [331313]	0,00	15,17	16,63	6,79	0,00	38,59
Raffineries de pétrole [324110]	19,73	0,40	7,38	0,37	0,00	27,88
Usines de papier (sauf le papier journal) [322121]	3,37	0,00	5,97	13,01	0,00	22,35
Sidérurgie [331110]	5,69	1,91	12,62	2,08	0,00	22,30
Usines de pâte chimique [322112]	4,16	0,11	7,27	5,00	4,86	21,39
Fabrication de ciment [327310]	0,06	0,00	8,01	0,00	0,00	8,07
Usines de papier journal [322122]	1,11	0,00	1,96	4,28	0,00	7,36
Scieries (sauf les usines de bardeaux et de bardeaux de fente) [321111]	0,07	0,00	1,21	2,99	0,00	4,27
Fabrication d'autres produits chimiques organiques de base [325190]	3,13	0,02	0,41	0,03	0,00	3,58
Usines de panneaux de particules et de fibres [321216]	0,05	0,00	2,82	0,00	0,49	3,36
Fabrication de produits pétrochimiques [325110]	1,76	0,30	0,47	0,00	0,00	2,54
Fabrication de chaux [327410]	0,14	0,00	2,29	0,00	0,00	2,43
Fabrication de beurre, de fromage et de produits laitiers secs et concentrés [311515]	0,76	0,60	0,71	0,00	0,00	2,06
Fonte et affinage de métaux non ferreux (sauf l'aluminium) [331410]	0,13	0,00	1,82	0,00	0,00	1,95
Fonte de graisses animales et transformation de la viande provenant de carcasses [311614]	0,47	0,31	0,59	0,42	0,12	1,92
Abattage d'animaux (sauf les volailles) [311611]	0,09	0,06	0,11	0,08	0,02	0,36
Transformation de la volaille [311615]	0,07	0,05	0,09	0,06	0,02	0,29
Brasseries [312120]	0,08	0,08	0,07	0,00	0,01	0,23
Fabrication d'alcalis et de chlore [325181]	0,05	0,02	0,02	0,00	0,02	0,11
Total:	40,93	19,02	70,45	35,11	5,54	171,06

En se fiant sur la Figure 6, qui présente la proportion de chacun des types de rejets thermiques étudiés, il est intéressant de remarquer que plus de 60% de ces derniers sont catégorisés comme gaz chauds de cheminées ou effluents liquides à basse température.

La Figure 7 présente la proportion des rejets thermiques par classes industrielles par rapport au total des rejets thermiques recensés. Les classes industrielles représentant moins de 5% des rejets thermiques sont groupés dans la catégorie « Autres ». Cette figure montre que 77% des rejets thermiques (représentant 110 PJ) proviennent seulement de 5 classes industrielles : production primaire d'alumine et d'aluminium [331313], usines de papier (sauf le papier journal) [322121], usines de pâtes chimiques [322112] et raffineries de pétrole [324110].

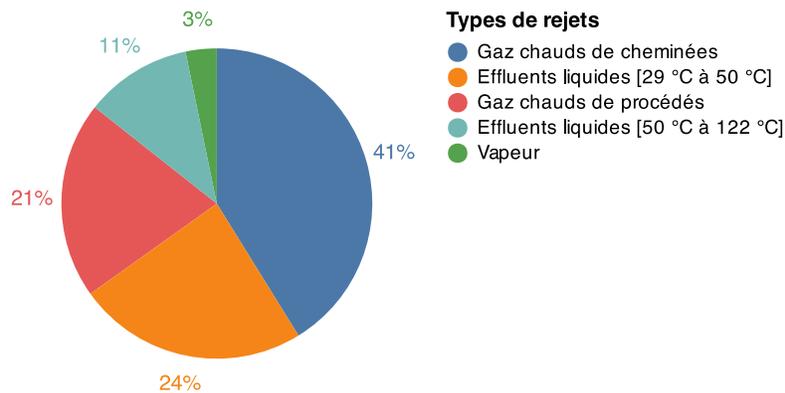


Figure 6 : Graphique illustrant la proportion des types de rejets thermiques par type de rejets thermiques pour les établissements industriels

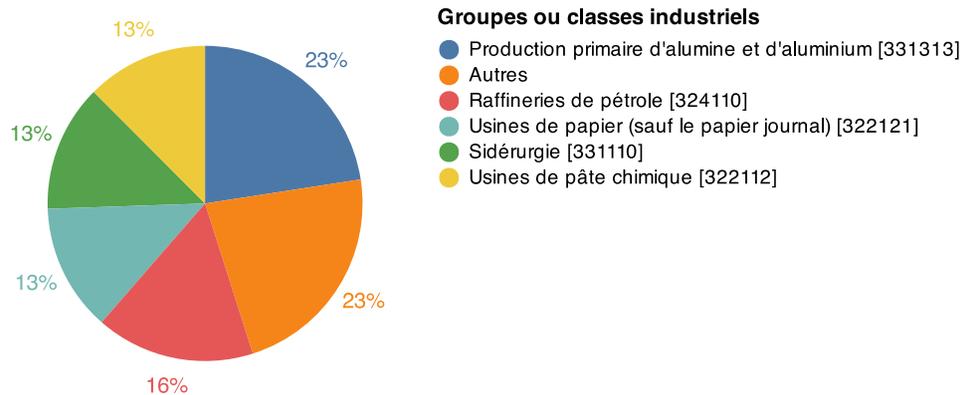


Figure 7 : Graphique illustrant la proportion de la quantité de rejets thermiques par classes industrielles

La Figure 8 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre les rejets thermiques de chacun des établissements pris en compte dans cette étude. Les deux plus grandes sources de rejets thermiques proviennent des deux raffineries de pétrole, soit celle de Montréal et celle de Lévis, rejetant chacune 14 PJ.

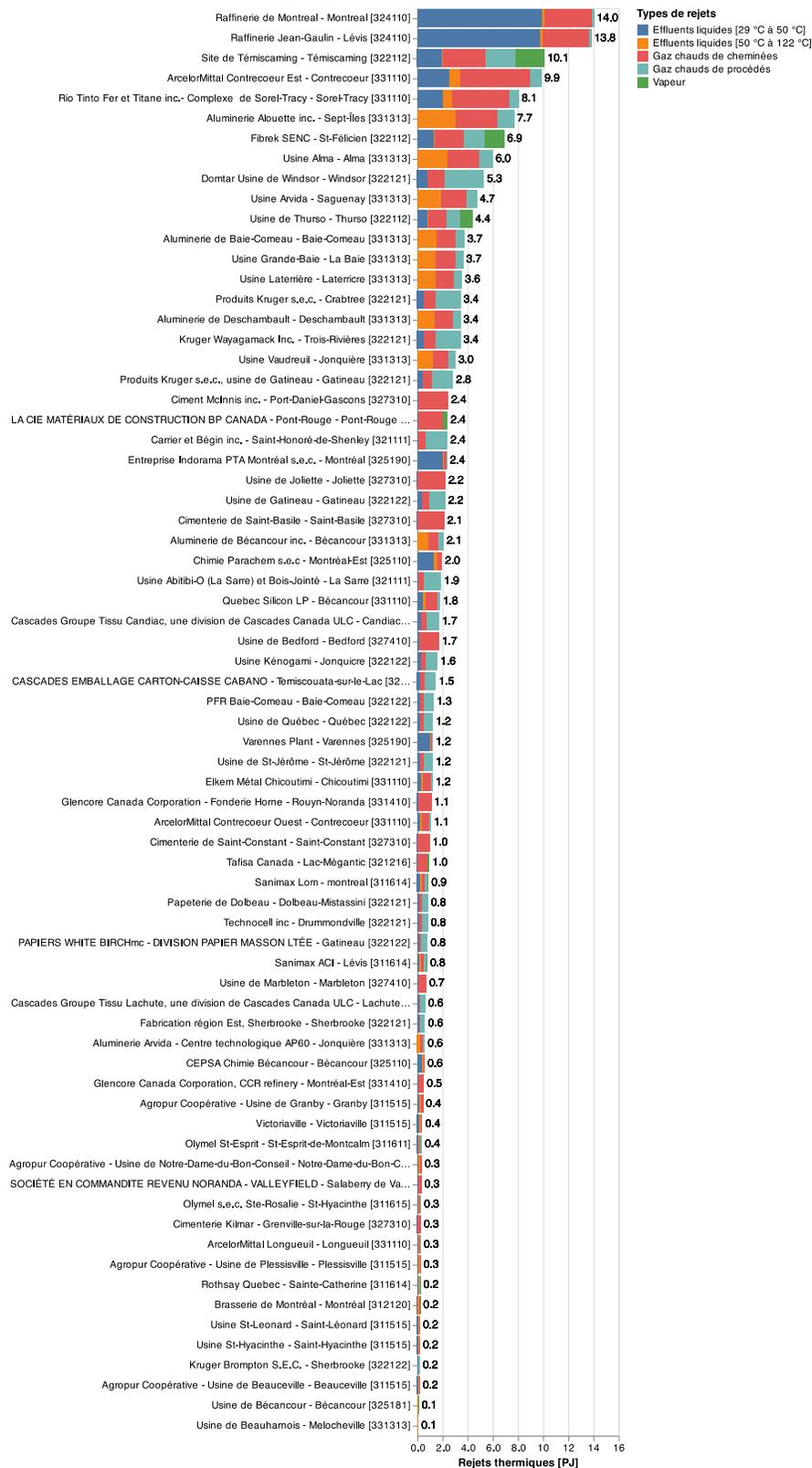


Figure 8 : Graphique présentant les rejets thermiques estimés pour chacun des établissements recensés pour l'année 2018

Comparaison avec les études antérieures

Le Tableau 3 présente une comparaison des résultats de la présente étude avec ceux obtenus par INNOVAGRO Consultants (2010). Il est important de mentionner que puisque l'étude d'INNOVAGRO Consultant (2010) porte sur les rejets thermiques de l'année 2008, la comparaison est réalisée avec les résultats portant sur la même année. Dans l'absolu, des écarts substantiels peuvent être observés. Ces écarts peuvent être expliqués par deux différences méthodologiques :

- Pour estimer la consommation d'énergie des industries, INNOVAGRO Consultants (2010) se base sur la capacité de production des établissements, leurs revenus (en partie confidentiels), et des données statistiques canadiennes, tandis que cette étude se base sur leur déclaration des émissions de gaz à effet de serre.
- Les méthodes utilisées pour estimer les rejets thermiques en fonction de la consommation énergétique des établissements industriels sont différentes (voir ci-dessous).

Certains établissements peuvent être absents des registres d'émission de GES, ce qui pourrait expliquer une consommation énergétique plus faible pour certains secteurs industriels dans la présente étude. De plus, certains établissements peuvent ne pas fonctionner à pleine capacité, ce qui pourrait également expliquer une estimation plus faible. En examinant les données pour 2008, on constate que la consommation énergétique estimée pour les alumineries est relativement proche dans la présente étude (152 PJ) et dans l'étude d'INNOVAGRO (173 PJ). Par contre, les différences sont plus grandes pour les raffineries (65 PJ et 87 PJ respectivement), voire même extrêmement grandes pour le secteur des pâtes et papiers (32 PJ dans cette étude, 196 PJ dans l'étude INNOVAGRO). La méthode choisie se base sur des données publiques (registre des émissions) mais sous-estime probablement la consommation énergétique des industries considérées : au total, cette consommation représente 297 PJ contre 560 PJ pour l'étude INNOVAGRO, soit une différence de presque 50 %. On peut espérer que des mises à jour de la base de données des rejets utilisant des informations issues d'une divulgation volontaire ou obligatoire des rejets thermiques permettra de lever cette incertitude.

Pour estimer les rejets thermiques, l'étude d'INNOVAGRO et la présente étude se basent sur des ratios entre ces rejets et la consommation d'énergie. Dans notre étude, ces ratios sont déterminés à partir du rapport de Stricker Associates Inc. (2007), tel que décrit en 2.1.2. Dans l'étude d'INNOVAGRO, ces ratios sont tirés d'un rapport de 1982 (Latour et al., 1982). Certains ratios sont très proches : par exemple, pour les industries de métallurgie (sauf aluminium), les deux sources donnent des rejets thermiques représentant 67 % de la consommation énergétique, mais les ratios utilisés dans la présente études répartissent ces rejets en 23 % liquides et 44 % gazeux, alors que l'étude d'INNOVAGRO ne mentionne que des rejets gazeux. Les rejets liquides estimés par la présente étude sont d'ailleurs presque toujours plus grands que dans l'étude INNOVAGRO – il est possible que certains rejets à basse température soient simplement ignorés dans la méthodologie. En général, le pourcentage de rejet estimé dans la présente étude est plus grand que celui estimé dans l'étude d'INNOVAGRO. Les alumineries sont un exemple représentatif, avec

des rejets liquides et gazeux de 1 % et 16 % pour INNOVAGRO et de 11 % et 18 % dans la présente étude.

En combinant ces deux différences (consommation énergétique en général plus faible dans la présente étude mais pourcentage de rejets plus important), on arrive aux résultats présentés au Tableau 3. Les rejets thermiques totaux sont plus faibles (-31 %), et une plus grande partie de ces rejets consiste en des effluents liquides. Il est intéressant de remarquer que les trois groupes industriels représentant les plus grandes sources de rejets thermiques sont les mêmes pour les deux études, soit : production primaire d'alumine et d'aluminium [331313], usines de papier [32212] et raffineries de pétrole [32411]. Tel que discuté plus haut, la base de données pourra être raffinée et améliorée en y incorporant les résultats d'une divulgation des consommations énergétiques et des rejets thermiques.

Tableau 3 : Comparaison entre les résultats d'INNOVAGRO Consultants (2010) et les résultats de cette étude

Classes ou groupes industriels	Consommation énergétique estimée [PJ]			Rejets thermiques [PJ]		
	INNOVAGRO Consultant	Cette étude, Année 2008	Écart relatif	INNOVAGRO Consultant	Cette étude, Année 2008	Écart relatif
Usines de pâte [322111] [322112]	84,65	9,18	-89%	41,93	6,91	-84%
Usines de papier [322121] [322122]	111,41	22,69	-80%	54,31	15,15	-72%
Usines de carton [322130]	24,14	-	-	2,54	-	-
Raffineries de pétrole [32411]	86,96	65,09	-25%	54,79	54,09	-1%
Fabrication de produits pétrochimiques [32511]	9,73	3,40	-65%	0,47	2,49	433%
Fabrication de gaz industriels [32512]	4,24	-	-	1,06	-	-
Fabrication d'alcalis et de chlore [325181]	2,81	-	-	2,62	-	-
Fabrication de tous les autres produits chimiques inorganiques de base [325189]	9,14	-	-	3,15	-	-
Fabrication d'autres produits chimiques organiques de base [325190]	3,10	1,59	-49%	0,27	2,78	919%
Fabrication de produits en verre à partir de verre acheté [327215]	0,47	-	-	1,53	-	-
Fabrication de ciment [32731]	12,32	10,84	-12%	7,52	5,57	-26%
Fabrication de chaux [32741]	6,66	5,64	-15%	3,46	2,66	-23%
Production primaire d'alumine et d'aluminium [331313]	172,63	151,67	-12%	29,84	43,99	47%
Fonderies de fer et d'acier [331511] [331514], Fonderies de métaux non ferreux (sauf l'aluminium) [331512] [33141] et sidérurgie [331110]	35,34	27,36	-23%	23,67	-18,47	-22%
Total	563,6	297,3	-47%	227,2	152,0	-31%

2.2 Centrales de cogénération

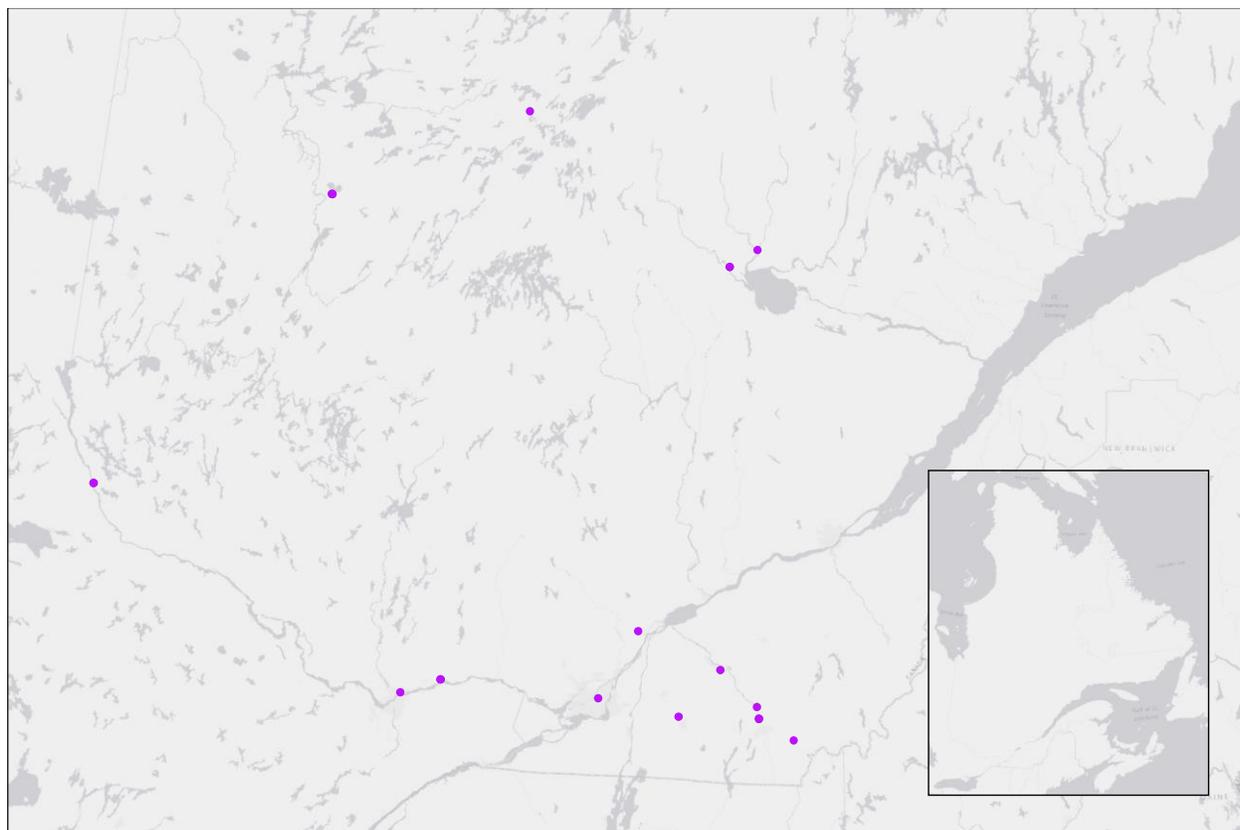


Figure 9 : Carte présentant les emplacements des centrales de cogénération recensés

Les centrales de cogénération génèrent une quantité non négligeable de rejets thermiques valorisables. La forme première d'énergie thermique générée par ces centrales est la vapeur qu'elles produisent pour générer de l'électricité. Par contre, cette dernière est, dans la majorité des cas, déjà valorisée par un consommateur à proximité des centrales, les deux entités étant liées contractuellement. C'est pourquoi seulement la chaleur résiduelle provenant de cette vapeur est comptabilisée comme rejet thermique valorisable.

Le recensement des centrales a été réalisé en se basant sur les informations contenues sur la page web « Contrats d'approvisionnement en électricité en vigueur » d'Hydro-Québec (2021). Au total, les rejets thermiques de 20 centrales de cogénération ont été compatibilisés. La centrale de Bécancour n'a pas été prise en compte, car selon un article publié dans *Le Devoir* par Alexandre Shields (2018), elle est demeurée à l'arrêt depuis décembre 2007.

L'estimation des rejets thermiques est basée sur le cas spécifique de la ville de Saint-Félicien, pour lequel nous avons obtenu des informations sur les potentielles installations de valorisation de rejets thermiques qui pourraient être construites et connectées à la centrale. Il est question d'une boucle d'eau chaude à 40 °C ainsi qu'une seconde boucle d'eau chaude à 95 °C. L'estimation des rejets thermiques des autres

centrales de cogénération au Québec est réalisée en extrapolant la capacité de chacune des boucles d'eau chaude à la capacité de production électrique de chacune des centrales. Au total, il est estimé que la totalité des centrales de cogénération génère 15 PJ de rejets thermiques valorisables. La Figure 10 présente la quantité de rejets thermiques valorisable par établissement pris en compte.

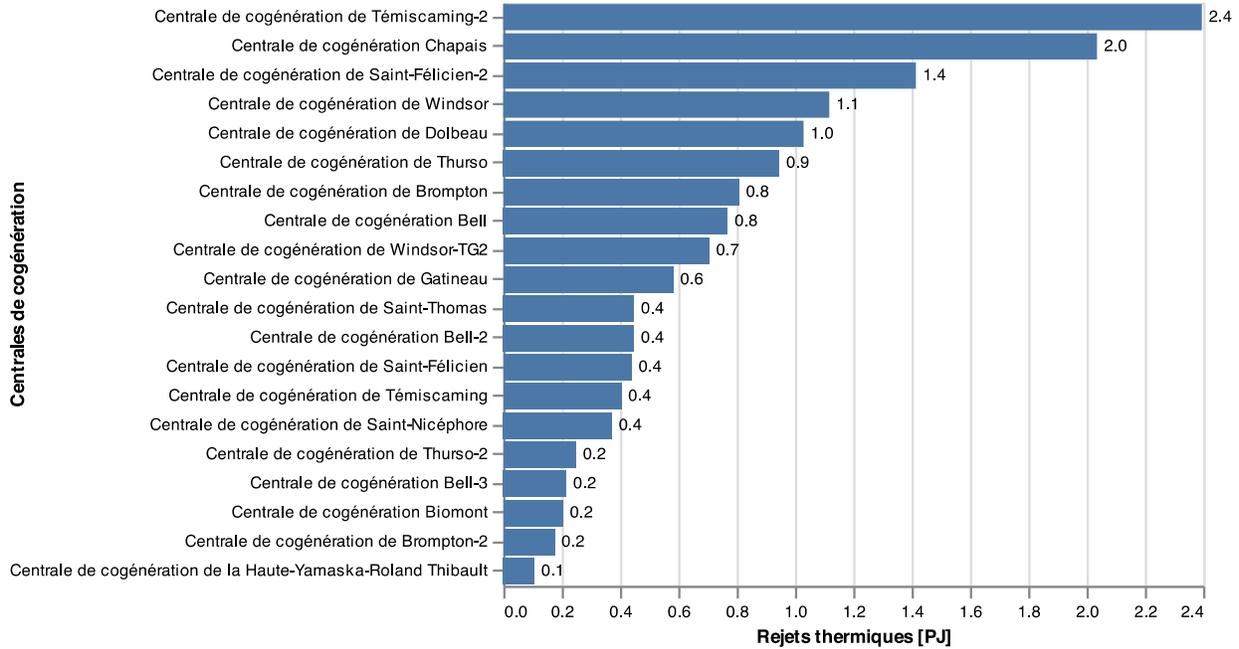


Figure 10 : Graphique présentant la quantité de rejets thermiques valorisables estimés en pétajoule des centrales de cogénération

2.3 Centres de données

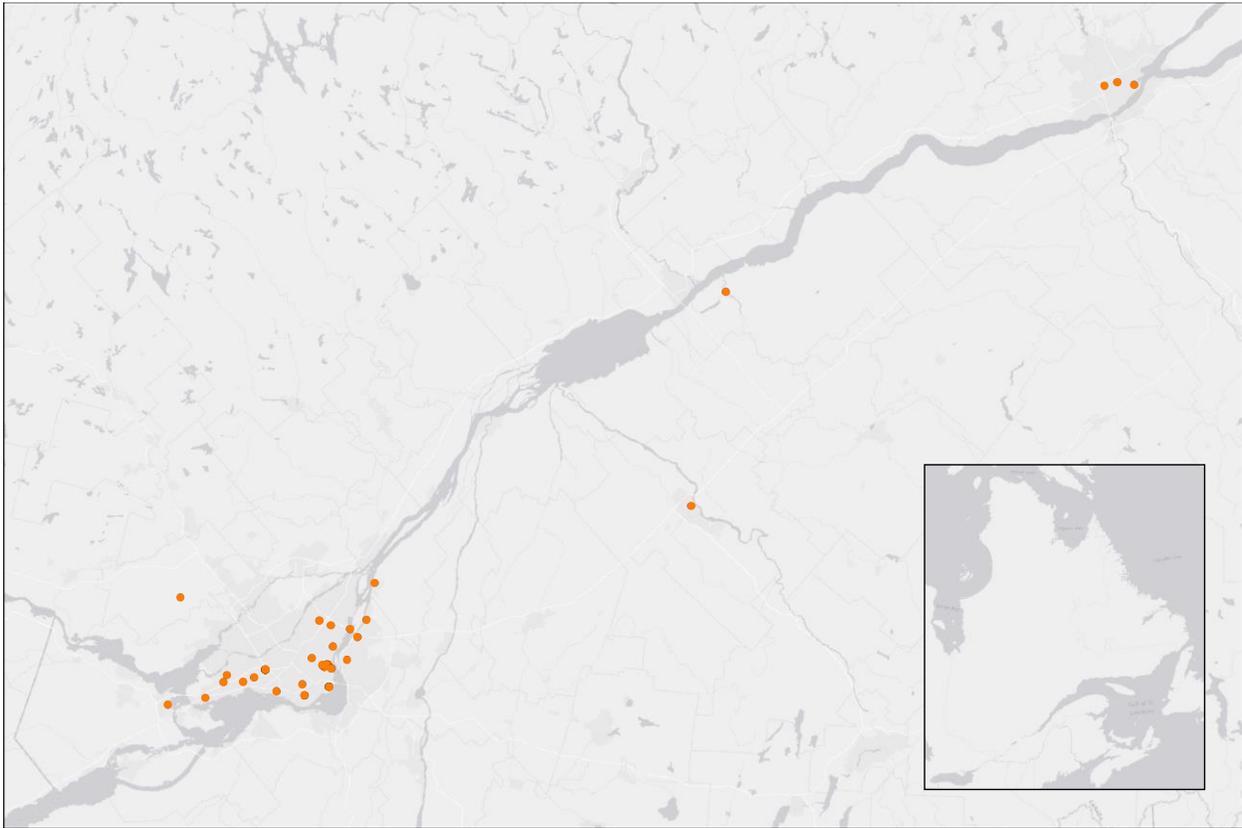


Figure 11 : Carte présentant les emplacements des centres de données recensés

Au total, 59 centres de données ont été recensés et sont présentés sur la carte de la Figure 11. La majorité sont répertoriés sur le site internet « Data Center Map » (2021). Ce site internet permet de déterminer l'emplacement du centre de données, mais n'offre aucune information sur la capacité de ces derniers. Un travail manuel a alors été effectué pour rechercher les informations publiées par les opérateurs des centres de données permettant d'estimer leurs rejets thermiques. Ces informations étant de nature sensible, les rejets thermiques de seulement 22 des 59 centres de données recensés ont pu être estimés en se basant sur le livre blanc intitulé « *Calculating total power requirements for data centers* » (Sawyer, 2004). Il a été estimé que ces 22 centres de données rejettent 3,5 PJ de rejets thermiques à basse température.

2.4 Stations d'épuration

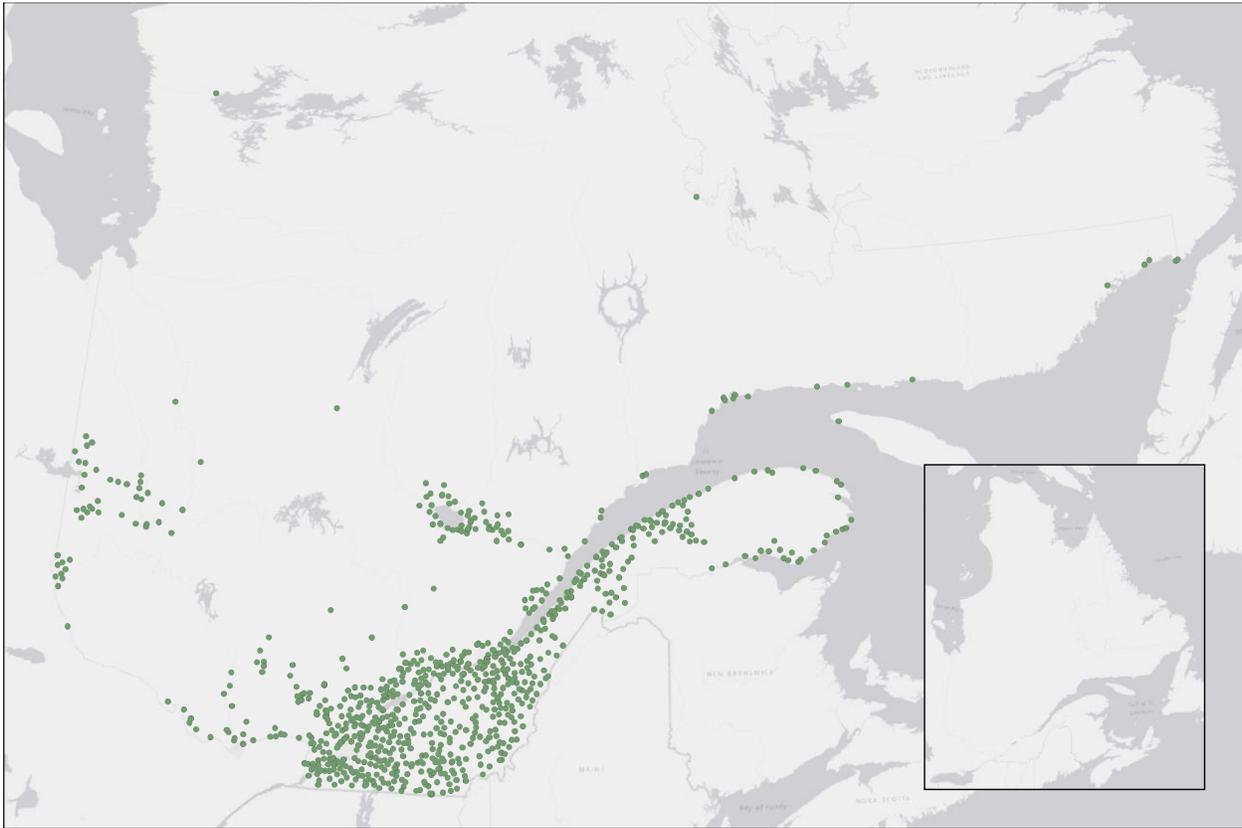


Figure 12 : Emplacements des stations d'épuration au Québec

L'eau qui est acheminée aux stations d'épuration peut être considérée comme une source de rejets thermiques valorisable si des thermopompes sont utilisées pour y extraire cette énergie. Puisque cette dernière provient de bâtiments, sa température est plus élevée que l'eau provenant directement l'aqueduc, d'où son potentiel de valorisation. Elle se trouve donc fatalement à proximité de ces derniers, offrant ainsi une belle opportunité de valorisation pour satisfaire en partie les besoins en chauffage de ces zones.

Pour donner un ordre de grandeur, en utilisant des données transmises par la ville de Montréal à propos de son réseau de collecteurs, nous avons été en mesure de déterminer que la température moyenne annuelle des eaux usées à Montréal est de 14 °C. En hiver, cette température baisse à 5 °C et exceptionnellement elle peut atteindre 1 °C lors des journées les plus froides. En été, la température de l'eau peut monter jusqu'à 25°C. Exceptée lors des journées les plus froides de l'hiver, où l'eau avoisine le point de congélation, il est estimé que des pompes à chaleur seraient en mesure d'y extraire de la chaleur permettant ainsi de la valoriser.

Pour estimer la quantité d'énergie thermique valorisable à la grandeur du Québec, nous avons estimé que les échangeurs de chaleur utilisés permettraient d'abaisser la température des eaux usées de 1,5 °C. La différence de température des eaux usées dépend de plusieurs facteurs tels que le débit ainsi que la

superficie de l'échangeur thermique, mais typiquement cette différence de température se situe entre 1 et 2 °C c'est pourquoi une valeur de 1,5 °C a été utilisée (Abdel-Aal et al., 2018; *HUBER Solution for Heat Recovery from Sewers (ThermWin)*, 2021). Le jeu de données « Pressions municipales - Rejets d'eaux usées » provenant du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques et disponibles sur le site internet de Donnée Québec (2021) a permis de recenser 848 stations ainsi que le volume d'eau traité annuellement par station. Ces données ont permis d'évaluer une quantité totale d'énergie thermique valorisable de 13,7 PJ. La Figure 13 présente les 10 stations d'épuration avec le plus grand potentiel de valorisation thermique. Par exemple, selon les hypothèses émises, la station Jean-R. Marcotte a un potentiel de valorisation thermique de 5,4 PJ par année.

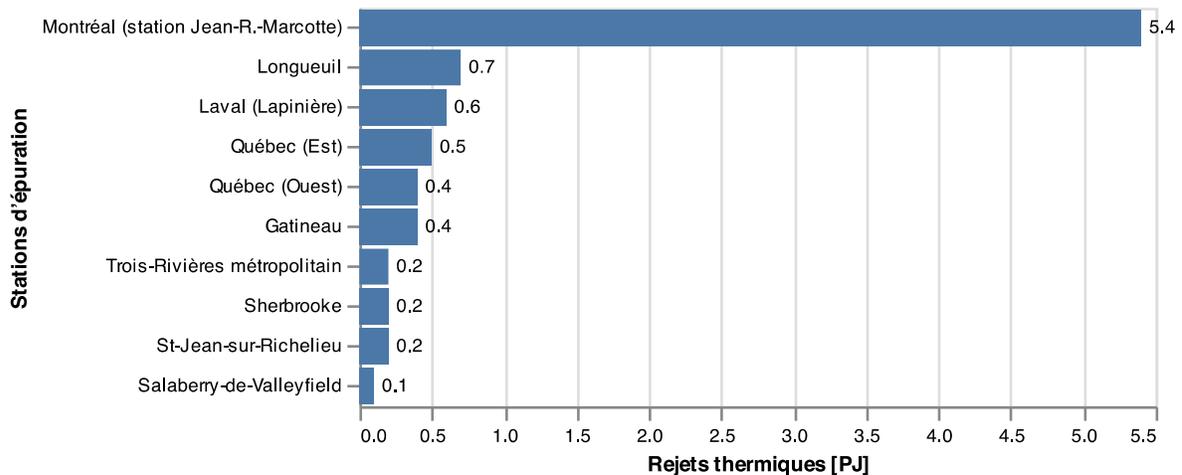


Figure 13 : Graphique présentant les 10 stations d'épuration ayant les plus importants rejets thermiques du Québec

2.5 Réseaux électriques autonomes

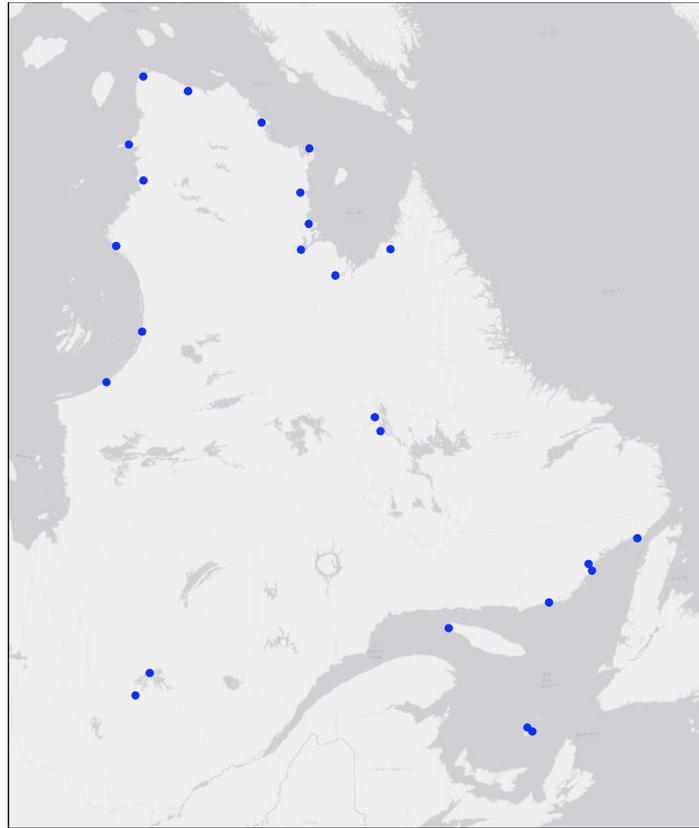


Figure 14 : Carte présentant les réseaux autonomes d'Hydro-Québec

Les 23 réseaux autonomes recensés sont ceux ayant des centrales thermiques à moteur diesel. Les emplacements de ces derniers sont illustrés à la Figure 14. L'estimation de leurs rejets thermiques valorisables est réalisée en combinant la quantité d'électricité produite lors de l'année 2019 divulguée dans le rapport intitulé « Complément d'information du plan d'approvisionnement 2020-2029; Réseaux autonomes » d'Hydro-Québec (2019) aux informations de récupération de chaleur présente dans un des manuels d'opération des générateurs au diesel. Une estimation de la quantité de rejets thermiques a seulement été possible pour 20 d'entre eux, car certaines informations étaient manquantes pour 3 réseaux. Deux types de rejets thermiques distincts ont été répertoriés : les gaz d'échappement à 120 °C ainsi que l'eau de refroidissement du moteur pouvant se situer entre 99 °C et 127 °C. Selon le manuel d'opération, 34 % et 8 % de l'énergie consommée par les moteurs se retrouvent respectivement dans les gaz d'échappement et dans l'eau de refroidissement. La Figure 15 présente l'estimation des rejets thermiques annuel en térajoules (1000 térajoules = 1 pétajoule) de chacun des 20 réseaux autonomes où les rejets thermiques valorisables ont été estimés.

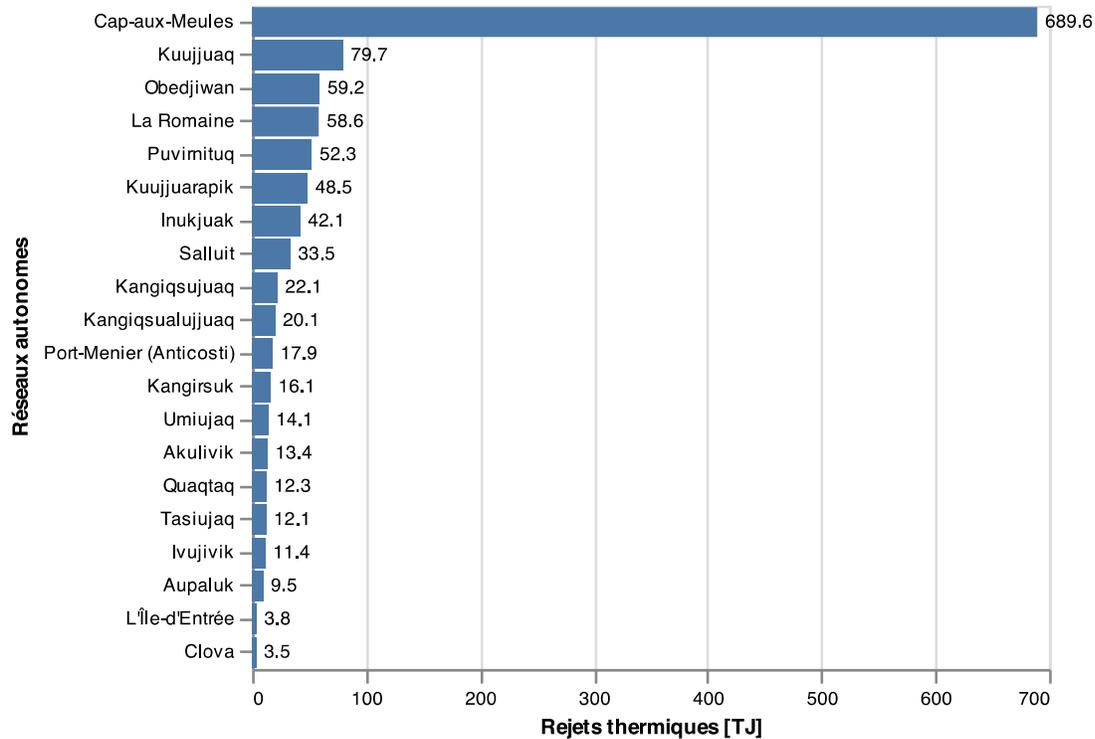


Figure 15 : Rejets thermiques annuels en térajoules pour les réseaux autonomes de Hydro-Québec

2.6 Résumé de l'estimation des rejets thermiques

Cette phase du projet a permis de recenser et d'estimer la quantité de rejets thermiques présents sur le territoire québécois. Afin de catégoriser la qualité des rejets thermiques, ces derniers ont été groupés en fonction de leur température ainsi que le type de rejet. Une carte de chaleur du Québec illustrant la quantité des rejets thermiques estimés pour toutes les sources recensées est présenté à la Figure 16. Dans cette figure, la gradation de couleur passant du jaune au rouge permet de visualiser la quantité de thermiques recensée, jaune pâle étant la valeur la plus faible et rouge foncée la plus élevée. **Au total, la quantité de rejets thermiques recensés est de 204 PJ.**

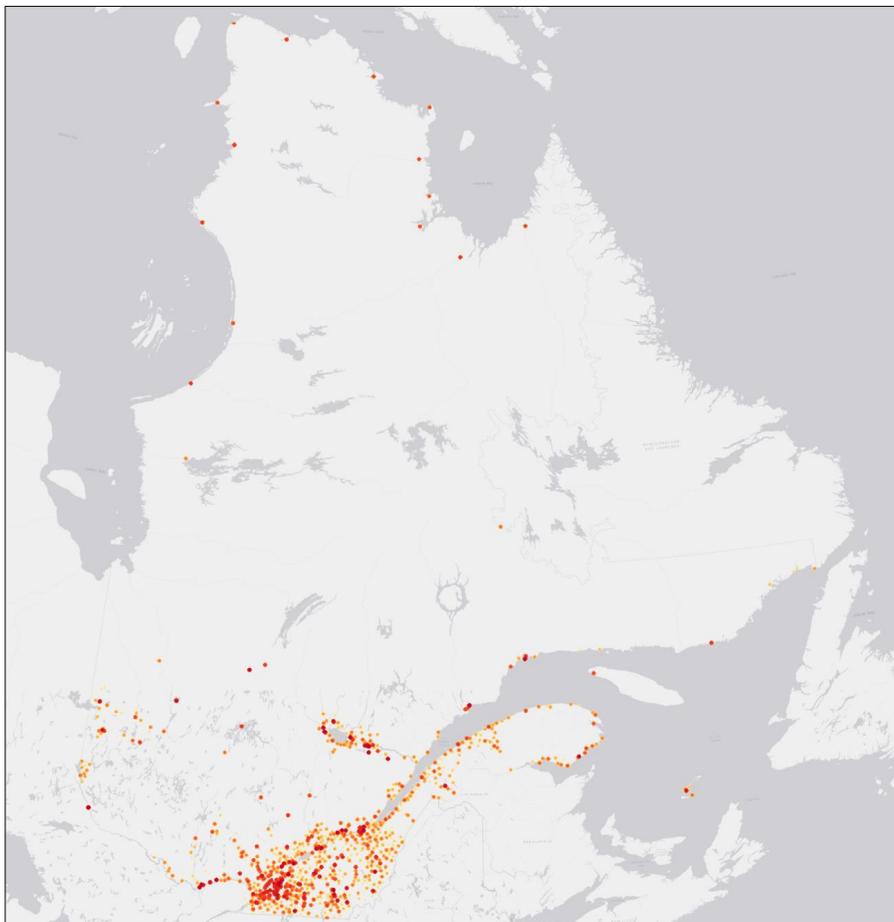


Figure 16 : Carte de chaleur du Québec présentant la quantité des rejets thermiques estimés

Les établissements industriels représentent la plus grande source de rejets thermiques valorisable (171 PJ). Suivi par les centrales de cogénération avec 14,9 PJ de rejets thermiques principalement constitués d'effluents liquides à basse température (40 °C). Il est très intéressant de remarquer que les rejets thermiques à très basse température (15 °C) provenant des stations d'épuration sont évalués à 13,7 PJ.. Puisqu'il y a un très grand nombre de stations d'épuration (848), une très grande quantité de ces stations représentent une source négligeable de rejets thermiques, mais certaines offrent un potentiel intéressant tel que la station Jean-R. Marcotte à Montréal ayant 5,4 PJ de rejets thermiques estimés. Le Tableau 4 présente le nombre d'établissements recensé ainsi que la quantité totale des rejets thermiques recensés pour chacune des catégories étudiées. Toujours pour chacune des catégories étudiées, la Figure 17 présente la ventilation des rejets thermiques.

Tableau 4: Tableau présentant le nombre d'établissement recensés ainsi que la quantité de rejets thermiques par catégories de source

Catégories	Nombre d'établissements	Rejets thermiques[PJ]
Secteur industriel	71	171
Centrales de cogénération	20	14,9
Centres de données	22	3,5
Réseaux électriques autonomes	20	1,2
Station d'épuration des eaux	848	13,7
Total :		204

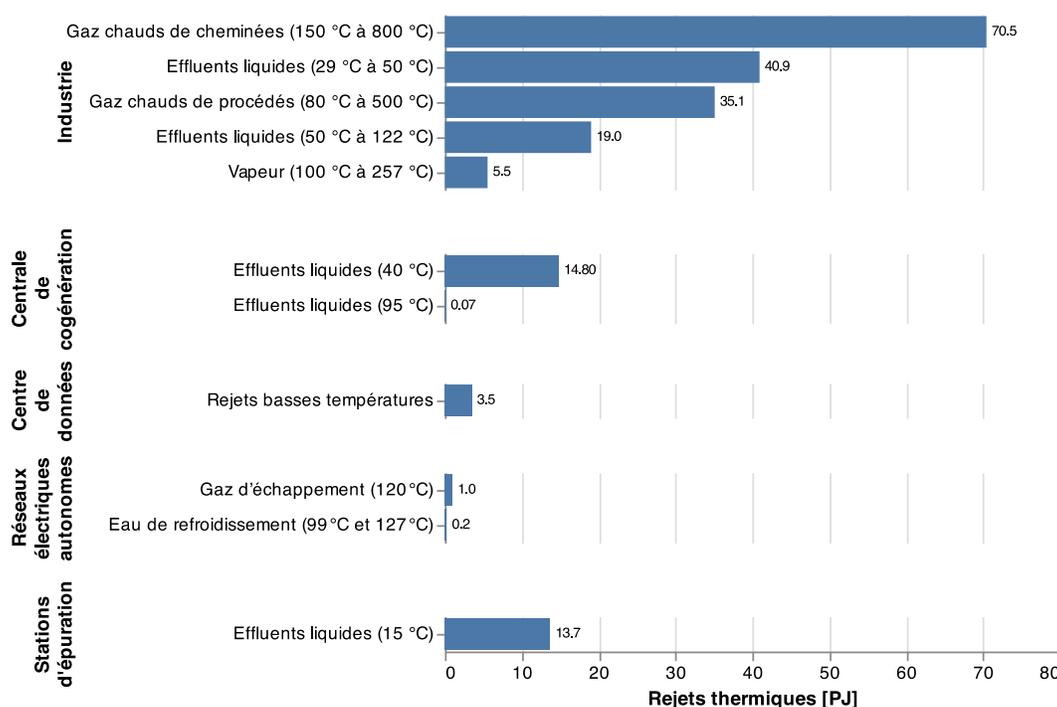


Figure 17: Graphique présentant la quantité de rejets thermiques pour chacune des catégories étudiées ventilées en fonction des types de rejets

3 Estimation des besoins thermiques

Les besoins thermiques considérés dans cette étude sont ceux des bâtiments des secteurs résidentiel, commercial et institutionnel, ainsi que ceux des serres agricoles.

3.1 Besoins thermiques des bâtiments

3.1.1 Liste géoréférencée des bâtiments du Québec

Le premier objectif de cette phase du projet est d'obtenir une liste géoréférencée des bâtiments à l'échelle de la province. Cette liste devrait au minimum avoir comme propriétés un polygone géoréférencé qui décrit l'empreinte au sol du bâtiment (*building footprint*), sa superficie de plancher totale (aire de l'empreinte au sol \times nombre d'étages) et son utilisation (résidentiel, bureaux, hôpital, etc.). D'autres caractéristiques sont parfois utilisées pour modéliser la performance énergétique des bâtiments à l'échelle urbaine, telles que l'année de construction ou la fraction vitrée des façades, mais ces propriétés n'ont pas été considérées dans cette étude.

3.1.1.1 Source de données disponibles

La modélisation des bâtiments à l'échelle urbaine ou à l'échelle d'une province est une discipline relativement récente, et la collecte d'informations géoréférencée sur les bâtiments nécessite de combiner différentes sources de données pas toujours cohérentes.

La nature géospatiale des informations consiste en des coordonnées correspondant à des points (par exemple une adresse), des lignes (par exemple une route) ou des polygones (par exemple la surface projetée sur le sol d'un bâtiment, ou les limites d'une zone cadastrale). Ces coordonnées sont données sous forme de longitude et latitude, ou sous formes « x, y » dans un Système de Coordonnées de Référence (SCR) correspondant à une projection de la surface terrestre sur un plan. Le point, la ligne ou le polygone sont ensuite associés à des propriétés, par exemple le nombre d'étages d'un bâtiment.

La base de données Géoindex (Université Laval et Bureau de Coopération Interuniversitaire, 2021) est un bon exemple d'effort de centralisation des données des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) qui reprend par exemple les données routières et cadastrales, ainsi que de nombreux jeux de données publics. Cette base de données a représenté une des sources principales pour ce projet. En particulier, deux couches d'informations relatives au rôle foncier provenant du Ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation (MAMH) ont été utilisées : l'une prenant une forme ponctuelle et nous informant du nombre d'étages et du lien physique des bâtiments, l'autre se présentant sous forme de polygone cadastral et nous indiquant les usages principaux et la superficie liés à chaque propriété.

Pour estimer la localisation et la superficie d'un grand nombre de bâtiments, on utilise en général la projection au sol des bâtiments (empreinte au sol, *building footprint*). Plusieurs sources de données

ouvertes ont été développées à l'échelle du Canada ou du Québec. La Base de données ouvertes sur les immeubles développée par Statistiques Canada (Statistique Canada, 2018) combine un ensemble de jeux de données publiés par des municipalités. Elle comprend quelque 4.4 millions de bâtiments pour le Canada, dont un peu moins de 453000 au Québec. Cette base de données a été utilisée par Microsoft pour entraîner des techniques de traitement des images aériennes, ce qui a ensuite permis d'obtenir une base de données beaucoup plus complète, « *Canadian Building Footprints* » (Microsoft, 2019). Cette base de données comprend quelque 2.5 millions d'empreintes de bâtiments pour le Québec, et est donc beaucoup plus complète que la compilation des données ouvertes faite par Statistiques Canada. C'est cette base de données ouvertes de Microsoft qui a été utilisée dans notre étude.

3.1.1.2 Croisement des sources de données

La première étape a été d'opérer un nettoyage dans les bases de données utilisées pour réduire les sources d'erreur et alléger le traitement des données. Pour la couche des empreintes au sol des bâtiments, toutes les surfaces représentant moins de 50 m² ont ainsi été retirées, pour éliminer les cabanons et autres petites constructions non-pertinentes (ou surfaces reconnues erronément comme des constructions). Le seuil de 50 m² a été choisi en se basant sur les superficies minimales permises par les divers codes de la construction et en observant les empreintes retirées de la base de données. Dans la même optique, sur les couches du rôle foncier, les usages dont on ne peut estimer les besoins ont été retirés, par exemple les stationnements, les bâtiments désuets, les routes, etc.

Une fois les données nettoyées, l'information des différentes couches de données a été croisée en transférant l'information des points du rôle foncier vers les polygones cadastraux, et puis en découpant les polygones représentant les terrains des propriétés en suivant la superficie des empreintes au sol (voir Figure 18).



Figure 18 : Cadastres (brun) et empreintes au sol (gris). Les propriétés des relevés cadastraux ont été transférés aux bâtiments en associant les surfaces brunes aux surfaces grises par découpage.

Ce processus a résulté en une couche unique de polygones comportant la superficie de plancher totale des bâtiments (aire de l’empreinte × nombre d’étages) et leur utilisation. Une simplification importante a été utilisée, consistant à ne garder que l’utilisation principale dans le cas de bâtiments associés à plusieurs types d’utilisation. Les types d’usage conservés correspondent à ceux pour lesquels une estimation des besoins en chaleur étaient disponibles (voir plus loin). Le résultat est illustré à la Figure 19.

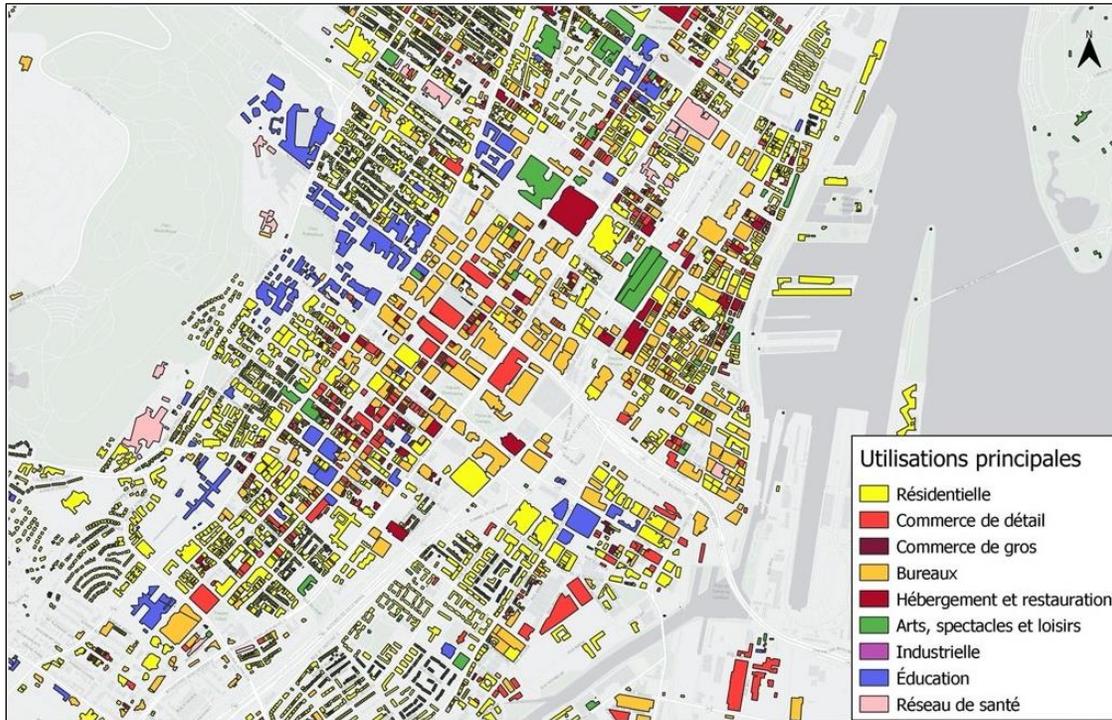


Figure 19 : Empreintes au sol et l'utilisation qui leur a été attribuée. On remarque qu'un seul type d'utilisation a été conservé pour chaque empreinte, et que les bâtiments du secteur commercial et institutionnel sont classifiés par sous-catégories (par exemple commerce de détail, bureaux, etc.)

3.1.2 Estimation des besoins en chaleur des bâtiments

Les besoins en chaleur pour le chauffage des locaux et pour le chauffage de l’eau ont été estimés à partir des données de la Base de données Nationale sur la Consommation d’Énergie (BNCE), plus précisément à partir des tableaux fournis dans la base de données complète sur la consommation d’énergie (*Comprehensive Energy Use Database, CEUD*) publiée par Ressources Naturelles Canada (2021). Cette base de données fournit la consommation énergétique associée aux différents usages finaux, dont le chauffage des locaux et le chauffage de l’eau chaude pour l’ensemble des bâtiments d’un certain type, ainsi que la superficie de plancher totale, et il est donc possible de calculer l’intensité énergétique en GJ/m² par type usage. Pour cette estimation des besoins thermiques des bâtiments, la valeur moyenne des années 2014 à 2018 a été considérée, afin de réduire l’impact des variations climatiques tout en gardant une estimation

relativement récente du stock de bâtiments. Les valeurs d'intensité énergétiques utilisées sont données au Tableau 5.

Tableau 5 : Intensité Énergétique pour le chauffage des locaux et l'eau chaude pour les différents types de bâtiments d'après l'édition 2018 de la BNCE. Les valeurs d'intensité sont moyennées sur les années 2014 à 2018, la superficie de plancher est celle de 2018.

	Chauffage des locaux [GJ/m ²]	Chauffage de l'eau [GJ/m ²]	Total [GJ/m ²]	Superficie [10 ⁶ m ²]
Secteur Résidentiel				
Maisons individuelles	0,652	0,107	0,760	251,56
Maisons individuelles attenantes	0,432	0,118	0,550	41,74
Appartements	0,374	0,104	0,478	178,64
Maisons mobiles	1,019	0,074	1,093	4,23
Secteur résidentiel (total)	0,532	0,107	0,639	476,17
Secteur Commercial et Institutionnel				
Commerce de Gros	0,653	0,077	0,730	8,09
Commerce de détail	0,701	0,085	0,785	21,93
Entreposage et transport	0,575	0,068	0,643	5,68
Ind. de l'information et culturelle	0,964	0,116	1,080	2,81
Bureaux	0,587	0,042	0,629	58,90
Services d'enseignement	0,694	0,095	0,789	20,31
Services de santé et assistance sociale	1,190	0,305	1,494	13,42
Arts, spectacles et loisirs	0,823	0,103	0,925	3,83
Hébergements et restauration	1,118	0,139	1,257	7,55
Secteur C&I (total)	0,720	0,091	0,811	144,57

Les valeurs fournies correspondent à la consommation énergétique, et doivent donc être multipliées par le rendement moyen pour obtenir les besoins thermiques. Les données de la BNCE pour l'année 2018 ont été utilisées pour estimer ces rendements moyens, en supposant des rendements de 100 % pour les systèmes électriques, 80 % pour les systèmes au gaz naturel, 70 % pour les systèmes au mazout, et 50 % pour les systèmes au bois.

On obtient alors, dans le secteur résidentiel, un rendement moyen de 80 % pour le chauffage des locaux et un rendement moyen de 96 % pour l'eau chaude. Pour le secteur commercial et institutionnel, un rendement moyen de 85 % est utilisé pour le chauffage des locaux et pour l'eau chaude. Ces rendements sont appliqués aux intensités énergétiques données dans le Tableau 5. Par exemple, les besoins

thermiques totaux (chauffage des locaux et eau chaude) pour le secteur résidentiel correspondent à $0.532 \text{ GJ/m}^2\text{-an} \times 80 \% \text{ (chauffage)} + 0.107 \text{ GJ/m}^2\text{-an} \times 96 \% \text{ (eau chaude)} = 0.529 \text{ GJ/m}^2\text{-an}$. Pour le secteur commercial et institutionnel (rendement moyen de 85 %), on obtient des besoins thermiques égaux à $0.689 \text{ GJ/m}^2\text{-an}$ (ils varient de $0.535 \text{ GJ/m}^2\text{-an}$ pour les bureaux à $1.27 \text{ GJ/m}^2\text{-an}$ pour les services de santé et assistance sociale).

En multipliant les besoins de chaleur ainsi obtenus pour chaque type de bâtiment par la superficie de chaque bâtiment identifié au Québec, on obtient alors les besoins en chaleur en GJ/an pour le bâtiment en question et pour chaque utilisation (chauffage et eau chaude).

Pour obtenir une simple estimation de la distribution mensuelle de ces besoins, la partie eau chaude est simplement divisée par 12 (en négligeant la variation saisonnière), et la partie chauffage des locaux est multipliée par un facteur qui représente la fraction des degrés-jours de chauffage annuels correspondant à chaque mois. Ces fractions ont été calculées en utilisant les normales climatiques canadiennes pour la période 1981-2010 (Environnement et Changement climatique Canada, 2021), et en prenant la moyenne entre les stations météo de Montréal, Trois-Rivières, et Québec. Les températures de base utilisées sont 18°C pour le chauffage (degrés-jours en-dessous de 18°C) et de 10°C pour la climatisation (degrés-jours au-dessus de 10°C). Les valeurs des coefficients de pondération utilisés pour chaque mois sont données dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Fraction des besoins de chauffage et des rejets de climatisation pour les mois de l'année

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
Fraction du chauffage	19%	16%	14%	8%	4%	1%	0%	1%	3%	7%	11%	16%
Fraction de la climatisation	0%	0%	0%	1%	9%	21%	29%	26%	12%	2%	0%	0%

Une fois obtenus les besoins en chaleur de chaque bâtiment, on peut calculer la somme des besoins sur une partie donnée du territoire, par exemple une maille de $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$. Ceci peut être exprimé comme une carte matricielle ou une image (*raster map*) telle que celle illustrée à la Figure 20.

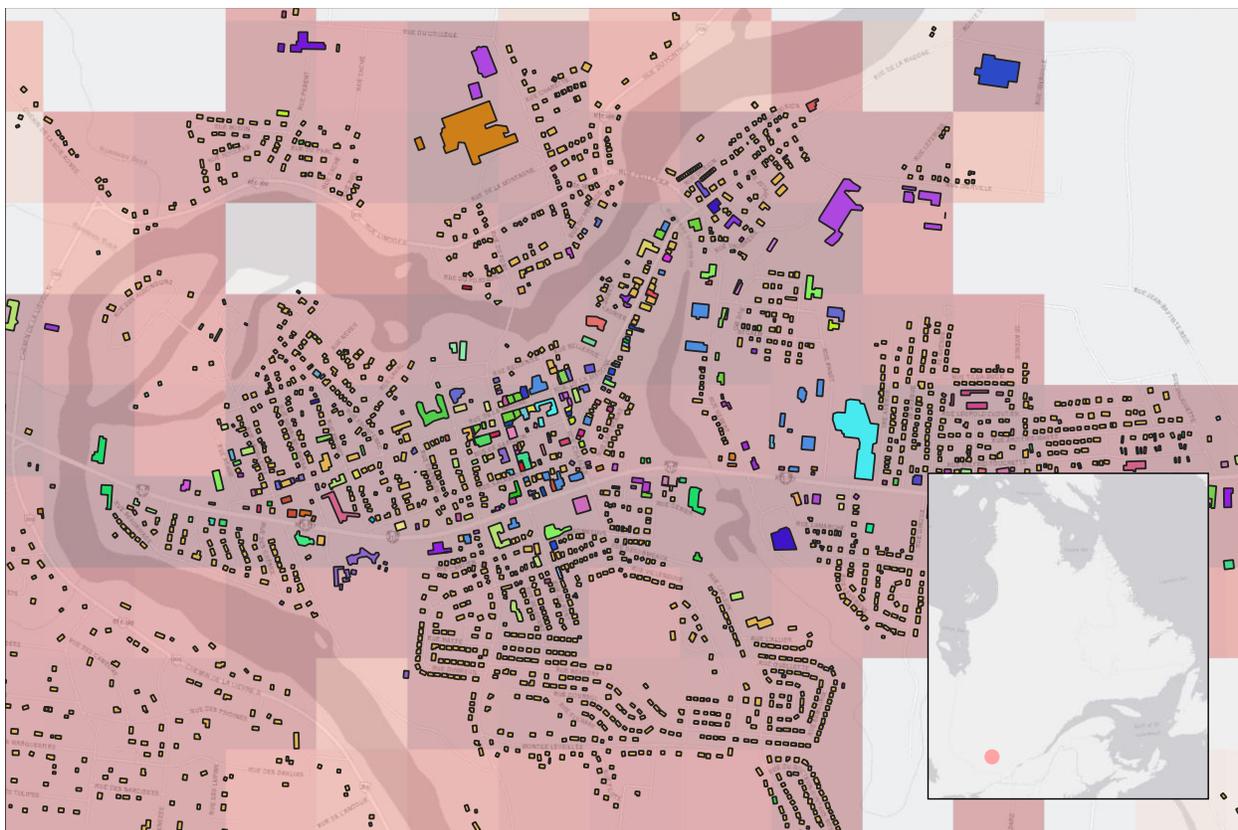


Figure 20 : Exemple de résultat de calcul des besoins en chaleur sur des mailles de 250 m × 250 m pour Mont-Laurier. Le résultat peut être exprimé comme une image dans laquelle chaque pixel représente une maille et est coloré en fonction de l'intensité des besoins (somme des besoins thermiques annuels en GJ sur la maille en question).

3.1.3 Aperçu des résultats

Les résultats de cette phase du travail sont inclus dans la base de données géoréférencée des besoins thermiques des bâtiments. Les différents attributs associés à chaque bâtiment sont décrits en détail dans un document qui l'accompagne, et qui évoluera en même temps que la base de données elle-même.

La base de données reprend environ 618 millions de m² de superficie de plancher, pour des besoins thermiques totaux (chauffage des locaux et chauffage de l'eau) de l'ordre de 355 PJ.

La carte matricielle (*raster map*) correspondant aux besoins sur des mailles de 250 m × 250 m est illustrée à la Figure 21.

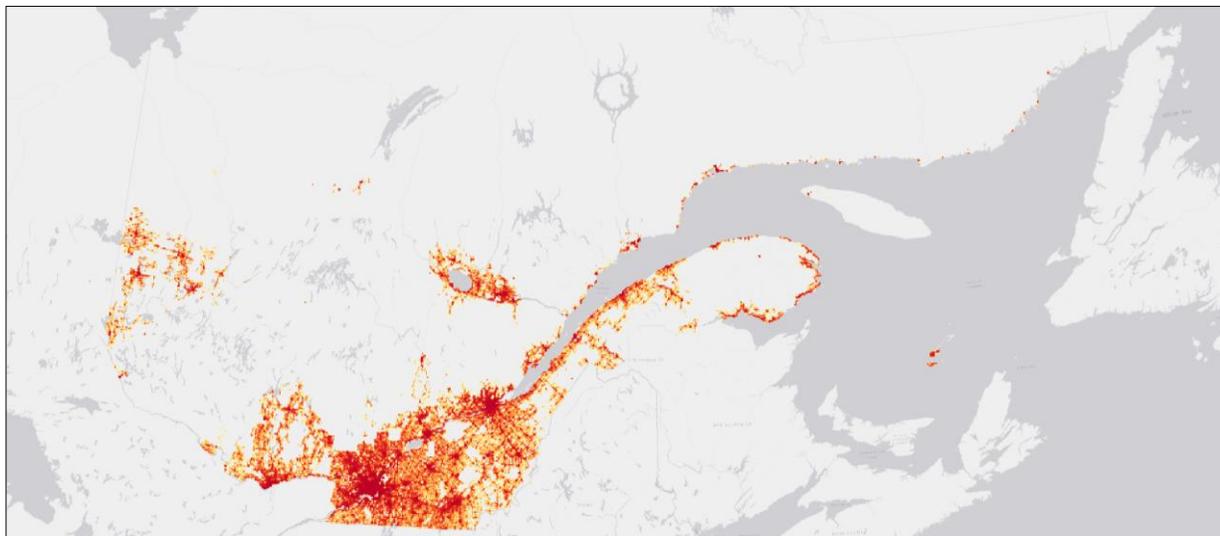


Figure 21 : Représentation des besoins de chaleur annuels des bâtiments en sommant les besoins sur des mailles de 250 m × 250 m. Chaque maille est colorée en fonction des besoins de chaleurs totaux sur la zone représentée, ce qui est équivalent à une représentation de la densité des besoins en GJ/m² avec un facteur d'échelle approprié.

3.2 Besoins thermiques des serres

3.2.1 Liste géoréférencée des serres du Québec

Comme pour les bâtiments, le premier objectif de cette phase du projet est d'obtenir une liste géoréférencée des serres à l'échelle de la province. Cette liste devrait au minimum avoir comme propriétés un point géoréférencé (coordonnées de longitude et latitude correspondant à un complexe de serres), une superficie totale (aire de toutes les serres faisant partie du complexe), et un type d'utilisation (par exemple serre maraîchère ou pépinière).

Statistique Canada présente plusieurs tableaux utiles pour le recensement des serres, tels que les tableaux 32-10-0018-01 (Statistique Canada, 2021a), 32-10-0019-01 (Statistique Canada, 2021b) et 32-10-0456-01 (Statistique Canada, 2021c). Pour les légumes en serres, un bon aperçu est également donné dans un document résumé (Statistique Canada, 2020a).

Selon ces données de Statistique Canada, il y avait en 2020 quelque 825 serres au Québec, pour une superficie totale de $2.647 \cdot 10^6$ m² (265 ha, ou 28.5 millions de pi²). On peut séparer les serres en deux grands groupes, les serres maraîchères et les serres ornementales, qui représentent chacun approximativement la moitié de la superficie totale (respectivement 1 274 804 m² et 1 239 323 m²). Cela représente une évolution importante au cours de la dernière décennie, puisque les serres maraîchères représentaient environ un tiers de la superficie totale en 2010 (SPSQ, 2013).

L'industrie des serres au Québec est caractérisée par un grand nombre de relativement petites serres (moins de 5000 m² ou 0.5 ha) et un petit nombre de très grandes serres (plus de 0.5 ha, mais souvent de plusieurs ha, les plus grands complexes atteignant des dizaines d'hectares).

Les plus grands producteurs sont facilement identifiables et ont pu être recensés manuellement. Ensuite, une liste contenant les noms et adresses des membres a été obtenue du Syndicat des Producteurs en Serres du Québec. Cette liste est confidentielle, mais les adresses ont été géocodées et anonymisées. La liste ne contenait pas les superficies, donc celles-ci ont été estimées par une mesure sur la base des images satellites (Google, 2021) à l'aide du logiciel QGIS (QGIS Development Team, 2021).

3.2.2 Estimation des besoins en chaleur des serres

Une récente étude réalisée par Bouthillette Parizeau et Associés pour Hydro-Québec présente des besoins thermiques de 1,48 GJ/m²-an pour une serre en polyéthylène double et de 1,84 GJ/m²-an pour une serre en vitrage simple (Bouthillette Parizeau, 2021). Ces besoins sont les quantités de chaleur nettes à fournir pour le chauffage de l'air de la serre, la fonte de la neige en toiture, et le chauffage de l'eau d'irrigation.

D'un autre côté, une étude de 2015 de Gobeil Dion & Associés sur l'électrification du chauffage des serres présente des consommations énergétiques pour le chauffage entre 2,3 et 3,1 GJ/m²-an pour des serres avec ou sans écrans thermiques – la nature du vitrage n'est pas spécifiée (Gobeil Dion & Associés, 2015). Cette dernière étude présente des rendements de production de chaleur de 80 % à 90 % selon le combustible, ce qui donnerait des besoins en chaleur nets de 1,8 à 2,8 GJ/m²-an.

La différence entre ces deux estimations peut être attribuée en partie aux pertes thermiques du réseau de distribution (les chaudières sont souvent dans un bâtiment séparé des serres) et aux pertes thermiques des réservoirs de stockage qui sont souvent associés aux serres. En supposant que ces pertes représentent 20 % de la chaleur fournie par les chaudières, on obtiendrait des besoins nets pour la serre entre 1,5 et 2,2 GJ/m²-an.

Un système de valorisation des rejets thermiques devrait fournir les besoins nets de chauffage d'une serre mais aussi compenser les pertes thermiques de distribution et (le cas échéant) d'un stockage thermique. Il a donc été choisi d'estimer les besoins en chaleur annuels des serres à 2 GJ/m²-an.

Il est important de noter que selon Statistique Canada, les serres au Québec sont en moyenne en opération pour 7,7 mois par an (Statistique Canada, 2021a). Cependant, il est vraisemblable qu'une serre bénéficiant de la valorisation de rejets thermiques serait opérée 12 mois par an. Pour approximer une distribution mensuelle des besoins de chaleur, il est possible de pondérer les besoins annuels par la fraction de degrés-jours de chauffage correspondant à chaque mois, comme c'était le cas pour les bâtiments.

3.2.3 Aperçu des résultats

La Figure 22 montre les serres présentes dans la base de données. Au total, quelque 350 serres sont représentées, pour une superficie totale approchant 2,1 millions de m² (210 ha).

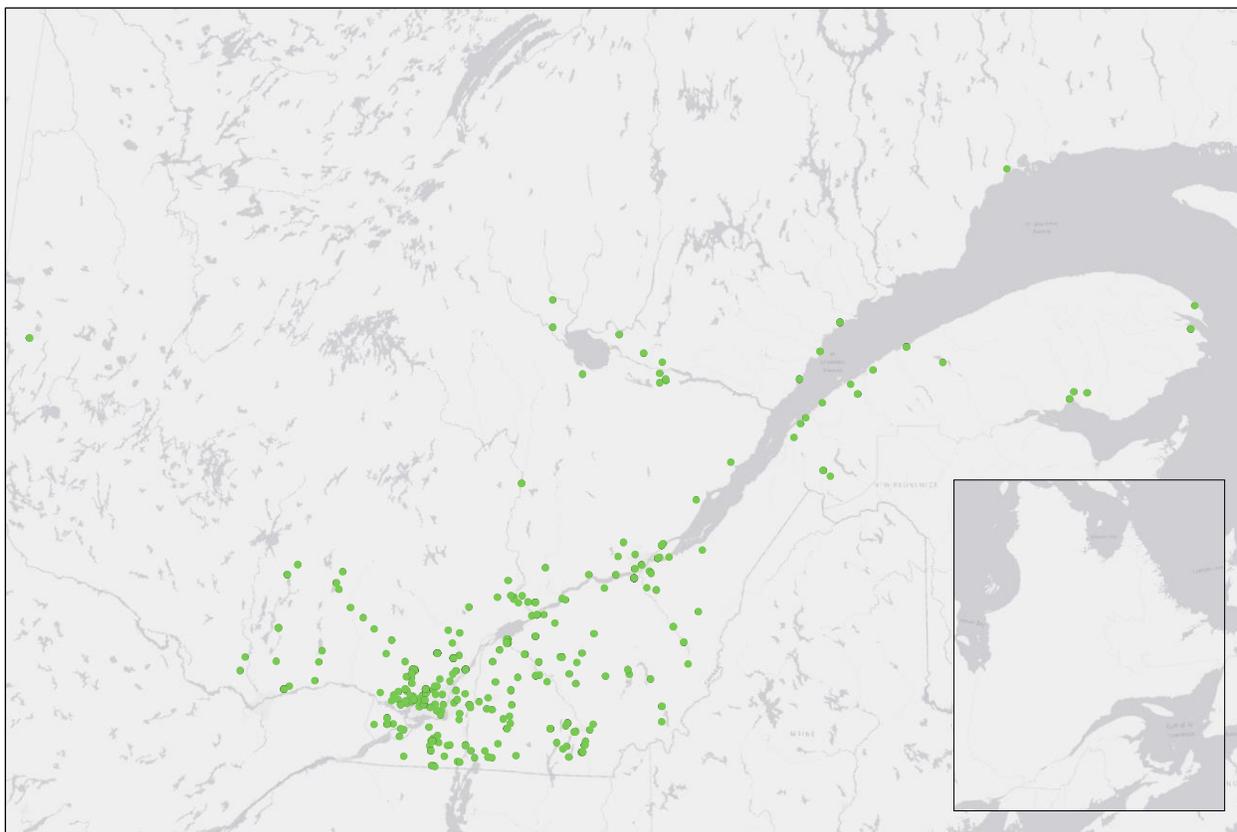


Figure 22 : Serres reprises dans la base de données. Chaque point vert représente une serre, indépendamment de sa taille. Il y a quelque 350 serres au total dans la base de données.

Les besoins thermiques correspondant aux serres recensées, en utilisant le simple facteur de $2 \text{ GJ/m}^2\text{-an}$, correspondent à 4,3 PJ.

3.3 Vérification et évolution de la base de données

3.3.1 Recensement des bâtiments

Le Tableau 7 montre les superficies de plancher pour les différents types de bâtiments repris dans la base de données et les compare aux superficies de la base de données complète sur la consommation d'énergie 2018 (Ressources naturelles Canada, 2021). La superficie totale des bâtiments est bien estimée, avec une différence inférieure à 1 %, et la répartition entre bâtiments résidentiels d'un côté et commerciaux et institutionnels d'un autre côté est raisonnablement approximée (+11 % pour le commercial et institutionnel, -4 % pour le résidentiel). Par contre, il y a de larges différences dans certains sous-secteurs. Certains usages des données foncières ont été difficile à réconcilier avec les catégories de la BNCE, et les bâtiments à usages multiples ont été traités de manière simplifiée (seul l'usage principal a été conservé). Ceci explique probablement les plus grandes différences constatées.

Tableau 7 : Superficie de plancher des différentes catégories de bâtiments d'après l'édition 2018 de la BNCE et superficie des bâtiments représentés dans la base de données des besoins thermiques. Le secteur résidentiel n'a pas été séparé en sous-catégories dans la base de données..

	Superficie de plancher		Différence [%]
	BNCE 2018 [10 ⁶ m ²]	Base de données [10 ⁶ m ²]	
Secteur résidentiel			
Maisons individuelles	251,6	-	-
Maisons individuelles attenantes	41,7	-	-
Appartements	178,6	-	-
Maisons mobiles	4,2	-	-
Secteur résidentiel (total)	476,2	461,8	-3 %
Secteur commercial & institutionnel			
Commerce de Gros	8,1	26,6	229%
Commerce de détail	21,9	26,6	21%
Entreposage et transport	5,7	12,0	110%
Ind, de l'information et culturelle	2,8	1,9	-33%
Bureaux	58,9	39,9	-32%
Services d'enseignement	20,3	32,8	61%
Services de santé et assistance sociale	13,4	9,9	-26%
Arts, spectacles et loisirs	3,8	3,8	-1%
Hébergements et restauration	7,6	6,7	-11%
Secteur C&I (total)	144,6	160,1	11%
Secteur des bâtiments			
Bâtiments (total)	620,7	621,9	0,2%

3.3.2 Besoins thermiques des bâtiments

Tel que décrit dans le paragraphe 3.1.2 ci-dessus, les besoins thermiques des bâtiments ont été estimés à partir de la base de données complète sur la consommation d'énergie 2018 (Ressources naturelles Canada, 2021) en moyennant les intensités énergétiques de 2014 à 2018. En appliquant les rendements moyens décrits dans ce même paragraphe, et en considérant les superficies de plancher de 2018, on peut estimer

des besoins en chaleur totaux pour le Québec de 100 PJ pour le secteur commercial et institutionnel et de 250 PJ pour le secteur résidentiel, soit 350 PJ au total. Pour rappel, ce résultat ne représente pas l'énergie consacrée au chauffage des locaux et au chauffage de l'eau en raison des rendements de conversion – l'énergie totale (chauffage et eau chaude) représente plutôt 420 PJ.

Il peut être intéressant de comparer ces estimations globales à celles de l'État de l'Énergie au Québec publié par la Chaire de gestion du secteur de l'énergie HEC Montréal (Whitmore & Pineau, 2021). Selon ce document, le bilan énergétique du Québec pour 2018 inclut une consommation énergétique de 338 PJ pour le secteur résidentiel et 263 PJ pour le secteur commercial et institutionnel. Il faut d'abord noter que ces chiffres ne correspondent pas parfaitement aux données de Ressource Naturelles Canada, puisque l'édition la plus récente de la base de données donne plutôt 378 PJ pour le résidentiel et 232 PJ pour le secteur commercial et institutionnel. La répartition des utilisations finales donnée par l'État de l'énergie permet de calculer que le chauffage des locaux et de l'eau chaude représentent environ 270 PJ pour le résidentiel et 140 PJ pour le commercial et institutionnel (en termes d'énergie), soit 410 PJ au total, ce qui correspond pratiquement aux données de la BNCE – les différences entre secteurs s'annulent donc entre ces deux sources de données.

L'État de l'énergie ne donne pas d'estimation des besoins thermiques, mais il mentionne les pertes d'énergie des bâtiments, qui sont environ de 70 PJ pour le secteur résidentiel et de 80 PJ pour le secteur commercial et institutionnel. La définition de ces « pertes » n'est pas détaillée dans le document, et elles ne concernent pas uniquement le chauffage des locaux et de l'eau chaude. De plus, les pertes de distribution de chaleur dans un bâtiment ne doivent pas être soustraites des besoins thermiques, puisqu'elles resteraient présentes si on remplaçait une chaudière par un échangeur de chaleur de récupération. Il est donc difficile d'estimer précisément les besoins thermiques du secteur du bâtiment à partir des données de l'État de l'énergie au Québec.

Le Tableau 8 montre les besoins thermiques estimés pour les bâtiments repris dans la base de données des besoins thermiques et les compare aux valeurs de la BNCE. Il est important de noter que dans les deux cas, les besoins sont calculés en multipliant une valeur en GJ/m² par la superficie, et que les valeurs de GJ/m² sont les mêmes dans les deux cas. Les différences viennent donc uniquement des différences de surface estimées, mais elles ne sont pas exactement égales aux différences du Tableau 7 en raison des intensités très différentes entre les secteurs. Au total, l'estimation semble acceptable, même si les grandes différences dans certains sous-secteurs mériteraient un raffinement de la base de données dans une version ultérieure.

Tableau 8 : Besoins thermiques estimés des différentes catégories de bâtiments d'après l'édition 2018 de la BNCE et besoins thermiques des bâtiments représentés dans la base de données des besoins thermiques. Les besoins thermiques unitaires par superficie de plancher sont identiques dans les deux estimations et proviennent des moyennes des intensités énergétiques entre 2014 et 2018 dans la BNCE.

	BNCE 2018 [PJ]	Base de données [PJ]	Différence [%]
Secteur résidentiel			
Maisons individuelles	157,6	-	-
Maisons individuelles attenantes	19,2	-	-
Appartements	71,4	-	-
Maisons mobiles	3,8	-	-
Secteur résidentiel (total)	252,0	245,3	-3 %
Secteur commercial & institutionnel			
Commerce de Gros	5,0	16,5	229%
Commerce de détail	14,6	17,8	21%
Entreposage et transport	3,1	6,5	110%
Ind, de l'information et culturelle	2,6	1,7	-33%
Bureaux	31,5	21,3	-32%
Services d'enseignement	13,6	22,0	61%
Services de santé et assistance sociale	17,0	12,6	-26%
Arts, spectacles et loisirs	3,0	3,0	-1%
Hébergements et restauration	8,1	7,2	-11%
Secteur C&I (total)	99,7	108,6	9%
Secteur des bâtiments			
Bâtiments (total)	351,6	353,9	1%

3.3.3 Besoins thermiques des serres

Pour les serres, la base de données comporte quelque 350 complexes de serres, ce qui est loin du nombre de 825 renseigné par Statistique Canada, et également loin du nombre total de membres communiqué par le Syndicat des Producteurs en Serres du Québec (SPSQ). Cette différence est principalement due au fait que dans la liste du SPSQ, beaucoup de coordonnées correspondaient à des adresses résidentielles ou commerciales des propriétaires et non à l'adresse de la serre.

Cependant, la superficie totale des serres reprises dans la base de données représente $2.14 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ ou 214 ha, soit 80 % de la superficie mentionnée par Statistique Canada pour 2020. Il est donc probable que les serres manquantes correspondent à de très petites installations. Selon (SPSQ, 2013), 55 % des serres correspondaient d'ailleurs à des superficies de moins de 2000 m^2 en 2010.

Les besoins thermiques des serres sont estimés avec une intensité en besoins thermiques uniforme de 2 GJ/m^2 . Tel qu'expliqué plus haut, cette intensité a été estimée pour des serres chauffées à l'année longue, ce qui n'est pas le cas de toutes les serres au Québec. Il faut donc voir le résultat global des besoins thermiques estimés (4,3 PJ) comme une estimation des besoins des serres existantes qui pourraient être couverts par de la valorisation de rejets thermiques si elles opéraient à l'année longue.

3.3.4 Vérifications ponctuelles et évolution de la base de données

Le Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN) possède une liste des consommations énergétiques pour les bâtiments gérés par la Société Québécoise des Infrastructures : palais de justice, postes de sûreté, bureaux, etc. Une liste semblable est disponible pour les écoles, cégeps et bâtiments du secteur éducatif du Québec. Au total, ce sont plusieurs milliers de bâtiments pour lesquels une estimation des besoins thermiques basée sur des données réelles pourrait être obtenue.

Il serait intéressant de remplacer dans la base de données des besoins thermiques des bâtiments les estimations basées sur la méthodologie décrite en 3.1 par ces estimations basées sur des données réelles. Un défi pour ce faire est d'associer les adresses des bâtiments aux empreintes au sol (*footprints*) dans la base de données, de façon à effectivement remplacer et non dupliquer les informations. Un autre défi est d'interpréter et de valider les données réelles, qui résultent parfois de données partielles (sources d'énergie multiples). Ces deux étapes demandent un travail manuel important, mais cette évolution de la base de données présente un intérêt certain étant donné l'intérêt croissant pour une divulgation (obligatoire ou volontaire) des données de consommation d'énergie des bâtiments.

Afin d'illustrer le processus, un petit nombre de bâtiments ont été traités et leurs besoins thermiques dans la base de données correspondent à des estimations basées sur leur consommation d'énergie mesurée. Des détails sur les codes associés à ces bâtiments sont fournis dans le document d'accompagnement de la base de données.

3.4 Résumé de l'estimation des besoins thermiques

Cette phase du projet visait à obtenir une estimation géoréférencée des besoins thermiques à l'échelle du Québec. Les bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels ont été considérés, ainsi que les serres agricoles. Dans chaque cas, le travail a commencé par un recensement des installations présentes dans la province, pour obtenir une liste géoréférencée des bâtiments et serres avec leur superficie. Ensuite, une estimation simple des besoins en chaleur annuels a été obtenue à partir de données statistiques au niveau provincial. Les besoins annuels ainsi obtenus peuvent être distribués mensuellement de façon approximative en utilisant les degrés-jours de chauffage.

Les besoins thermiques totaux des bâtiments représentent 352 PJ annuellement, ce qui correspond à une consommation d'énergie (en tenant compte des rendements des appareils de chauffage) de 424 PJ. L'estimation est basée sur des intensités énergétiques représentatives de chaque sous-secteur.

Les besoins thermiques totaux estimés pour les serres représentent près de 4,3 PJ, ce qui est relativement faible, mais ce nombre est appelé à augmenter si le Québec atteint sa cible de doubler la superficie de culture en serre pour améliorer l'autonomie alimentaire.

Les bases de données des besoins thermiques (bâtiments et serres) représentent un premier effort pour obtenir une estimation géoréférencée du potentiel de valorisation des rejets thermiques au Québec. Ces bases de données sont appelées à évoluer pour raffiner le recensement des installations et pour remplacer progressivement les estimations des besoins basées sur des intensités statistiques par des données mesurées et des modèles plus raffinés.

4 Évaluation du potentiel de valorisation des rejets thermiques

Les deux premières phases de ce projet ont permis d'obtenir deux bases de données géoréférencées :

- Une évaluation des rejets thermiques valorisables
- Une évaluation des besoins thermiques

La valorisation des rejets thermiques suppose un couplage entre deux acteurs, un émetteur et un récepteur. Son potentiel peut donc être obtenu en croisant les deux bases de données. Pour ce faire, il est nécessaire de réconcilier les aspects géographiques des deux évaluations afin de les mettre en relations. En effet, certaines données sont associées à des points (par exemple les industries), d'autres à des polygones.

4.1 Données de base : rejets et besoins sur un maillage de 250 m × 250 m

Afin de croiser les données, la première étape est de définir un maillage sur lequel sera évalué le potentiel. Dans la version actuelle de la base de données, le maillage choisi est de 250 m par 250 m, ce qui correspond à un peu plus que 50,4 millions de mailles pour le territoire québécois. Au lieu de couches ponctuelles et vectorielles, on aura donc des couches géoréférencées matricielles (*raster map*).

Les données rassemblées sur ces mailles dépendent des objectifs de la comparaison qu'on veut en tirer. Dans ce rapport, on basera le reste de la discussion sur une évaluation des rejets thermiques totaux et des besoins thermiques totaux sur un rayon de 2 km. Cela signifie qu'on créera deux cartes matricielles (*raster maps*). Pour chacune de ces cartes, on place le centre d'un disque de 2 km de rayon au centre de chaque maille, et on associe à la maille en question la somme des besoins (ou des rejets) compris dans le disque. Ce choix pourrait correspondre à une évaluation du potentiel en supposant qu'une distance moyenne de 2 km est acceptable entre un récepteur et un émetteur. Il est important de mentionner que chacune des deux cartes matricielles (*raster maps*) contiennent les informations concernant le profil annuel sur une base mensuelle des besoins thermiques (en fonction des fractions des besoins de chauffage mensuel se trouvant au Tableau 6) et des rejets thermiques (considéré constant tout au long de l'année).

À partir des bases de données originales des rejets et des besoins, on pourrait bien sûr obtenir une infinité de variantes, par exemple en considérant un rayon de 1 km et en ne considérant que les rejets thermiques à haute température, etc. Les couches matricielles fournies comme livrables de ce projet ne sont que des exemples.

4.2 Potentiel actuel de valorisation des rejets thermiques

Une fois précisé un cadre d'évaluation (par exemple en utilisant un rayon d'évaluation donné et en ne conservant qu'un type de rejet donné, ou un type de besoin donné), **le potentiel *actuel* de valorisation des rejets thermiques représente la quantité d'énergie qui peut transiter entre un ou des émetteurs**

dans la zone géographique considérée (le disque de 2 km de rayon dans ce document) et un ou des récepteurs dans cette même zone.

Mathématiquement, cette quantité est le **minimum entre la quantité de rejets thermiques et la quantité de besoins thermiques**. En effet, il est facile de constater que si on dispose de 100 GJ de rejets mais on a des besoins de 10 GJ, le potentiel de valorisation sera de 10 GJ, puisque la chaleur excédentaire sera inutile. De la même manière, si on dispose de rejets de chaleur de 10 GJ et qu'on a des besoins de 100 GJ, le potentiel de valorisation sera à nouveau de 10 GJ puisque le reste des besoins ne pourront pas être comblés par les rejets.

Dans notre cas, où les besoins et rejets thermiques ont un profil annuel sur une base mensuelle, le minimum entre les besoins et rejets est réalisé à chacun des mois pour ensuite les additionner afin d'obtenir le potentiel actuel de valorisation des rejets thermiques annuel.

4.2.1 Illustration : sélection de zones d'intérêt pour développer des réseaux de chauffage

En utilisant une carte matricielle représentant le minimum entre les rejets thermiques totaux et les besoins thermiques totaux sur un disque de 2 km de rayon, on peut identifier les zones dans lesquelles le potentiel de transfert d'énergie basé sur les rejets et besoins actuels est le plus grand.

Les 10 emplacements identifiés comme ayant le plus grand potentiel de transfert thermique du Québec sont montrés à la Figure 23. Le graphique illustré à la Figure 24 présente quant à lui le potentiel de transfert thermique pour ces 10 emplacements. La ville de Gatineau présente le plus grand potentiel de transfert thermique à cause de la très grande proximité de l'usine de papiers des Produits Kruger s.e.c. à une zone urbaine. La Figure 26 présente le profil annuel des besoins et rejets thermique des éléments situés dans la zone circulaire. De ce profil, le potentiel de transfert thermique a pu être calculé à 1,8 PJ.

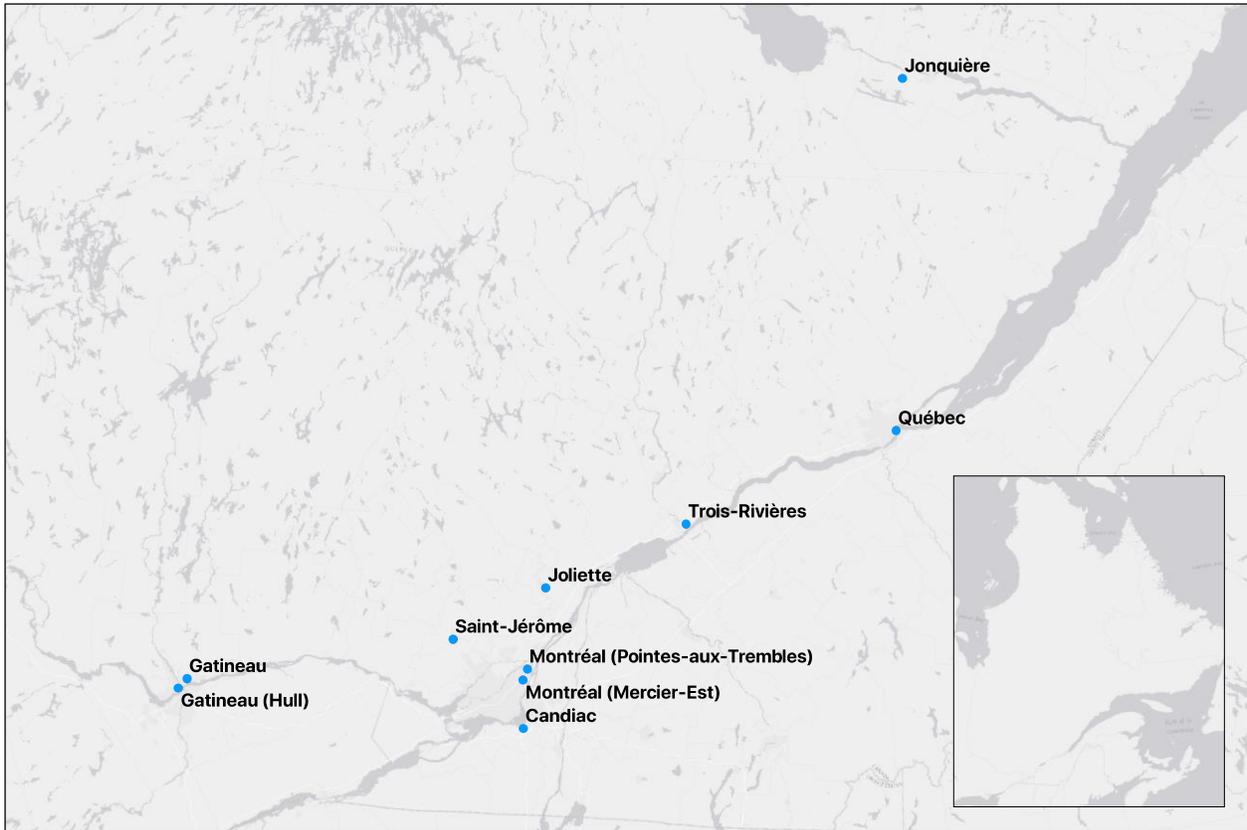


Figure 23 : Les dix emplacements avec le potentiel de transfert thermique le plus élevé du Québec

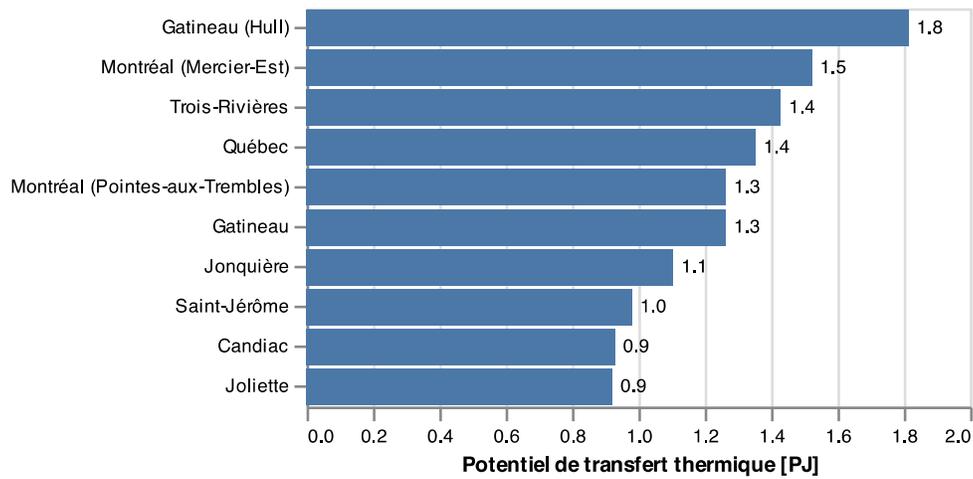


Figure 24 : Graphique présentant les dix emplacements ayant le potentiel de transfert thermique le plus élevés au Québec

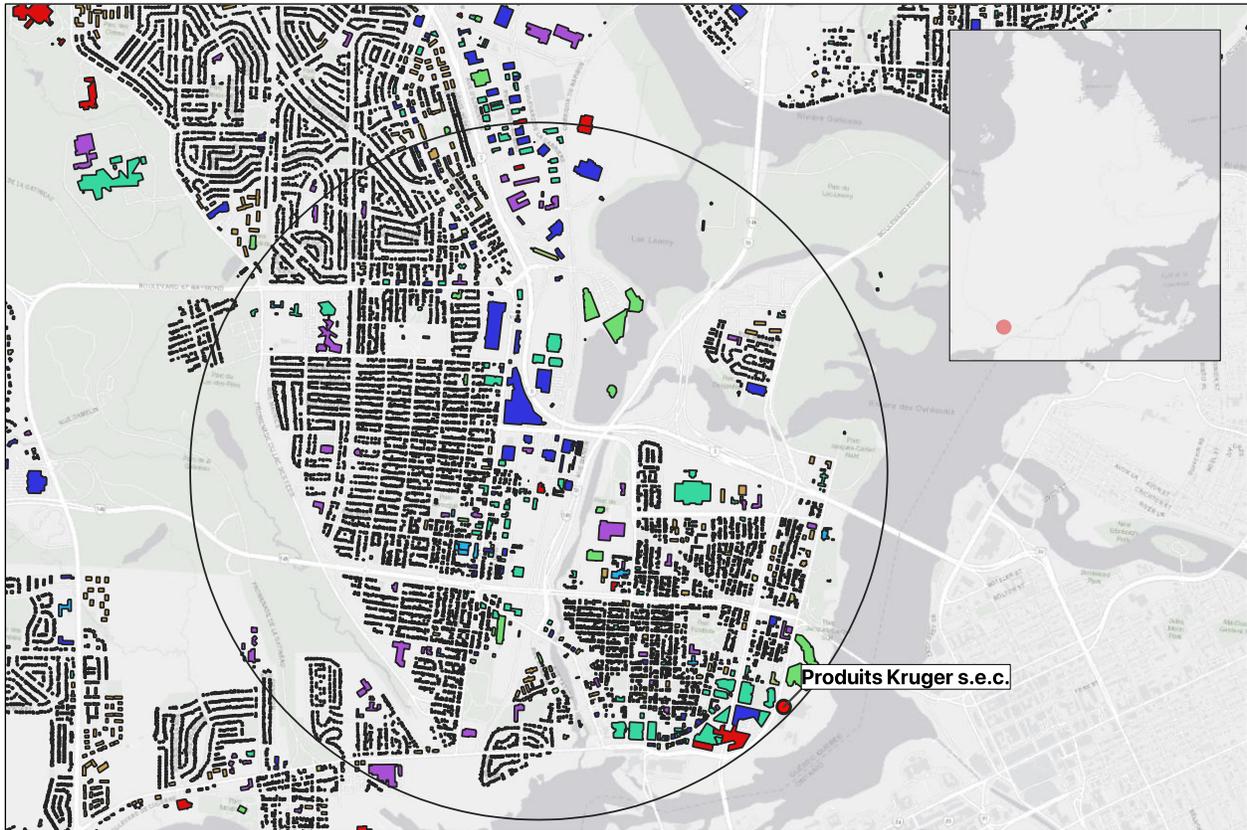


Figure 25 : Carte présentant la zone circulaire de 2 km de rayon lors du calcul du potentiel de transfert thermique situé dans la ville de Gatineau

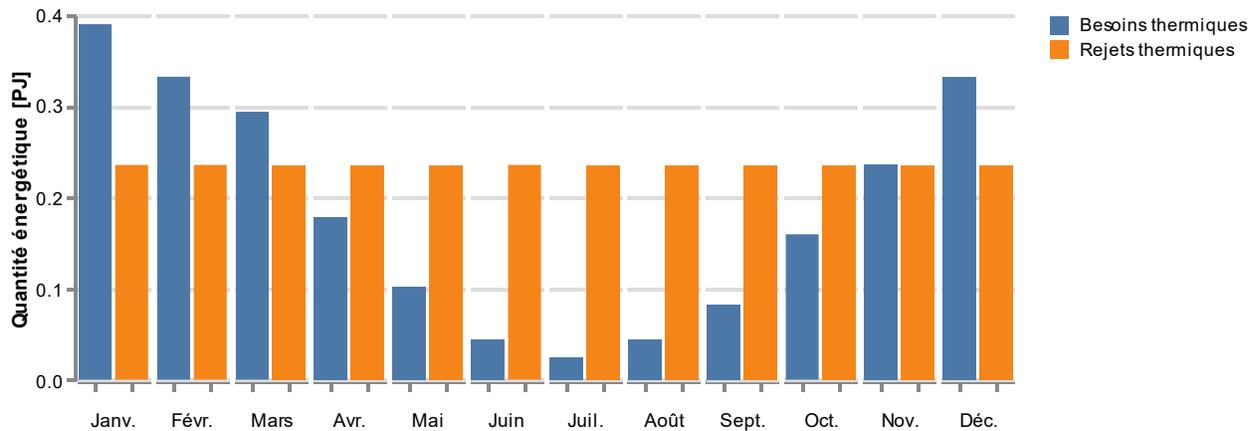


Figure 26 : Graphique présentant le profil annuel des rejets et besoins thermiques situés à l'intérieur de la région circulaire présentée à la Figure 25

Anecdotiquement, l'endroit identifié correspond approximativement à l'emplacement du futur réseau de chaleur du quartier Zibi, qui est décrit dans l'étude de cas #5 (voir la section 5.5.5). Cependant, cet exemple illustre également deux limites de l'évaluation du potentiel actuel de valorisation des rejets thermiques : le réseau Zibi est destiné en grande partie à servir des bâtiments à construire, qui n'apparaissent donc pas

dans les besoins évalués. Et certains des bâtiments desservi sont situés de l'autre côté de la rivière des Outaouais, en Ontario, ils ne sont donc pas présents non plus dans les besoins évalués, même si ces bâtiments existent déjà.

4.3 Potentiel futur de valorisation des rejets thermiques

Une utilisation intéressante des résultats de ce projet consiste à utiliser la valorisation des rejets thermiques comme guide pour l'aménagement du territoire, en favorisant l'implantation d'installations qui augmenteraient les synergies locales, d'un point de vue thermique et économique.

Un exemple serait d'attirer un centre de données informatique pour chauffer des serres existantes, ou encore d'attirer de nouvelles serres pour valoriser un rejet thermique présent et augmenter la rentabilité d'un réseau de chaleur. Ce genre d'étude nécessite le croisement entre les données de rejets et de besoins et d'autres types d'information (par exemple le zonage des terrains) qui sortent du cadre de ce projet, mais les livrables fournis permettront aux acteurs concernés de baser leurs études sur une évaluation quantitative des rejets et besoins existants.

Tel qu'expliqué à la section 4.2, le potentiel actuel de valorisation des rejets thermiques peut être exprimé mathématiquement comme le minimum entre les rejets et les besoins. Le potentiel futur de valorisation, quant à lui, peut être exprimé de trois manières :

- Si on vise à développer des synergies exploitant les rejets actuels en installant de nouveaux consommateurs de chaleur, on pourra utiliser l'évaluation des rejets thermiques (en ignorant les besoins actuels). Ceci correspondrait par exemple à un cas où on suppose que l'investissement pour valoriser les rejets (par exemple circuit de chauffage à basse température) ne serait rentable que dans le cas de nouvelles installations.
- Si on vise à développer des synergies pour combler partiellement ou totalement les besoins existants (en l'absence de rejets existants, ou en considérant que l'investissement nécessaire pour valoriser les rejets existant est trop important pour être rentable), on pourra utiliser l'évaluation des besoins thermiques (en ignorant les rejets actuels).
- Enfin, si on vise à développer des synergies pour maximiser la valorisation des rejets thermiques dans une zone donnée, en maximisant le potentiel actuel et en valorisant le potentiel futur, on pourra utiliser **la différence entre les rejets et les besoins**. Si cette différence est positive, on pourra attirer des consommateurs de chaleur et ainsi maximiser la rentabilité d'un réseau de chaleur qui connecterait les rejets et besoins actuels ainsi que les nouvelles installations consommatrices de chaleur. À l'opposé, si la différence est négative, on pourra attirer des émetteurs de chaleur pour maximiser la rentabilité d'un réseau de chaleur connectant les émetteurs et récepteurs existants et les nouvelles installations émettrices de chaleur.

4.3.1 Illustration : exploitation de rejets existants

À titre d’illustration, la Figure 27 présente une carte des sept emplacements ayant le plus grand potentiel futur de valorisation des rejets thermiques au Québec pour l’exploitation de rejets existants en attirant de nouveaux récepteurs. La Figure 28 présente la quantité de rejets thermiques en PJ pour chacun de ces sept emplacements. Les villes de Montréal, Lévis et Témiscaming représentent les trois emplacements avec le plus de rejets thermiques potentiellement valorisables.

La Figure 29 montre une carte de l’emplacement situé sur le territoire de la ville de Témiscaming où un potentiel de 12,9 PJ de rejets thermiques a été identifié. À cet endroit se trouvent deux centrales de cogénération, une usine de pâte chimique de la compagnie Rayonier Advanced Material ainsi qu’une station d’épuration. La ventilation des rejets thermiques est présentée à la Figure 30 où il peut être constaté que les rejets thermiques les plus importants consistent à 3,4 PJ de gaz chaud de cheminées émises par l’usine de pâte chimique et suivi de peu par les rejets thermiques à basse température des centrales de cogénération représentant 2,8 PJ d’eau chaude à 40 °C.

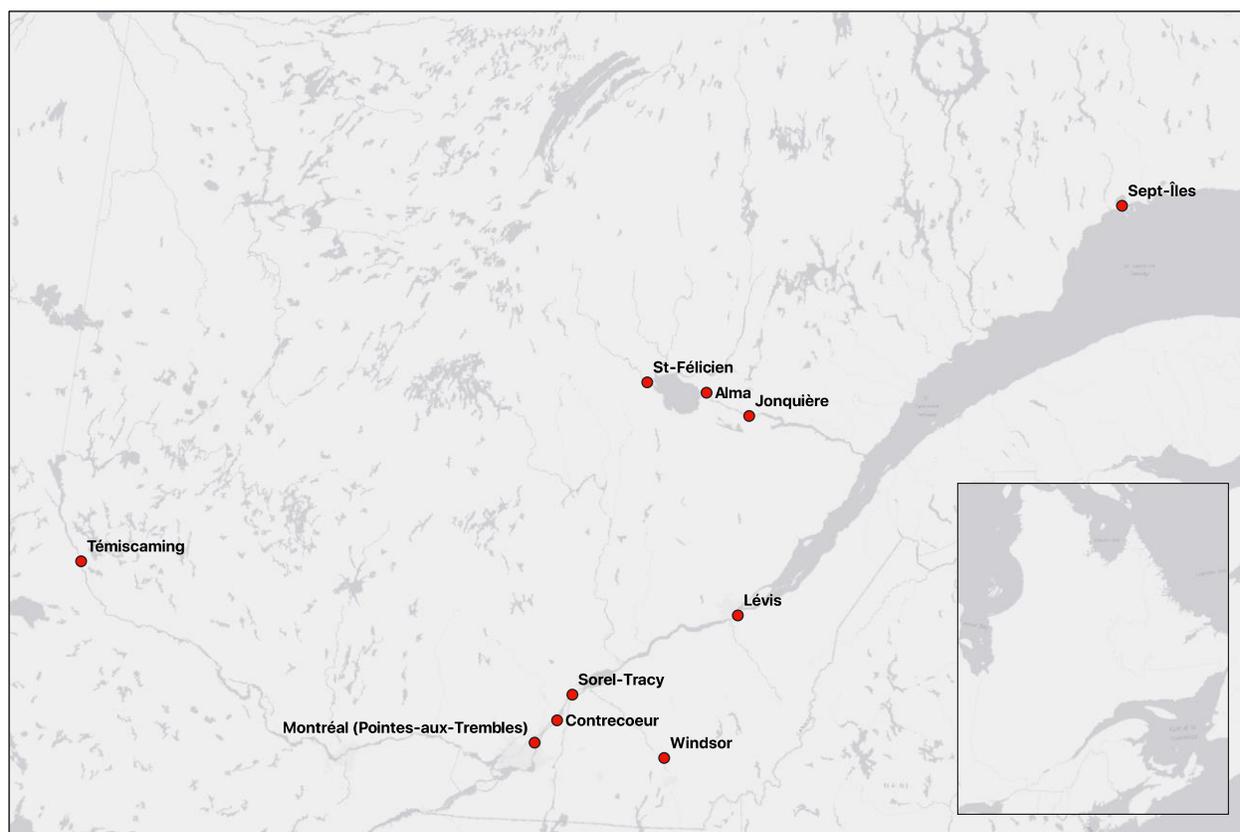


Figure 27 : Les dix emplacements avec le plus grand potentiel de valorisation thermique futur au Québec

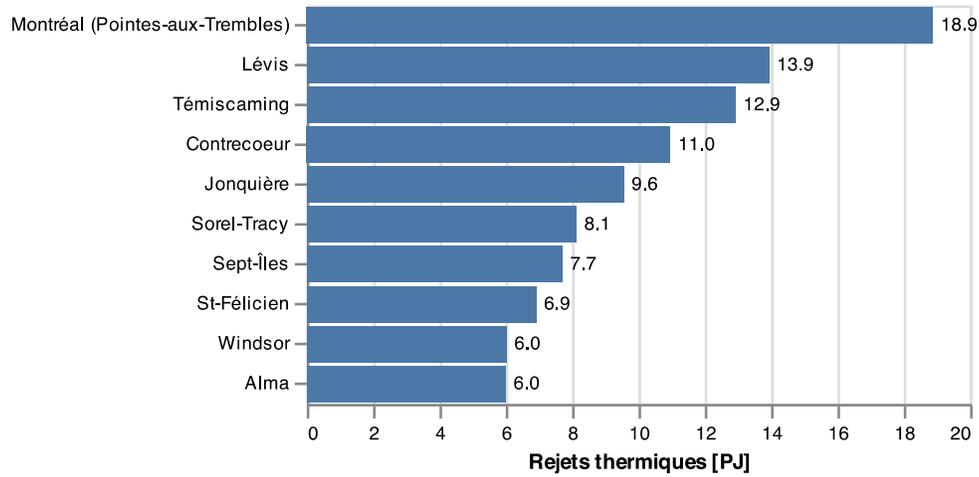


Figure 28 : Graphique présentant les rejets thermiques des dix emplacements ayant le plus grand potentiel de valorisation thermique futur

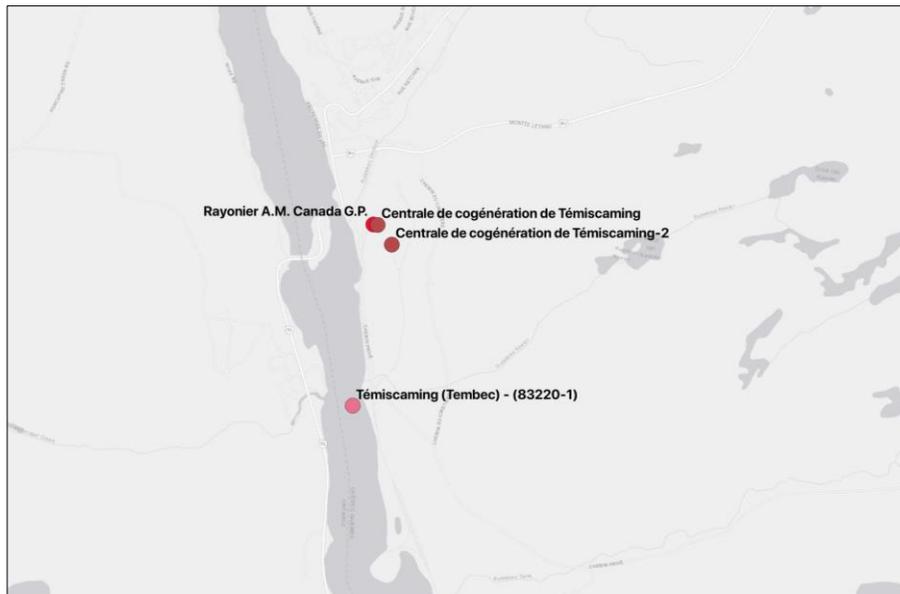


Figure 29 : Carte montrant les sources de rejets thermiques à la ville de Témiscaming

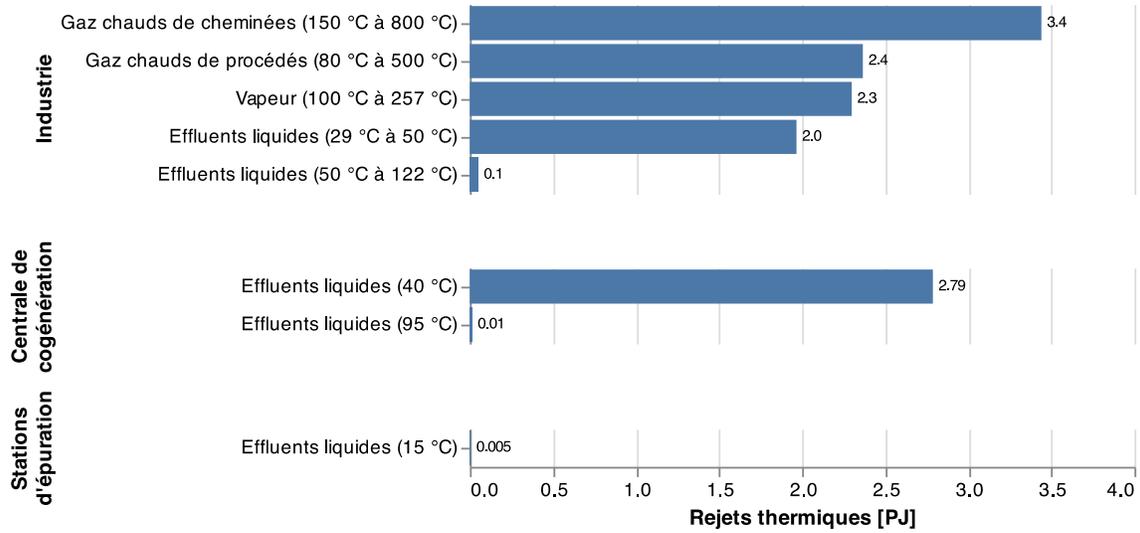


Figure 30 : Graphiques montrant la ventilation des rejets thermiques annuels pour les sources de rejets thermiques à la ville de Témiscaming

Ce simple exemple ne prend pas en compte la temporalité des rejets ni des besoins futurs, mais il illustre néanmoins une possible utilisation des données compilées dans ce projet pour guider l'aménagement du territoire et favoriser les synergies énergétiques, en les croisant avec d'autres types d'informations géoréférencées telles que le zonage des terrains, etc.

5 Études de cas

5.1 Analyse de faisabilité technico-économique

Les analyses de faisabilité facilitent la concrétisation des projets de valorisation énergétique. En effet, ces études permettent de réduire au maximum le risque perçu des projets en permettant la prise initiale de décisions. Dans ce but, le CTTÉI a développé une méthodologie théorique d'analyse de faisabilité (volets technique et économique) dans le cadre de ses projets d'industrialisation de procédés propres. Cette méthodologie est toutefois adaptable à plusieurs activités industrielles, dont la valorisation énergétique. Ce genre d'analyse comporte **la conception du procédé de valorisation et l'estimation des coûts d'investissement (CAPEX) et du solde d'exploitation (OPEX)**.

La **conception du procédé de valorisation énergétique** comprend d'abord la réalisation du schéma de principe qui permet la définition des opérations unitaires nécessaires pour canaliser le fluide caloporteur à la source et l'acheminer au récepteur. Avec le schéma de principe, le CTTÉI effectue ensuite le bilan de matières et énergie en s'appuyant sur les modules de *Prosim Plus*, logiciel de modélisation de procédés¹. En effet, ce logiciel contient des outils de calculs et de bases de données de composants chimiques, modèles thermodynamiques et opérations unitaires pertinents dans l'estimation des charges de procédé. La Figure 31 montre un exemple de schémas de principe élaborés sur Prosim Plus.

¹ *Prosim Plus* est un logiciel de modélisation de procédés conçu par la société française *PROSIM* et dont le CTTÉI détient une licence d'emploi active (<https://www.prosim.net/>).

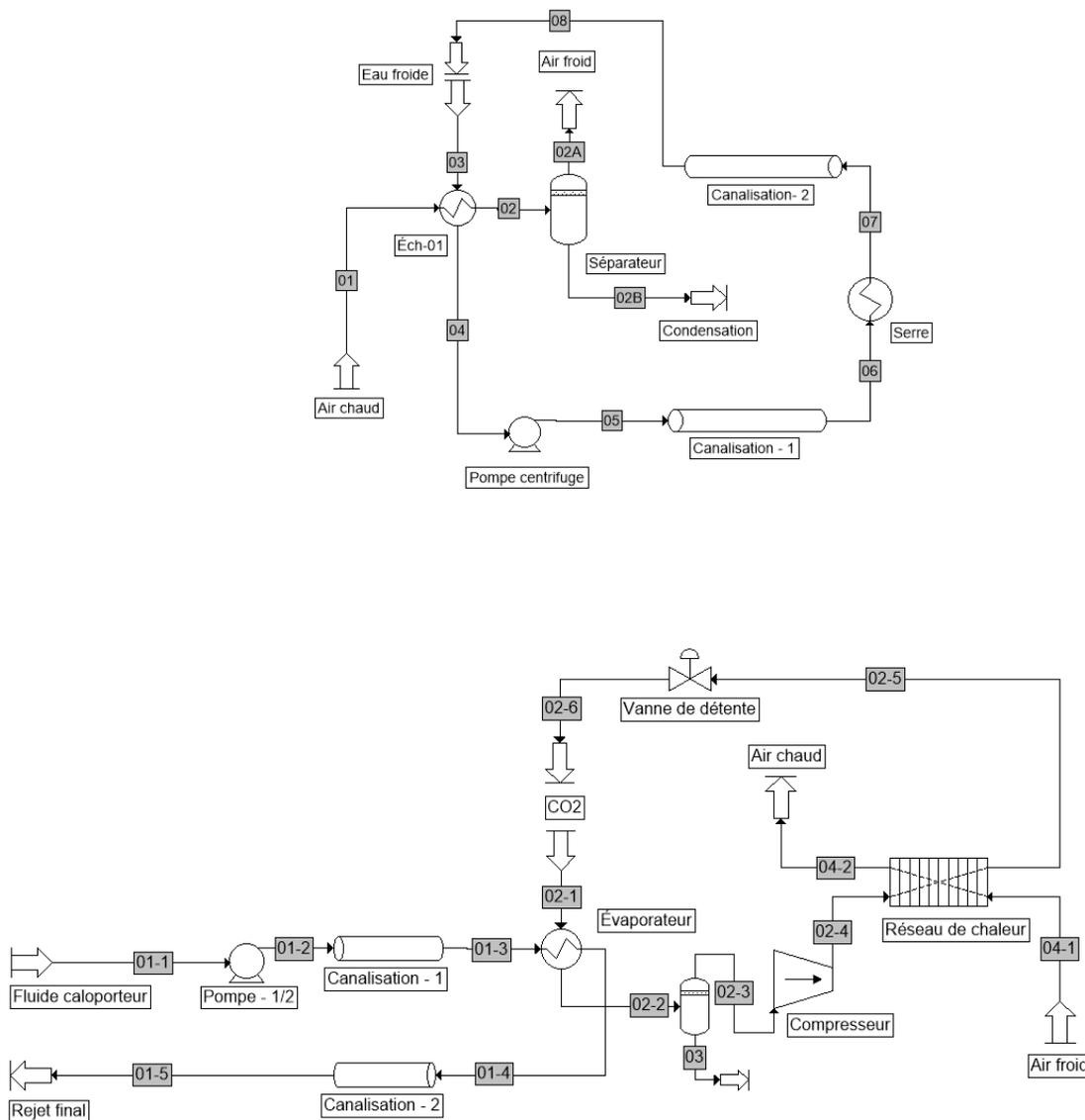


Figure 31 : Exemple de schémas de principe pour la valorisation énergétique sur Prosim Plus

Par ailleurs, la modélisation du procédé sur *Prosim Plus* implique la définition des données d'entrée, comme la température, le débit et l'état physique des fluides, et de paramètres de conception, tels que la spécification de tuyauterie et l'isolation. Pour ce faire, le CTTÉI analyse les informations reçues de la part des participants de chaque cas d'étude. C'est pour cette raison que le MERN et ses collaborateurs ont privilégié les projets où l'information et les intervenants sont accessibles pendant la phase de définition des hypothèses.

L'étude de conception de procédés procure des tableaux et des figures qui décrivent le bilan de matières et énergie. Les principaux résultats sont l'estimation du transfert net d'énergie et des pertes de charge à travers du système, les spécifications des équipements (échangeurs, pompes, compresseurs, tuyauterie,

etc.) et notamment les besoins et économies du procédé. Les besoins du procédé comportent normalement la consommation électrique. Les économies du procédé proviennent du flux d'énergie valorisé et elles sont souvent ramenées en unités volumiques de gaz naturel, de mazout ou d'une autre forme de combustible.

Le volet d'**estimation des coûts d'investissement (CAPEX) et du solde d'exploitation (OPEX)** repose sur les méthodes du *Manuel d'évaluation économique des procédés de l'Institut français du pétrole* (Chauvel & Institut français du pétrole, 2001).

5.2 Méthodologie de calculs

Afin d'estimer des CAPEX grossiers, la référence (Chauvel & Institut français du pétrole, 2001) suggère l'emploi de la méthode de modules fonctionnels basée sur la collecte des données de prix pour réaliser des extrapolations simples ; il suffit normalement des données de débit, de pression et de température pour estimer le prix des modules. Ensuite, cette référence suggère l'ajout de facteurs de correction pour la conception en mesure et l'installation des modules sur site. Par exemple, plusieurs revues de littérature en génie de procédés suggèrent des facteurs pour corriger le prix selon le choix de matériaux, et d'autres pour estimer le montage mécanique et le raccordement électrique. De cette façon, le CTTÉI est en mesure d'estimer les dépenses associées à l'acquisition et au démarrage des équipements avec une incertitude de $\pm 50\%$ raisonnable dans une prévision budgétaire préliminaire. De plus, cette méthodologie est aisément automatisée dans le module d'évaluation économique de *Prosim Plus* pour la plupart des opérations unitaires comprises dans les cas d'étude de ce mandat. Pour les opérations non estimées par le logiciel, le CTTÉI utilise des équations de prix théoriques comme celles inscrites dans la référence (Seider et al., 2017).

En ce qui concerne les OPEX, le CTTÉI réalise ces estimations en croissant le bilan de matières et énergie avec les tarifs en vigueur au Québec, notamment pour les consommations électriques et les économies de gaz naturel (Ramirez, 2019). Par ailleurs, les dépenses associées à l'exploitation et la maintenance des infrastructures sont estimées en fonction des CAPEX théoriques préalablement estimés. De cette manière, le CTTÉI essaie d'approcher dans la mesure du possible le contexte économique particulier du Québec.

Finalement, pour chacun de cinq cas, le rapport final de ce projet résumera les résultats avec ces indicateurs d'implantation industrielle :

- a. Coût économique (\$/kWh produit)
- c. Coût énergétique (kWh requis/kWh produit)
- d. Profit - économies moins dépenses — (\$/kWh produit)

Ces indicateurs de coûts par kWh permettront également de réaliser des calculs rapides pour les scénarios semblables non inclus parmi les cinq cas de ce mandat.

5.3 Hypothèses techno-économiques

L'Annexe B présente les hypothèses techno-économiques utilisées pour effectuer les calculs des 5 cas d'études. Certains éléments sont plus détaillés ci-dessous afin d'avoir une bonne compréhension de leur

origine, soit le tarif d'électricité, les heures d'utilisation et d'opérations, ainsi que les différents types d'aide financière.

5.3.1 Électricité

Depuis juillet 2020, le tarif M préférentiel de ~0,05 \$/kWh est accordé par Hydro-Québec aux projets de valorisation énergétique, plus spécifiquement aux producteurs en serre du Québec. En effet, Hydro-Québec a soumis cette nouvelle option afin d'étendre les modalités d'application à un plus grand nombre de clients serriculteurs. Le tarif M est destiné aux usages avec une puissance maximale inférieure à 5 000 kW (Hydro-Québec, 2020). M. Luc Beaudoin, conseiller en planification commerciale d'Hydro-Québec, a été consulté afin de bien comprendre et confirmer les structures de tarifs.

5.3.2 Heures d'utilisation des rejets thermiques pour le chauffage des serres

La simulation en chauffage et en CO₂ pour un complexe sericole en conditions climatiques locales québécoises effectuée par la firme de consultants Innovagro a permis d'estimer les heures d'utilisation pour la saison froide (INNOVAGRO Consultants, 2018.).

5.3.3 Heures d'opération de procédés industriels

Les rejets thermiques peuvent également être valorisés par leur utilisation pour des unités industrielles, tels que des fours de séchage ou la pasteurisation, compte tenu de leur température et leur pureté. Une estimation de 8 000 heures d'opération de ces procédés est obtenue en considérant 2 semaines de maintenance pour l'usine réceptrice du rejet de chaleur (U.S Department of Energy, 2008).

5.3.4 Aides financières disponibles pour la valorisation de rejets thermiques

5.3.4.1 Appel de propositions : Valorisation de rejets thermiques

Objectif et admissibilité : Il s'agit d'un appui à la transition énergétique des secteurs industriel, commercial, institutionnel, agricole et résidentiel. Ce programme vise à éviter le gaspillage d'énergie en récupérant la chaleur qui autrement serait perdue. Il s'adresse aux organismes sans but lucratif, ministère ou organisme gouvernemental, toute administration ou tout **organisme municipal ou régional**, tout gouvernement ou toute autorité des Premières Nations, Inuit ou Métis.

Aide financière : L'aide financière octroyée par ce programme peut monter à **73 % des dépenses admissibles**, dont 33 % proviennent du gouvernement provincial et 40 % du fédéral. L'appel de propositions prendra fin le 31 décembre 2025 ou jusqu'à l'épuisement des fonds disponibles, soit 275 M\$ (Transition Énergétique Québec, 2021b).

5.3.4.2 ÉcoPerformance

Objectif et admissibilité : Ce programme est offert aux **entreprises, institutions et municipalités** qui consomment des combustibles fossiles ou qui utilisent des procédés générant des émissions fugitives de GES. Il s'adresse autant aux petits qu'aux grands consommateurs d'énergie.

a. Volet analyse

Description : Ce volet permet de déterminer des économies de combustibles fossiles et de réduction d'émission de GES ainsi que les coûts pour les instaurer.

Aide financière : De 50 % à 75 % de dépenses admissibles en fonction du type d'analyse et montant maximal est accordé selon la taille du consommateur (petit, moyen ou grand).

b. Volet implantation standard

Description : Le programme ÉcoPerformance offre un soutien financier aux organisations pour la réalisation de projets d'efficacité énergétique, de réduction des émissions de GES ou de conversion à **des sources d'énergie plus vertes**.

Aide financière : environ 75 % des dépenses sont admissibles ; d'autres critères sont applicables. L'aide financière ne peut dépasser **10 millions \$ par site industriel**, peu importe la taille du consommateur. Les critères de période de rendement de l'investissement (PRI) minimal et maximal sont en fonction de la taille et du type de consommateur. Les catégories de dépenses admissibles comprennent la plupart de postes du CAPEX et frais de personnel durant la mise en marche entre autres.

c. Volet implantation simplifié

Description : Le programme est offert aux entreprises souhaitant **un soutien financier pour des projets simples et rapides à mettre en place**. Trois types de projets visant la réduction de GES admissibles : efficacité énergétique, conversion énergétique, réduction d'émissions fugitives.

Aide financière : L'aide financière maximale pour ce type de projet est de 100 000 \$ par mesure et ne peut dépasser 250 000 \$ par site annuellement. L'aide financière accordée est déterminée selon des critères établis par mesure. Plusieurs secteurs sont visés y compris les **producteurs serricoles**, les producteurs acéricoles, les supermarchés et dépanneurs, les petits commerces, institutions et industries

d. Conditions pour les producteurs serricoles

- Serres déjà en place, agrandissement d'une serre en place ou **nouvelles serres** ;
- Conversion électrique partielle ou totale des systèmes de chauffage au propane, au mazout no 1 ou au mazout no 2 ;
- Être relié au réseau d'Hydro-Québec ou à un réseau municipal ou coopératif ;
- Maintenir la mesure en place et fonctionnelle sur une période d'au moins 10 ans ;
- Consommation énergétique annuelle inférieure à **36 000 GJ**.

e. Grands projets

Aide financière : L'aide financière peut atteindre 40 M\$ pour soutenir l'implantation de grands projets industriels dont les mesures permettent de réduire les émissions de GES sur les sites industriels. Certains critères d'admissibilité sont semblables aux autres volets, soit des projets visant la conversion énergétique (Transition Énergétique Québec, 2021a).

5.3.4.3 PROGRAMME INNOVATION — MEI

Objectif et admissibilité : Le programme a pour objectif d'appuyer les entreprises, en priorité les PME, dans la réalisation de leurs projets d'innovation ainsi que dans la commercialisation de leurs innovations, que les projets soient réalisés au Québec ou avec des partenaires situés à l'étranger. Le projet doit démontrer le degré d'innovation requis et comporter un risque ou une incertitude technologique ou d'affaires pour l'entreprise.

Les clientèles suivantes sont non admissibles pour ce type de financement :

- Sociétés contrôlées par un gouvernement (provincial ou fédéral) ;
- Entités municipales ou entreprises détenues majoritairement par une société d'État ;
- Entreprises en lien avec l'octroi antérieur d'une aide financière du MEI.

Aide financière : De 30 % à 50 % de dépenses sont admissibles avec un montant maximal de 350 000 \$ par projet ajustable selon la taille de compagnie (Investissement Québec, 2021).

5.4 Sélection des cas

Plusieurs entreprises et municipalités ont été contactées directement par l'équipe de travail, soit le CTTÉI, la Polytechnique et le MERN. En date du 18 février 2021, plus de douze cas avaient été répertoriés pour les études d'analyses technico-économiques et ils sont présentés à l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Une sélection finale de cinq cas a été effectuée par une décision commune de l'équipe de travail.

Les critères afin de déterminer les cinq cas d'études d'analyses techno-économiques étaient :

- Nombre de systèmes similaires au Québec ;
- Proximité et faisabilité du coupage émetteur — récepteur ;
- Quantité de chaleur récupérable (GJ à valoriser) ;
- Qualité de la chaleur récupérable (ADEME, 2017) ;
- Diversité des cas (ex. : urbain, municipal, grande industrie, PME)
- Liens d'affaires l'équipe de travail et les compagnies ainsi que leur volonté à participer au projet.

Le Tableau 9 présente les cinq cas d'études techno-économiques sélectionnés pour ce mandat ainsi qu'une synthèse de leurs principales caractéristiques. Les différents cas sont développés dans la section suivante.

Tableau 9 : Tableau synthèse des cinq cas d'étude sélectionnés

<i>Entreprise/Projet</i>	<i>Localisation</i>	<i>Secteur</i>	<i>Provenance du rejet</i>	<i>Type de rejet (Température)</i>	<i>Récepteur potentiel</i>
<i>Cascades</i>	Cabano	Usine de carton	Évacuation des hottes de machine à papier	Fumées chaudes principalement composées d'air (75 °C)	Serres agricoles
<i>Rio Tinto Fer et Titane</i>	Sorel-Tracy	Fonderie de fer	Système de refroidissement des fours de réduction	Eau liquide chaude (38 °C)	Serres agricoles
<i>Centre de biomasse de Saint-Félicien</i>	Saint-Félicien	Municipal	Réseaux de chaleur basse (BT) et haute température (HT)	BT : Eau liquide chaude (40 °C) HT : Eau liquide chaude (95 °C)	Parcs agrothermique et industriel
<i>Xylo-Carbone</i>	Saint-Tite	Fabrication de charbon de bois	Four de pyrolyse	Fumées chaudes principalement composées d'air (446 °C)	Parc industriel
<i>Projet Zibi</i>	Gatineau	Urbain	Eau de production de l'usine de Kruger	Eau liquide chaude (22 °C)	Boucle d'énergie thermique

5.5 Présentation des cinq études de cas

5.5.1 Étude de cas #1 : Cascades (Cabano)

Fondée en 1976, l'usine Cascades Emballage carton-caisse, située à Cabano, produit du papier cannelure à partir de fibres vierges et recyclées. Cette étude de cas a été réalisée en collaboration avec l'Équipe Énergie de Cascades CS+.

La Figure 32 présente le modèle d'affaires proposé dans cette étude de cas ainsi que ses principales caractéristiques techno-économiques.

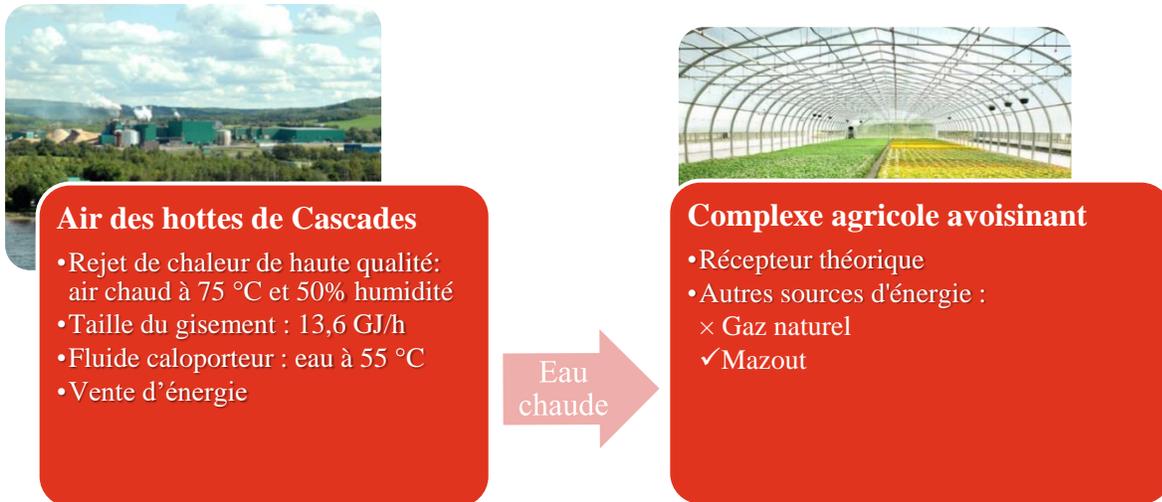


Figure 32 : Modèles d'affaires pour la valorisation de l'air des hottes de Cascades

La Figure 33 présente le schéma de principe sur *Prosim* (logiciel de modélisation de procédés) pour la valorisation thermique de l'air des hottes de Cascades. L'échangeur de chaleur permet de chauffer le fluide caloporteur, soit de l'eau pour ce cas, qui sera acheminée à l'aide d'une pompe jusqu'aux installations serricoles. Une unité de séparation est nécessaire à la suite de l'échange de chaleur afin de permettre un rejet de l'air froid à l'atmosphère.

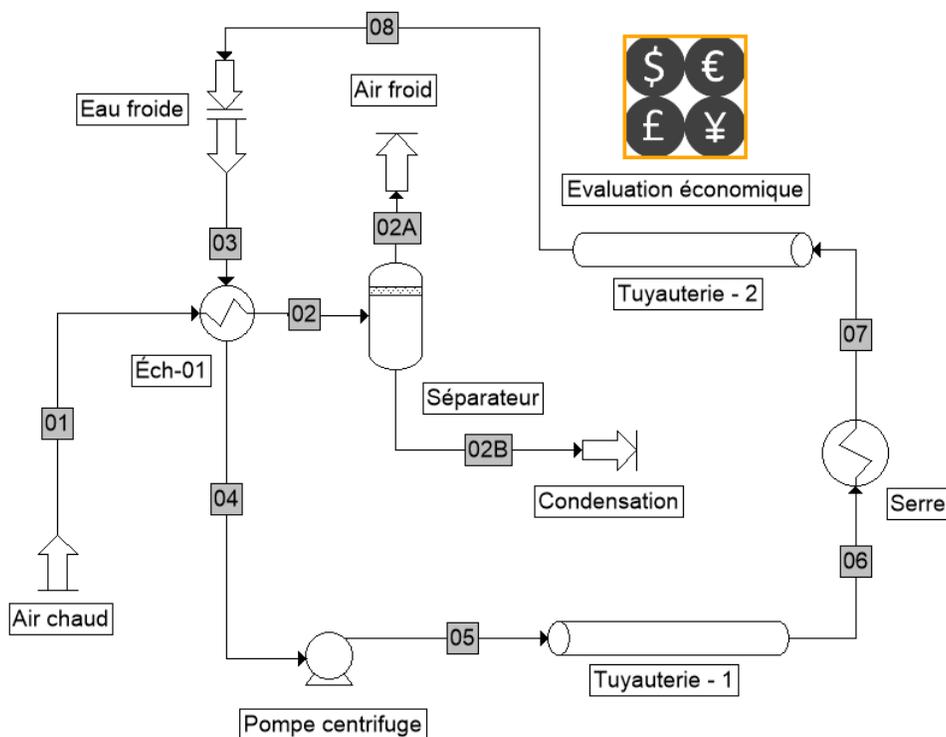


Figure 33 : Schéma de principe de la valorisation thermique de l'air des hottes de Cascades

La Figure 34 présente les bilans de matières et d'énergie pour de la valorisation thermique de l'air des hottes de Cascades. Ces résultats ont été calculés à l'aide de modélisation sur *Prosim* ainsi que des hypothèses techno-économiques présentées en l'Annexe B. Ces bilans sont nécessaires pour l'analyse d'investissement pour ce projet potentiel.

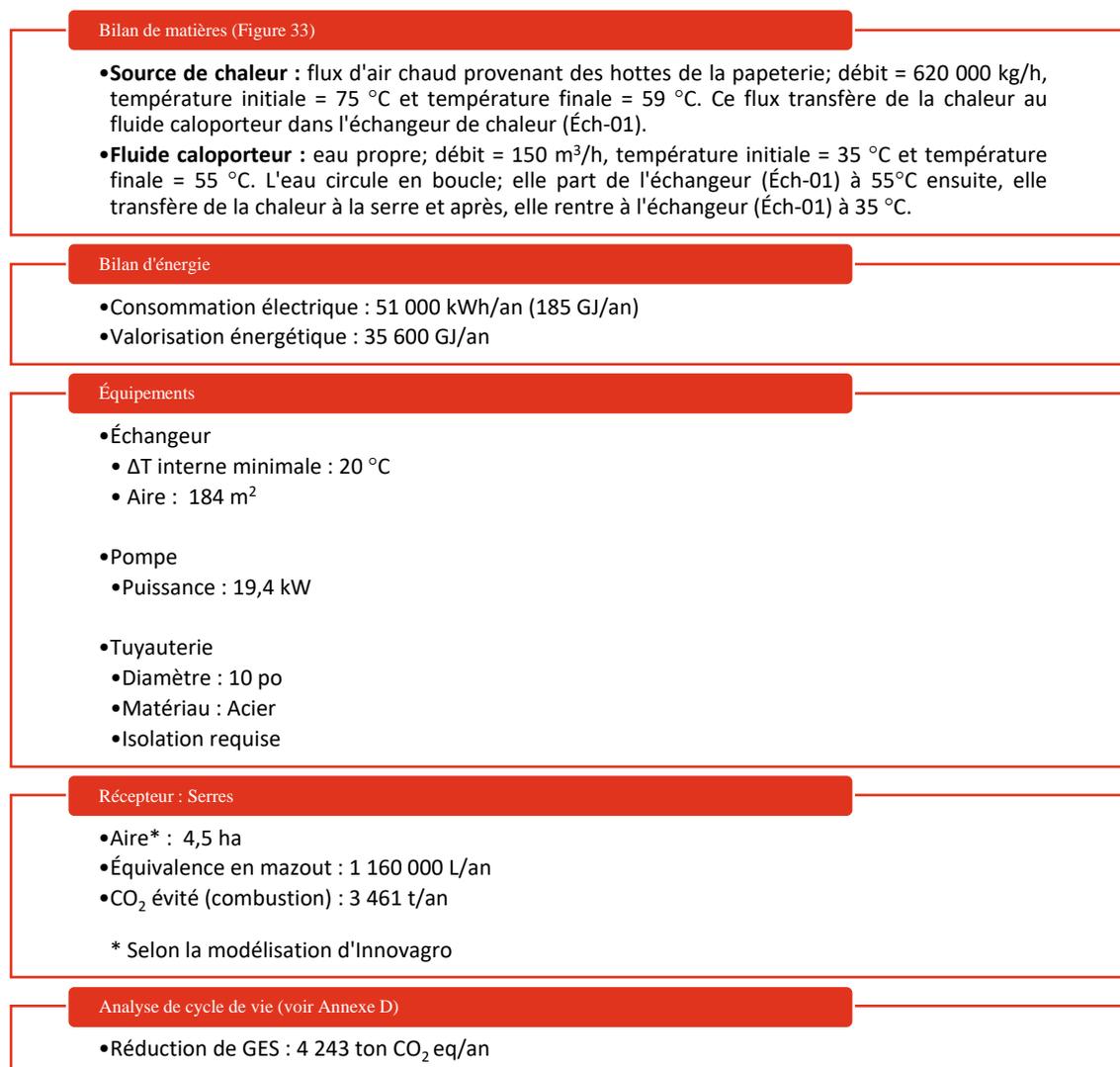


Figure 34 : Bilans de matière et d'énergie de la valorisation thermique de l'air des hottes de Cascades

Le Tableau 10 présente le coût économique et le coût énergétique pour les sources d'énergie potentielles, électricité pour la valorisation du rejet thermique (VRT) et combustible disponible dans la région.

Tableau 10 : Coûts associés à la valorisation thermique de l'air des hottes de Cascades

Sources d'énergie	Unités	VRT	Mazout
Consommation d'énergie	\$/an	5 000	925 000
Coût économique	\$/GJ	0,14	26,0

Le Tableau 11 présente l'analyse d'investissement initial et l'analyse d'investissement avec une source d'aide financière. Les hypothèses techno-économiques présentées à l'Annexe B affichent les facteurs utilisés pour les différents postes de ces analyses. Ces calculs permettent de déterminer la PRI identifiant le nombre d'années nécessaire pour récupérer entièrement l'investissement pour ce projet. Au niveau de l'aide financière, le programme ÉcoPerformance — volet d'implantation standard s'applique à ce type de projet. Les dépenses admissibles peuvent atteindre jusqu'à 75 % du CAPEX selon une estimation préliminaire. Ainsi, les revenus du projet ont été calculés afin de cibler une PRI après aide financière d'au moins un an, critère conforme aux exigences du programme de subvention.

Tableau 11 : Analyse d'investissement initial et analyse d'investissement avec aide financière : valorisation thermique de l'air des hottes de Cascades

Poste	Analyse initiale	Avec aide financière ÉcoPerformance
Équipements	560 000 \$	140 000 \$
Montage	65 000 \$	16 500 \$
Construction	130 000 \$	32 500 \$
Gestion	40 000 \$	10 000 \$
CAPEX	795 000 \$	199 000 \$
Électricité	5 000 \$	5 000 \$
Maintenance	20 000 \$	20 000 \$
Personnel	35 000 \$	35 000 \$
Divers	25 000 \$	12 000 \$
Amortissement	55 000 \$	13 000 \$
OPEX annuel	140 000 \$	85 000 \$
Revenus annuels	284 000 \$	284 000 \$
Bénéfices	144 000 \$	199 000 \$
PRI	5,5 ans	1 an
Tarif VRT (suggéré)		8,0 \$/GJ
Tarif du mazout (référence)		20,77 \$/GJ

5.5.2 Étude de cas #2 : Rio Tinto Fer et Titane (Sorel-Tracy)

Présente au Québec depuis plus de 70 ans, l'entreprise Rio Tinto Fer et Titane (RTFT), située à Sorel-Tracy, est l'un des principaux fabricants de matières premières sur les marchés du dioxyde de titane.

La Figure 39 présente le modèle d'affaires proposé dans cette étude de cas ainsi que ses principales caractéristiques techno-économiques.

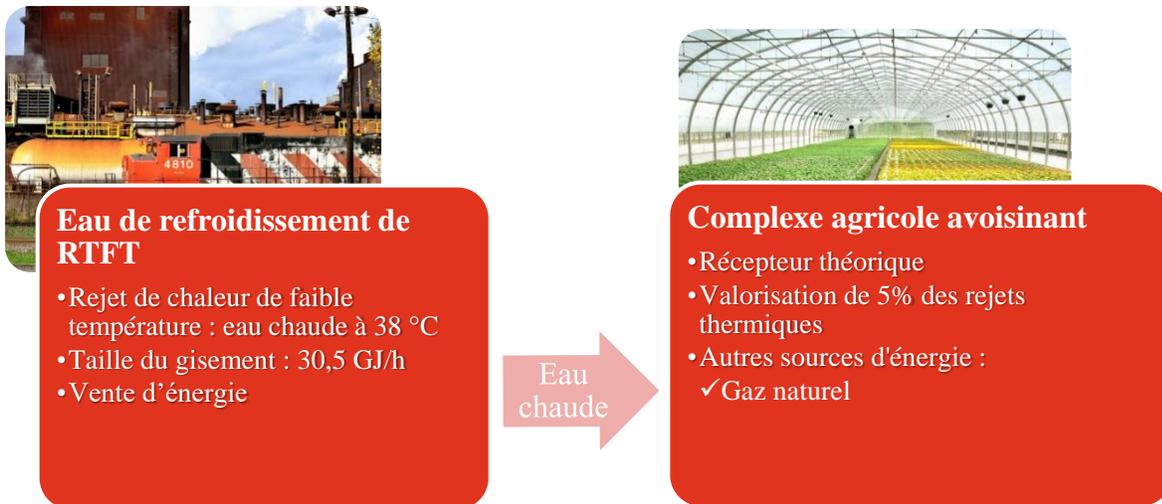


Figure 35 : Modèles d'affaires pour la valorisation thermique de l'eau de refroidissement de RTFT

La Figure 36 présente le schéma de principe sur *Prosim* pour la valorisation thermique de l'eau de refroidissement de RTFT. Une pompe est nécessaire pour le transport de l'eau chaude jusqu'au complexe serricole à proximité.

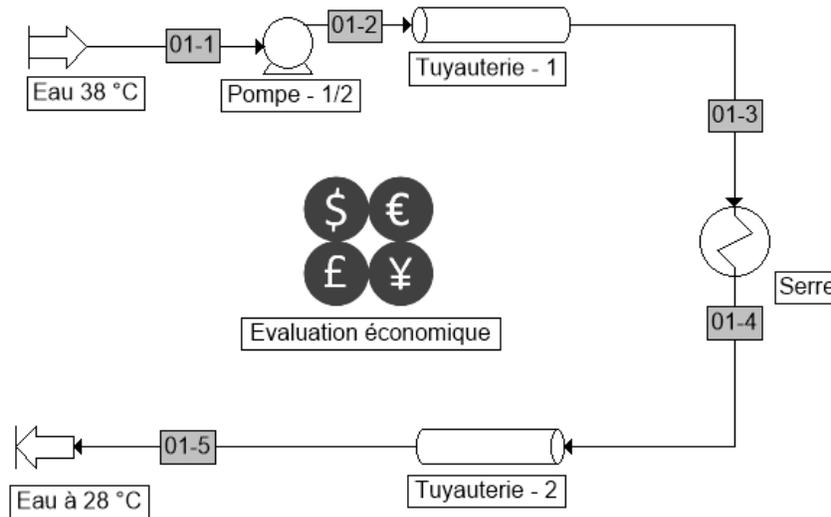


Figure 36 : Schéma de principe de la valorisation thermique de l'eau de refroidissement de RTFT

La Figure 37 présente les bilans de matières et d'énergie pour de la valorisation thermique de l'eau de refroidissement de RTFT.

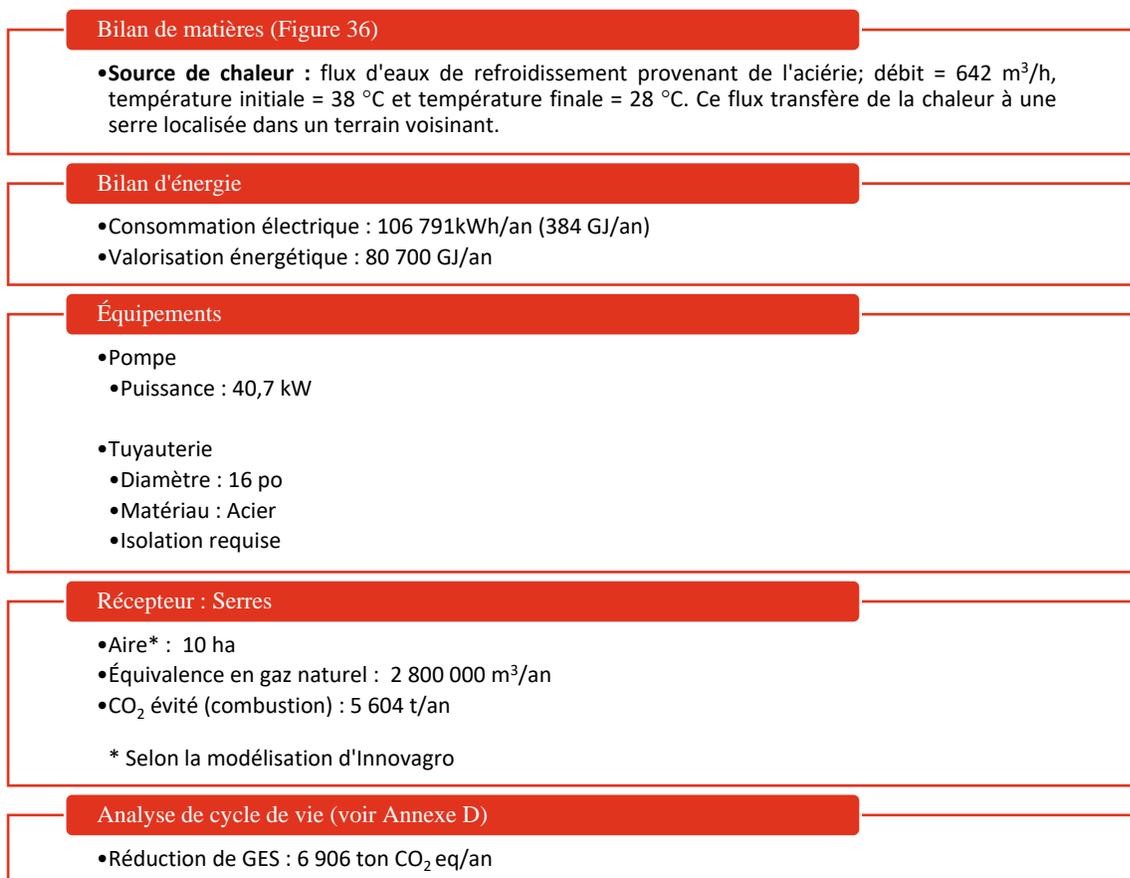


Figure 37 : Bilans de matière et d'énergie de la valorisation thermique de l'eau de refroidissement de RTFT

Le Tableau 12 présente le coût économique et le coût énergétique pour les sources d'énergie potentielles, électricité pour la valorisation du rejet thermique (VRT) et combustible disponible dans la région.

Tableau 12 : Coûts associés à la valorisation thermique de l'eau de refroidissement de RTFT

Sources d'énergie	Unités	VRT	Gaz naturel
Consommation d'énergie	\$/an	5 000	1 130 000
Coût économique	\$/GJ	0,07	14,00

Le Tableau 13 présente l'analyse d'investissement initial et l'analyse d'investissement avec une source d'aide financière. Les hypothèses techno-économiques présentées à l'Annexe B affichent les facteurs utilisés pour les différents postes de ces analyses. Ces calculs permettent de déterminer la PRI identifiant le nombre d'années nécessaire pour récupérer entièrement l'investissement pour ce projet. Ainsi, les revenus du projet ont été calculés afin de cibler une PRI après aide financière d'au moins un an selon les exigences du programme.

Au niveau de l'aide financière, le programme Écoperformance — volet d'implantation standard s'applique à ce type de projet. Les dépenses admissibles peuvent atteindre jusqu'à 75 % du CAPEX selon une

estimation préliminaire. Ainsi, les revenus du projet ont été calculés afin de cibler une PRI après aide financière d'au moins un an, critère conforme aux exigences du programme de subvention.

Tableau 13 : Analyse d'investissement initial et analyse d'investissement avec aide financière : valorisation thermique de l'eau de refroidissement de RTFT

Poste	Analyse initiale	Avec aide financière ÉcoPerformance
Équipements	410 000 \$	102 500 \$
Montage	40 000 \$	10 000 \$
Construction	100 000 \$	25 000 \$
Gestion	30 000 \$	7 500 \$
CAPEX	580 000 \$	145 000 \$
Électricité	5 000 \$	5 000 \$
Maintenance	15 000 \$	15 000 \$
Personnel	35 000 \$	35 000 \$
Divers	20 000 \$	10 500 \$
Amortissement	40 000 \$	9 500 \$
OPEX annuel	115 000 \$	75 000
Revenus annuels	220 000 \$	220 000 \$
Bénéfices	105 000 \$	145 000 \$
PRI	5,5 an	1 an
Tarif VRT (suggéré)		2,7 \$/GJ
Tarif du gaz naturel (référence)		11,2 \$/GJ

Même sans l'aide financière, ce projet est rentable assez rapidement. Néanmoins, il ne permet de valoriser que 5 % de l'énergie thermique provenant de l'eau de refroidissement, soit 80 700 GJ/an, par le chauffage du complexe serricole de 10 hectares. Les serres ne pourraient occuper une plus grande surface, puisque l'usine est située à proximité d'une zone urbaine.

L'ajout d'une thermopompe à l'ammoniac² permettrait d'améliorer la qualité du rejet thermique de RTFT ainsi que de valoriser plus de 240 000 GJ/an, soit 15 % de l'énergie thermique disponible. Par l'ajout de cet équipement, le projet peut fournir de la chaleur au complexe agricole de 10 ha et il compterait toujours d'un débit d'énergie excédentaire de 160 000 GJ/an. Comme mentionné précédemment, l'usine de RTFT est située dans un secteur urbain. Une cartographie des récepteurs potentiels a été effectuée dans un rayon de 2 km de l'usine de RTFT. Ceux-ci comprennent des bâtiments des secteurs commercial et institutionnel. Leur consommation énergétique en chauffage et en climatisation s'élève cependant qu'à 5 307 GJ/an. La Figure 38 affiche une carte des différents récepteurs potentiels.

² Selon nos estimations, le CAPEX d'une thermopompe à l'ammoniac est 58 % et l'OPEX, 50 % plus économique que ceux pour une thermopompe à CO₂

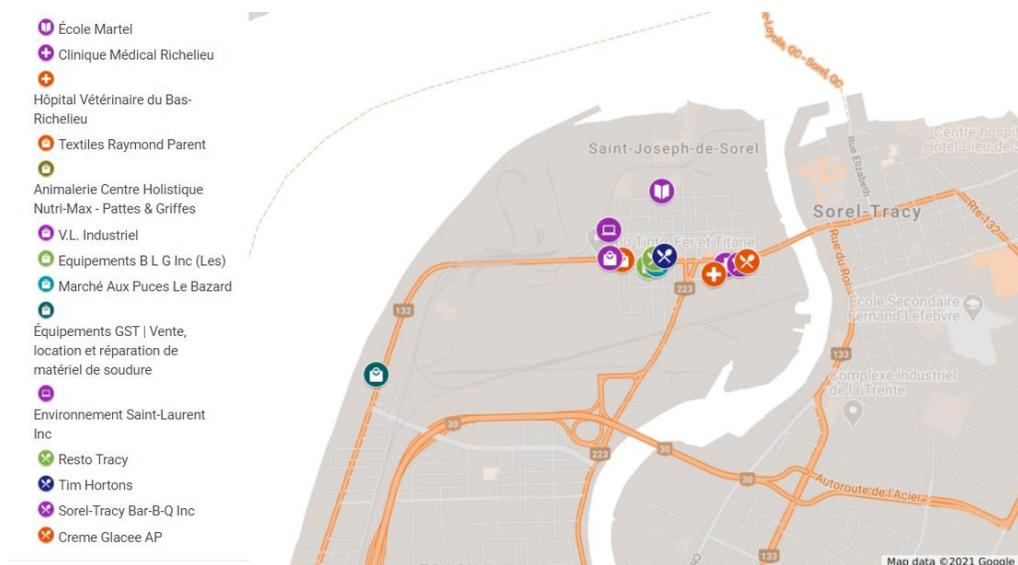


Figure 38 : Cartographie des récepteurs potentiels à proximité de l'usine de RTFT

Le Tableau 14 présente l'analyse d'investissement initial et l'analyse d'investissement avec aide financière pour la valorisation de 15 % de l'énergie thermique provenant de l'eau de refroidissement de RTFT. Au niveau de l'aide financière, le programme VRT s'applique à ce type de projet sous l'hypothèse que la Ville de Sorel-Tracy entreprend la gestion de ce projet. Le programme VRT vise principalement de projets municipaux. Vu l'envergure de ce projet potentiel, un possible modèle d'affaires comprend une entente entre RTFT et la Ville de Sorel-Tracy

Tableau 14 : Analyse d'investissement initial et analyse d'investissement avec aide financière : valorisation thermique de l'eau de refroidissement de RTFT

Poste	15 % de la valorisation des rejets thermiques	Avec aide financière VRT
Équipements	5 871 764 \$	1 585 376 \$
Montage	2 879 648 \$	777 505 \$
Construction	1 871 689 \$	505 356 \$
Gestion	531 155 \$	143 312 \$
CAPEX	11 154 256 \$	3 011 649 \$
Électricité	736 689 \$	736 689 \$
Maintenance	815 395 \$	815 395 \$
Personnel	36 066 \$	36 066 \$
Divers	630 783 \$	467 930 \$
Amortissement	743 617 \$	200 710 \$
OPEX annuel	2 962 549 \$	2 256 790 \$
Revenus annuels	2 690 000 \$	2 690 000 \$
Bénéfices	(272 550 \$)	433 210 \$
PRI	-	6,95 ans
Tarif VRT (suggéré)		11,2 \$/GJ
Tarif du gaz naturel (référence)		11,2 \$/GJ

5.5.3 Étude de cas #3 : Centre de biomasse de Saint-Félicien

La Ville de Saint-Félicien a développé un projet novateur pour la valorisation d'énergie thermique résiduelle non valorisée par la création de parcs agrothermique et industriel à proximité. Ce projet résulte d'une collaboration entre la municipalité et l'unité de cogénération à la biomasse de Saint-Félicien. La Ville prévoit l'implantation des réseaux de chaleur d'eau basse température (BT) et haute température (HT) pour ces parcs.

La Figure 39 présente le modèle d'affaires proposé pour le réseau de chaleur basse température (BT) alors que la Figure 40 affiche celui pour le réseau de chaleur haute température (HT).

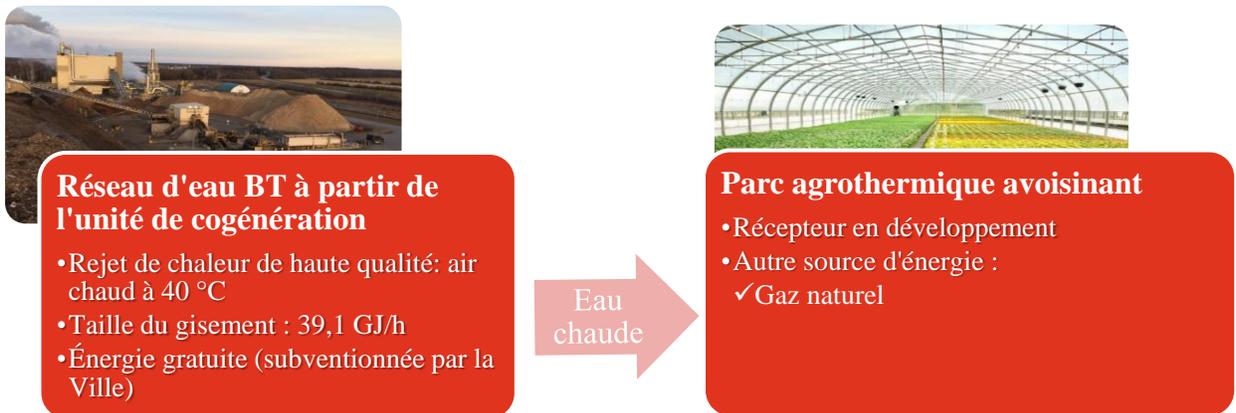


Figure 39 : Modèles d'affaires du réseau BT de la Ville de Saint-Félicien

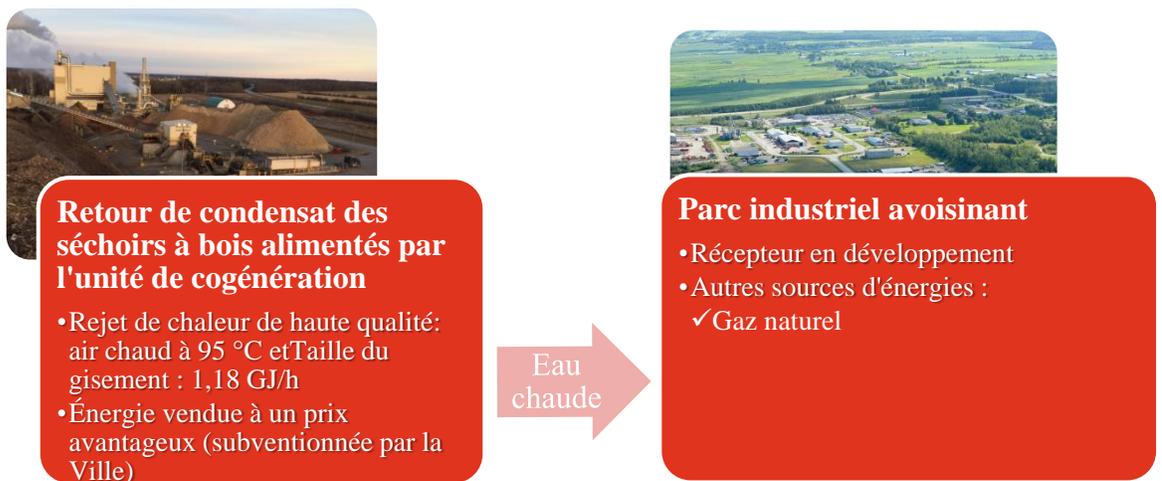


Figure 40 : Modèles d'affaires pour le réseau HT de la Ville de Saint-Félicien

La Figure 41 présente le schéma de principe sur *Prosim* pour la valorisation thermique de l'eau chaude du réseau BT. Le schéma inclut la pompe permettant d'acheminer le fluide chaud jusqu'au complexe agrothermique. Deux pompes ont été prévues par principe de redondance.

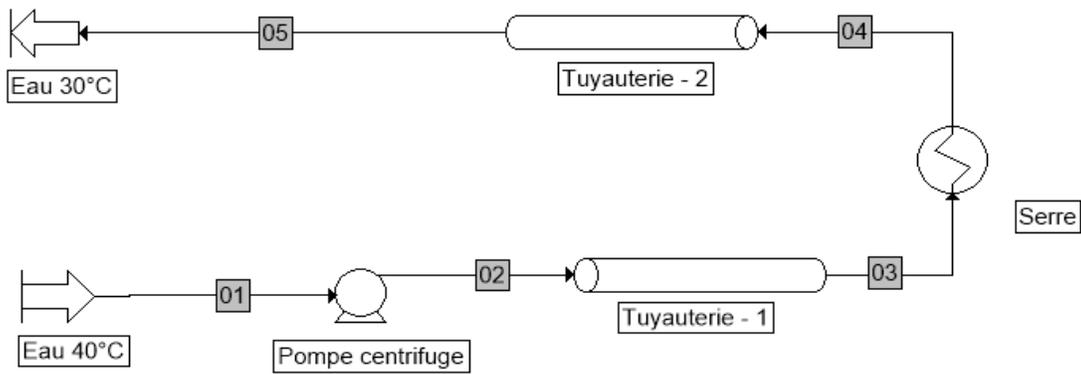


Figure 41 : Schéma de principe du réseau BT de la Ville de Saint-Félicien

La Figure 42 présente le schéma de principe sur *Prosim* pour la valorisation thermique de l'eau chaude du réseau HT. Pareillement au réseau BT, le procédé inclut la pompe permettant d'acheminer le fluide chaud jusqu'au parc industriel. Deux pompes ont été prévues par principe de redondance.

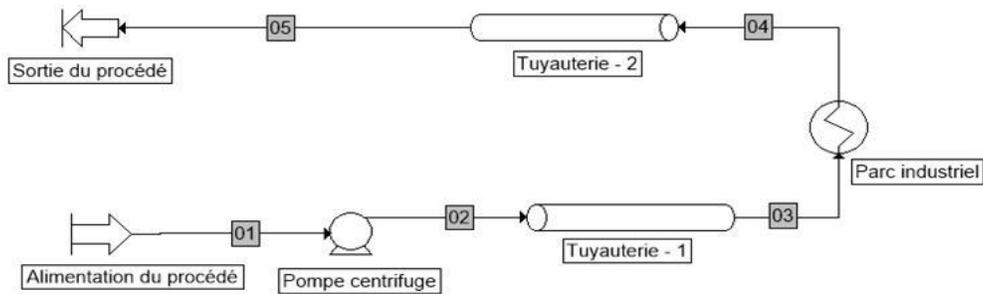


Figure 42 : Schéma de principe du réseau HT de la Ville de Saint-Félicien

La Figure 43 présente les bilans de matières et d'énergie pour réseau BT de la Ville de Saint-Félicien.

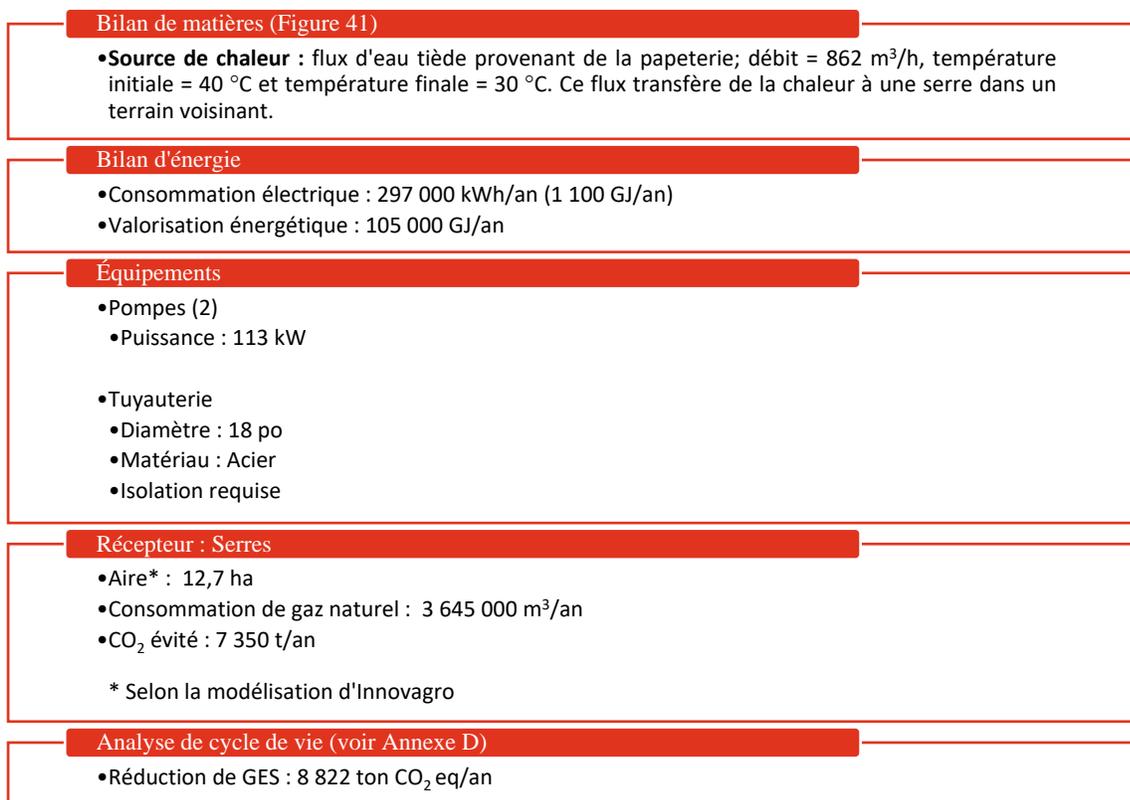


Figure 43 : Bilans de matière et d'énergie du réseau BT de la Ville de Saint-Félicien

La Figure 44 présente les bilans de matières et d'énergie pour réseau HT de la Ville de Saint-Félicien

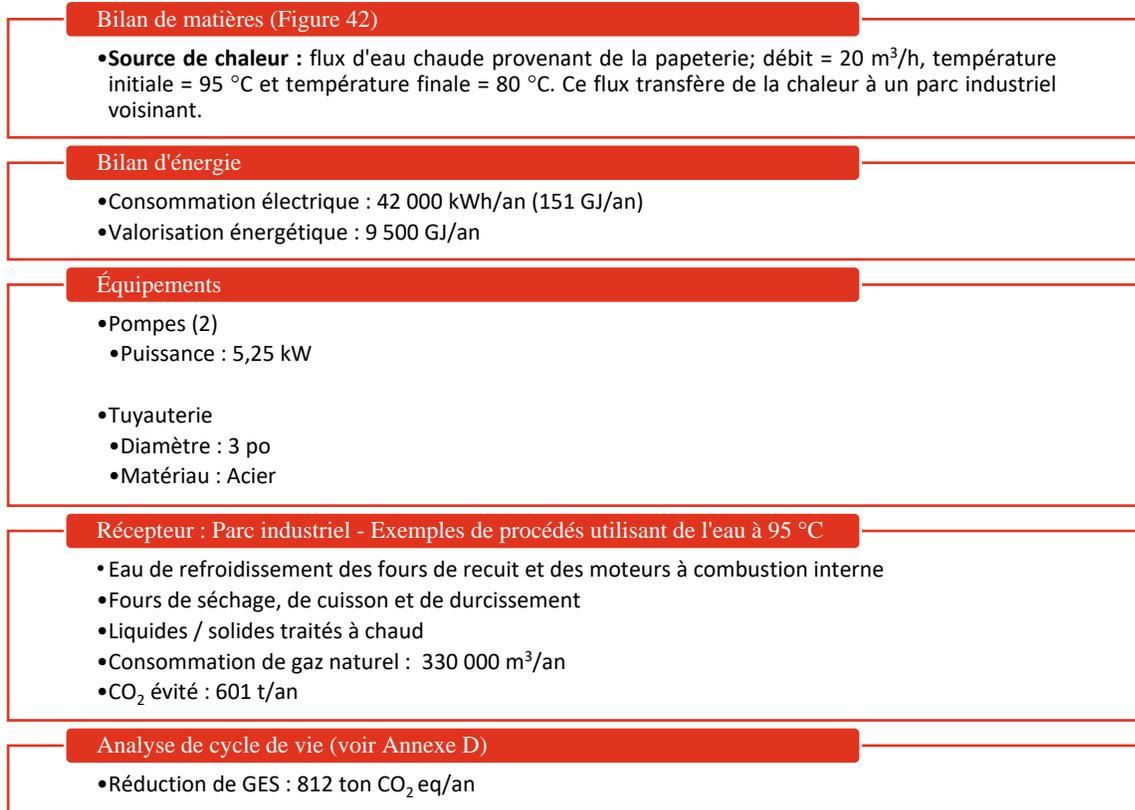


Figure 44 : Bilans de matière et d'énergie du réseau HT de la Ville de Saint-Félicien

Le Tableau 15 présente les coûts associés à la valorisation thermique pour le réseau BT. Le tarif VRT proposé est de 75 % du tarif de la source d'énergie la moins chère disponible, soit le gaz naturel pour ce cas d'étude, et vaut 8,40 \$/GJ.

Tableau 15 : Coûts associés à la valorisation thermique du réseau BT de la Ville de Saint-Félicien

Sources d'énergie	Unités	VRT	Gaz naturel
Consommation d'énergie	\$/an	21 000	1 430 000
Coût économique	\$/GJ	0,20	14,00

Le Tableau 16 présente les coûts associés à la valorisation thermique pour le réseau HT.

Tableau 16 : Coûts associés à la valorisation thermique du réseau HT de la Ville de Saint-Félicien

Sources d'énergie	Unités	VRT	Gaz naturel
Consommation d'énergie	\$/an	3 000	130 000
Coût économique	\$/GJ	0,31	14,00

Le Tableau 11 présente l'analyse d'investissement initial et l'analyse d'investissement avec une source d'aide financière pour l'implantation des réseaux BT et HT. Le CAPEX présenté provient d'une étude

d’Innovagro pour l’installation des nouveaux réseaux et l’adaptation des infrastructures déjà en place. Au niveau de l’aide financière, le programme VRT s’applique à ce type de projet, puisqu’il vise les municipalités. Les dépenses admissibles sur le CAPEX peuvent atteindre jusqu’à 73 %, soit 33 % par le provincial et 40 % par le Fédéral.

Tableau 17 : Analyse d’investissement initial et analyse d’investissement avec aide financière : réseaux BT et HT de la Ville de Saint-Félicien

Poste	Analyse initiale	Avec aide financière VRT
Infrastructures parc agrothermique site 1	1 230 000 \$	332 100 \$
Infrastructures parc industriel thermique site 2	560 000 \$	151 200 \$
Infrastructures parc industriel thermique 3	180 000 \$	48 600 \$
Infrastructures terrain rue de l’Énergie	10 000 \$	2 700 \$
Infrastructures terrain rue Verreault Nord	10 000 \$	2 700 \$
Infrastructures terrain rue Verreault Sud	40 000 \$	10 800 \$
Installations eau chaude BT	2 800 000 \$	756 000 \$
Installations eau chaude HT	786 000 \$	212 220 \$
Imprévus (20 %)	1 120 000 \$	302 400 \$
Taxes nettes (5 %)	280 000 \$	75 600 \$
Frais contingents (20 %)	1 120 000 \$	302 400 \$
CAPEX	8 100 000 \$	2 196 720 \$
Électricité	24 000 \$	24 000 \$
Maintenance	26 000 \$	26 000 \$
Personnel	110 000 \$	110 000 \$
Divers	175 000 \$	56 934 \$
Amortissement	540 000 \$	146 448 \$
OPEX annuel	875 000 \$	363 382 \$
Revenus annuels	960 000 \$	960 000 \$
Bénéfices	85 000 \$	596 618 \$
PRI	95 ans	3,7 ans
Tarif VRT (suggéré)		8,4 \$/an
Tarif du gaz naturel (référence)		11,2 \$/an

Même bien que le projet soit rentable du début, un programme d’aide financière rendrait ce projet intéressant du point de vue financière en potentiellement réduisant sa PRI de 95 à 4 ans.

5.5.4 Étude de cas #4 : Xylo-Carbone (Saint-Tite)

Fondée en 2017, l’entreprise Xylo-Carbone, située à Saint-Tite, est spécialisée dans la transformation du bois en produits de carbone végétal par pyrolyse. Leur procédé permet également de récupérer les gaz de pyrolyse.

La Figure 45 présente le modèle d’affaires proposé dans cette étude de cas ainsi que ses principales caractéristiques techno-économiques.

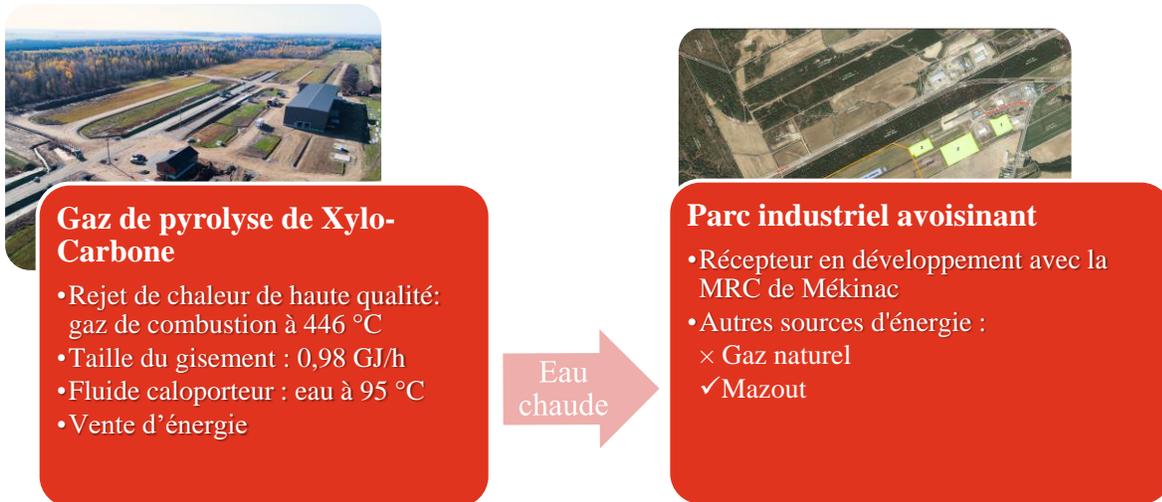


Figure 45 : Modèles d'affaires de la valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone

La Figure 46 présente le schéma de principe sur *Prosim* pour la valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone, le récepteur dans ce cas-ci est un parc industriel actuellement en développement.

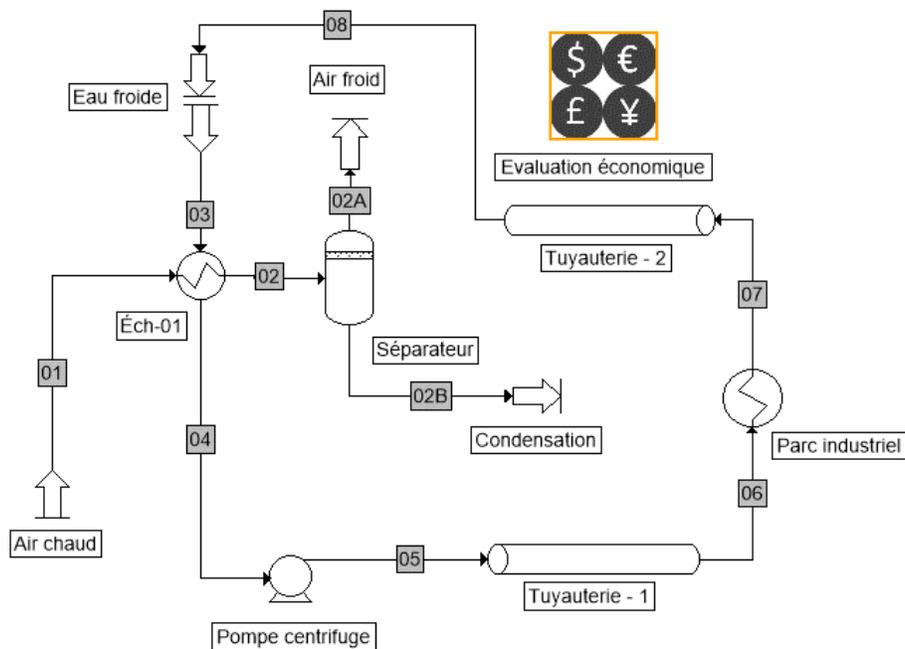


Figure 46 : Schéma de principe de la valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone

La Figure 47 présente les bilans de matières et d'énergie pour de la valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone ainsi qu'une liste d'industries potentiellement réceptrices de l'eau chaude à 95°C (Agri-Réseau, 2021; Mazzetti, 2018; U.S Department of Energy, 2008).

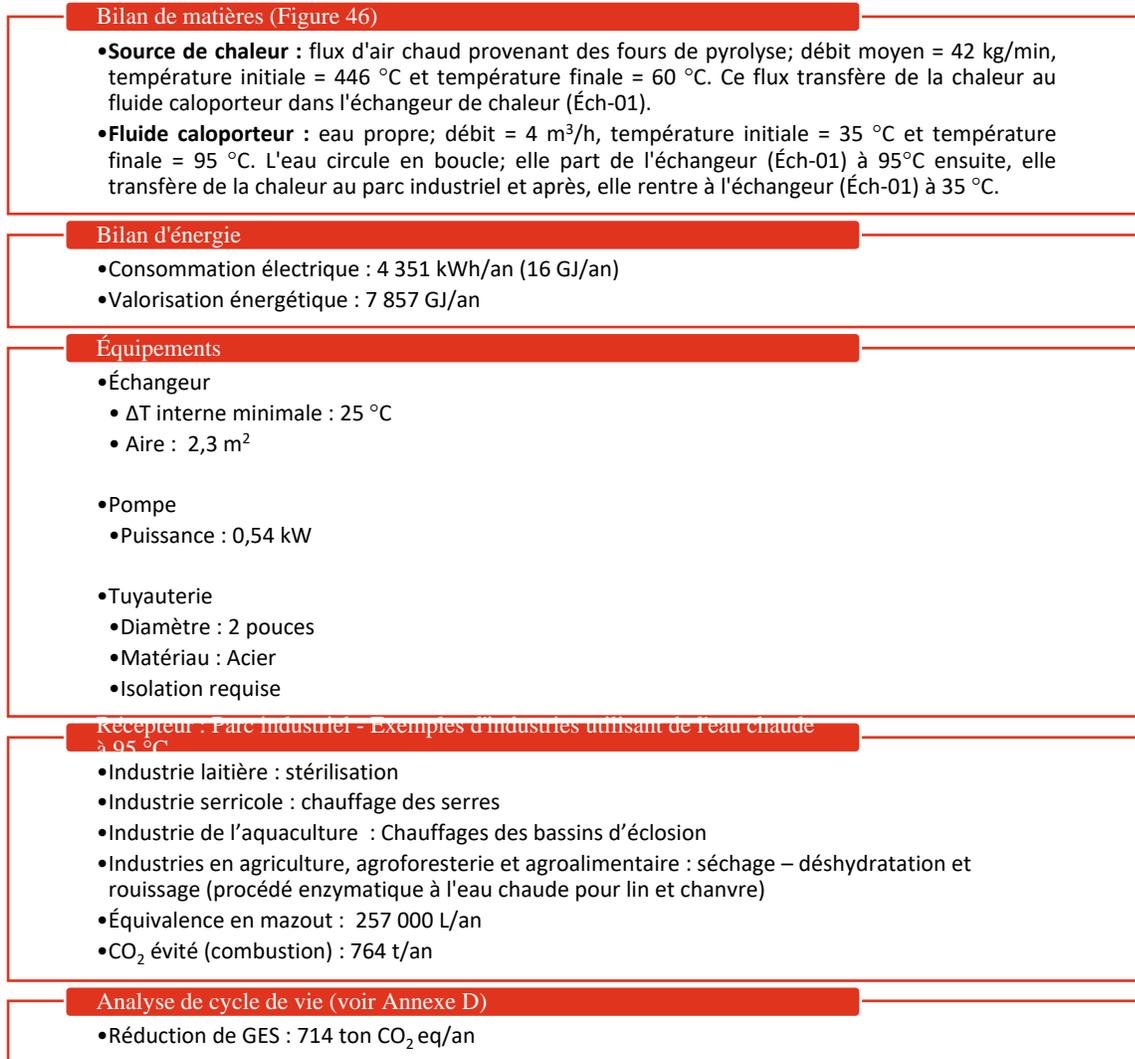


Figure 47 : Bilans de matière et d'énergie de la valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone

Le Tableau 18 présente le coût économique et le coût énergétique pour les sources d'énergie potentielles, électricité pour la valorisation du rejet thermique (VRT) et combustible disponible dans la région..

Tableau 18 : Étude de marché de la valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone

Sources d'énergie	Unités	VRT	Mazout
Consommation d'énergie	\$/an	452	220 000
Coût économique	\$/GJ	0,06	27,70

Le Tableau 19 présente l'analyse d'investissement initial et l'analyse d'investissement avec une source d'aide financière. Les hypothèses techno-économiques présentées à l'Annexe B affichent les facteurs utilisés pour les différents postes de ces analyses. Ces calculs permettent de déterminer la PRI identifiant

le nombre d'années nécessaire pour récupérer entièrement l'investissement pour ce projet. Ainsi, les revenus du projet ont été calculés afin de cibler une PRI après aide financière d'au moins un an selon les exigences du programme.

Au niveau de l'aide financière, le programme ÉcoPerformance — volet d'implantation standard s'applique à ce type de projet. Les dépenses admissibles peuvent atteindre jusqu'à 75 % du CAPEX selon une estimation préliminaire.

Tableau 19 : Analyse d'investissement initial et analyse d'investissement avec aide financière : valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone

Poste	Analyse initiale	Avec aide financière ÉcoPerformance
Équipements	220 000 \$	55 000 \$
Montage	5 000 \$	1 250 \$
Construction	50 000 \$	12 500 \$
Gestion	15 000 \$	3 750 \$
CAPEX	290 000 \$	72 500 \$
Électricité	500 \$	500 \$
Maintenance	5 500 \$	5 500 \$
Personnel	28 000 \$	28 000 \$
Divers	8 000 \$	4 000 \$
Amortissement	20 000 \$	4 000 \$
OPEX annuel	62 000 \$	42 000 \$
Revenus annuels	114 500 \$	114 500 \$
Bénéfices	52 500 \$	72 500 \$
PRI	5,5 ans	1 an
Tarif VRT (suggéré)		14,6 \$/GJ
Tarif du mazout (référence)		22,7 \$/GJ

5.5.5 Étude de cas #5 : Projet Zibi (Gatineau)

Le projet Zibi consiste en un nouveau développement résidentiel et commercial de 14 hectares situé à Gatineau et Ottawa, le long de la rivière des Outaouais. Le projet consiste à valoriser des terrains autrefois industriels et à redonner l'accès à la rivière aux résidents et aux commerçants. Tel qu'observé sur la Figure 48, un réseau de chaleur et de refroidissement sera disponible pour le secteur de l'Ontario. Pour sa part, une boucle d'échange thermique (*District Thermal Loop – DTL*) desservira le secteur du Québec.

Lorsque le fluide caloporteur du DTL sera en manque d'énergie durant les saisons froides, celui-ci sera acheminé vers Kruger afin de refroidir leur eau de production et ainsi être chauffé. Cette étude de cas se concentre principalement la valorisation thermique des eaux de production à la station d'échange de chaleur de Kruger.

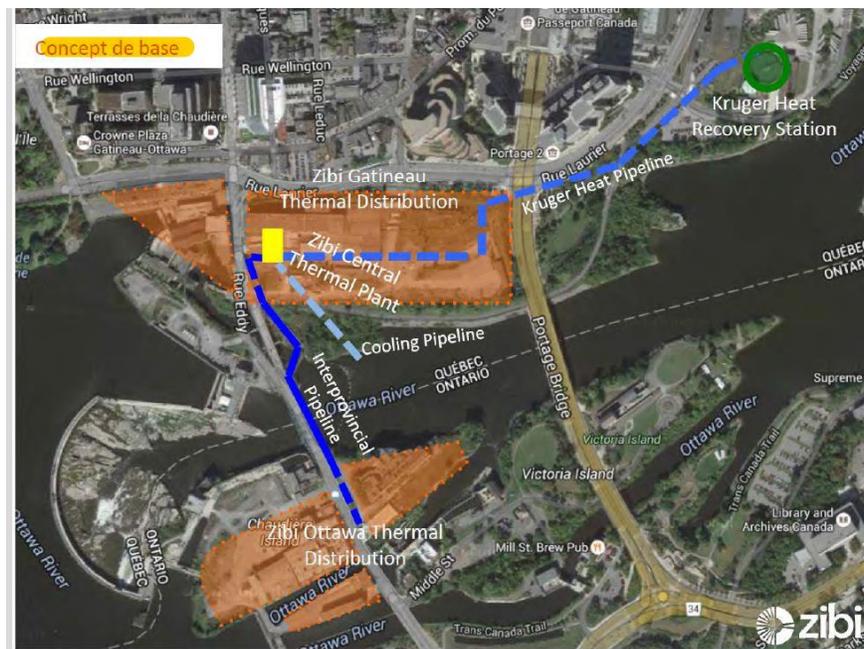


Figure 48 : Cartographie du Projet Zibi

La Figure 49 présente le modèle d'affaires proposé dans cette étude de cas ainsi que ses principales caractéristiques techno-économiques.

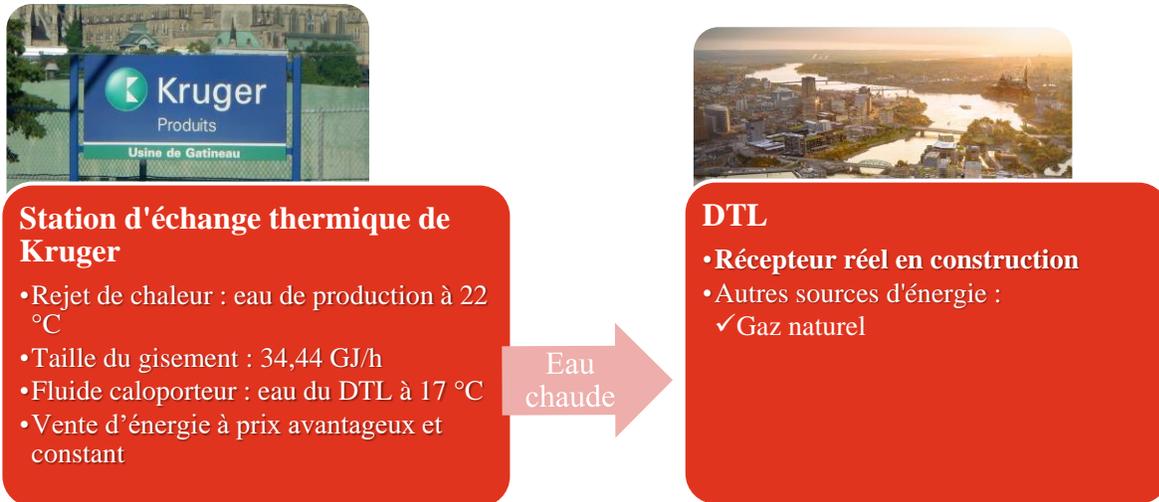


Figure 49 : Modèles d'affaires de la valorisation thermique de l'eau de production de Kruger

La Figure 50 présente le schéma de principe sur *Prosim* pour la valorisation thermique de l'eau de production de Kruger. Un échangeur de chaleur est nécessaire afin d'abaisser la température de l'eau de production de Kruger avant de la rejeter à la rivière, tout en réchauffant l'eau du DTL. Une pompe est nécessaire pour le transport du fluide caloporteur.

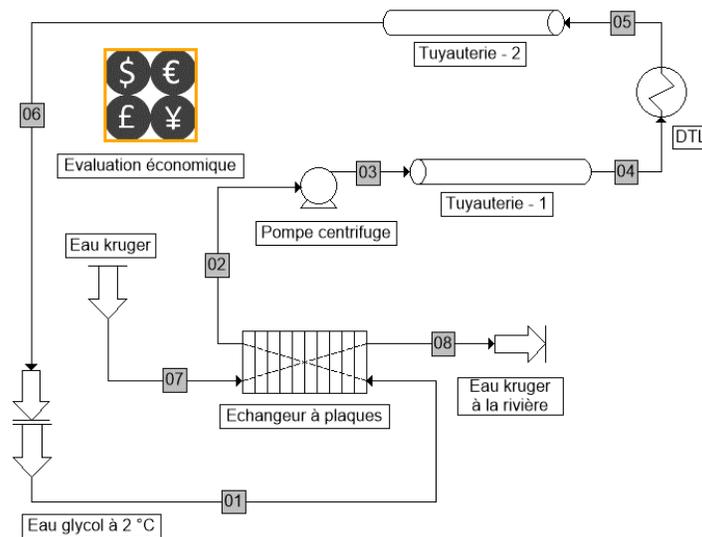


Figure 50 : Schéma de principe de la valorisation thermique de l'eau de production de Kruger

La Figure 51 présente les bilans de matières et d'énergie pour de la valorisation thermique de l'eau de production de Kruger.

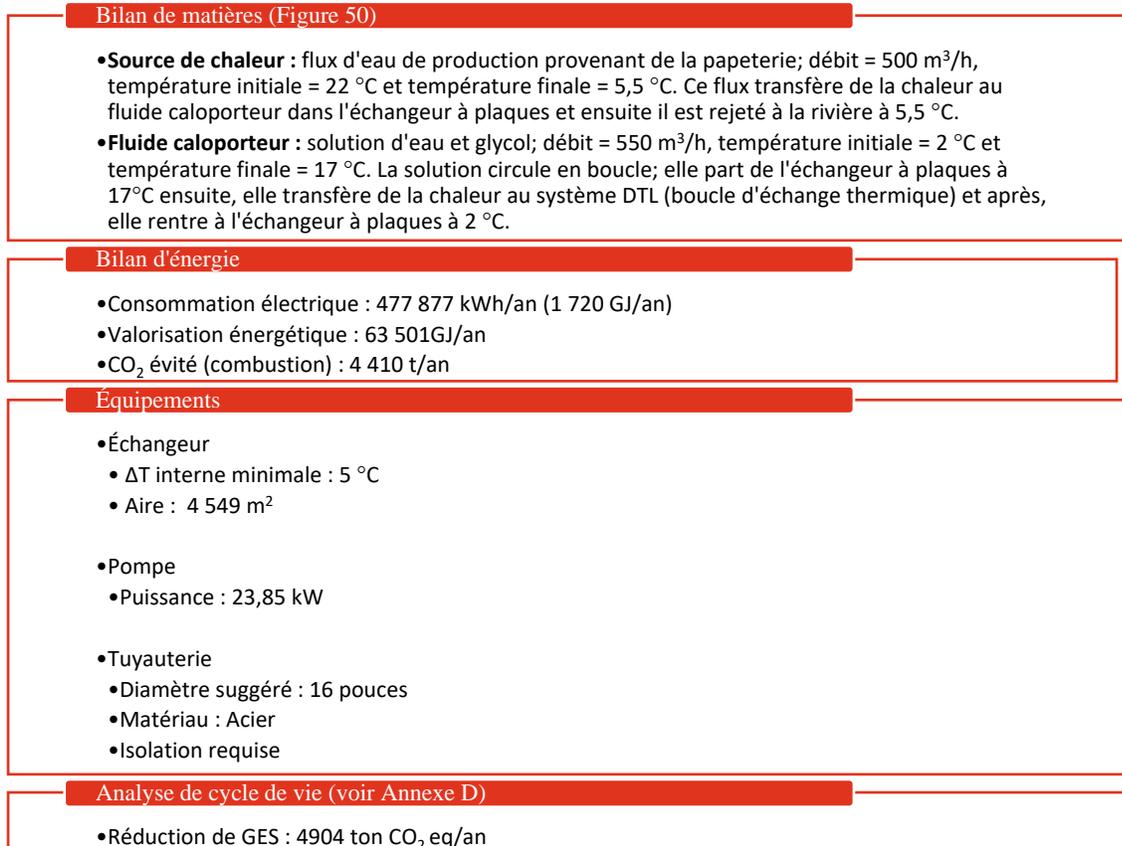


Figure 51 : Bilans de matière et d'énergie de la valorisation thermique des gaz de pyrolyse de Xylo-Carbone

L'étude de marché et l'analyse d'investissement n'ont pas été effectuées dans le cadre de cette étude, puisqu'il s'agit d'un projet déjà en cours.

5.6 Conclusions et recommandations

Cette section a présenté cinq cas d'étude où le CTTÉI a réalisé des analyses préliminaires de faisabilité en estimant les dépenses d'investissement (CAPEX) et d'exploitation (OPEX) avec l'aide de modèles théoriques. En conséquence, les partenaires privés et municipaux impliqués dans ces projets devront entreprendre des analyses plus poussées afin de prendre une décision finale sur l'investissement. Dans cette optique, les conclusions principales des études de cas sont décrites ci-dessous.

- **Aide financière** : Les analyses d'investissement présentées comprenant une aide financière sont basées sur une estimation préliminaire. Les projets devront faire d'étude plus approfondie par l'organisme de subventions.
- 1) **Faisabilité et motivation** : Les cas d'étude de Cascades, Rio Tinto Fer et Titane et de Xylo-Carbone présentent des projets réalistes. Les intervenants sont très impliqués dans le projet et des terrains

sont disponibles à proximité. Aussi, ces deux cas d'étude présentent une PRI très courte en prenant en compte une aide financière ÉcoPerformance.

- Projets municipaux : le projet de la Ville de Saint-Félicien illustre un bon exemple de transition énergétique envers la valorisation de rejets thermiques des industriels localisés au cœur de parcs industriels et agronomes des municipalités ; en outre, l'inclusion de l'appel de propositions VRT améliore le bilan financier de ce projet en réduisant la PRI attendue pour le projet. Concernant le gisement de Rio Tinto Fer et Titane (RTFT) à Sorel-Tracy, nous croyons que la municipalité aurait avantage à s'inspirer du le modèle d'affaires de Saint-Félicien .

Ci-dessous des tableaux de récapitulatif des cinq cas d'étude.

Tableau 20 : Récapitulatif du bilan de matière et énergie des cas d'étude

Cas	Émetteur	Localisation	Récepteur	Combustible remplacé	Énergie valorisée GJ/an	CO ₂ évité t/an
1	Cascades	Cabano	Parc agricole	Mazout	35 600	3 461
2	Rio Tinto	Sorel-Tracy	Parc agricole	Gaz naturel	80 700	5 604
3	Ville de Saint-Félicien	St-Félicien	Parc agricole et industriel	Gaz naturel	114 500	7 951
4	Xylo-Carbone	St-Tite	Parc industriel	Gaz naturel	7 857	764
5	ZIBI	Gatineau et Ottawa	Complexe industriel et urbain	Mazout	63 501	4 410

Tableau 21 : Récapitulatif du bilan financier des cas d'étude

Cas	Émetteur	Aide financière \$	CAPEX (1) \$	OPEX (1) \$/an	Revenus \$/an	PRI (1) an	Tarif suggéré pour VRT \$/GJ	Tarif de référence (2) \$/GJ	Réduction de tarif %
1	Cascades	596 000 \$	199 000 \$	85 000 \$	284 000 \$	1,0	8,0 \$	20,77 \$	61%
2	Rio Tinto	435 000 \$	145 000 \$	75 000 \$	220 000 \$	1,0	2,7 \$	11,20 \$	76%
3	Ville de Saint-Félicien	5 900 000 \$	2 200 000 \$	363 500 \$	960 000 \$	3,7	8,4 \$	11,20 \$	25%
4	Xylo-Carbone	217 500 \$	72 500 \$	42 000 \$	114 500 \$	1,0	14,6 \$	20,77 \$	30%
5	ZIBI	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)

1. Valeurs après aide financière
2. Tarif de référence du combustible remplacé
3. Analyse hors de la portée de ce mandat

6 Conclusions et recommandations

La valorisation des rejets thermiques représente un potentiel énorme pour le Québec, qui est caractérisé par des besoins en chaleur importants, mais également par un secteur industriel très présent qui rejette une grande quantité de chaleur dans l'environnement. On peut en outre s'attendre à une augmentation des besoins thermiques si le Québec construit plus de serres pour atteindre une plus grande autonomie alimentaire, et à une augmentation des rejets thermiques si le Québec attire plus d'industries et de centres de données pour valoriser son énergie renouvelable.

Les bases de données géoréférencées et les analyses technoéconomiques et de cycle de vie de 5 études de cas produites dans le cadre de ce projet permettront aux différentes parties prenantes de mieux comprendre les enjeux et les synergies possibles dans le développement de projets de valorisation, et les aideront à quantifier les échanges énergétiques actuels et futurs pouvant être réalisés sur une zone géographique d'intérêt.

Les rejets thermiques industriels ont été quantifiés en mettant à jour les données de précédentes études et en développant de nouvelles méthodologies pour inclure différents sous-secteurs industriels, y compris les centrales de cogénération, les centrales électriques des réseaux autonomes, les installations de traitement des eaux et les centres de données informatiques. Différents types de rejet (gazeux, liquide) et différents niveaux de température ont été répertoriés et intégrés dans une base de données géoréférencée des rejets thermiques valorisables. La base de données reprend quelque 170 installations industrielles et 850 stations d'épuration qui représentent des rejets thermiques annuels valorisables de plus de 204 PJ, soit plus de 56,7 TWh – à titre de comparaison, les besoins en chaleur pour le chauffage des locaux des ménages québécois représentent environ 200 PJ (56 TWh), soit une quantité de chaleur inférieure aux rejets répertoriés.

Les besoins thermiques des bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels ainsi que ceux des serres ont été quantifiés dans une base de données géoréférencée. La base de données comprend quelque 620 millions de m² de bâtiments et 2.5 millions de m² de serres (250 ha), correspondant à des besoins annuels de 360 PJ (100 TWh).

Une méthodologie basée sur des cartes matricielles (*raster map*) utilisant des mailles de 250 m × 250 m a été développée pour quantifier le potentiel *actuel* de valorisation des rejets thermiques, correspondant à l'énergie pouvant transiter entre les émetteurs et les récepteurs de chaleur situés dans une zone géographique d'intérêt. Dans le cadre du projet, une carte a été produite pour illustrer le potentiel de valorisation correspondant à des réseaux de chaleur de 2 km de rayon, mais les bases de données géoréférencées établies pour les rejets et les besoins permettent d'évaluer une infinité de scénarios, en utilisant différentes zones géographiques ou en ne conservant que certains types de rejets ou de besoins par exemple.

Les cartes matricielles représentant les rejets et les besoins thermiques peuvent également être utilisées pour quantifier le potentiel *futur* de valorisation des rejets de chaleur. En considérant les rejets ou les besoins séparément, ou en considérant l'excès (ou le manque) de chaleur sur une zone géographique, on

peut quantifier les synergies énergétiques qui résulteraient de l'implantation de nouveaux émetteurs ou récepteurs de chaleur sur le site. En croisant ces informations avec d'autres types de données géoréférencées tels que le zonage des terrains, les résultats de ce projet pourront être utilisés pour informer les politiques d'aménagement du territoire – on pense particulièrement à l'implantation de nouvelles serres, de nouveaux centres de données, ou au développement de quartiers écoénergétiques autour de réseaux de partage de chaleur.

Des analyses technoéconomiques et des analyses de cycle de vie ont été réalisées sur cinq études de cas représentant une variété de situations de valorisation des rejets thermiques :

- Le chauffage d'un complexe de serres agricoles à l'aide de rejets thermiques (air chaud à 75 °C) provenant d'une usine de papier
- Le chauffage d'un complexe de serres agricoles à partir des rejets thermiques (eau à 38 °C)
- La valorisation de rejets de chaleur secondaires (eau à 95 °C et air à 40 °C) d'une installation de cogénération à la biomasse dans un complexe agricole et un parc industriel
- La valorisation de rejets thermiques (gaz à 446 °C) d'une usine de pyrolyse dans un parc industriel
- Un projet de valorisation des rejets de chaleur (eau à 22 °C) d'une usine de papier pour chauffer un quartier résidentiel et commercial.

Ces études de cas ont permis de mettre en lumière les synergies techniques, économiques et environnementales des projets de valorisation des rejets de chaleur de nature diverse (projets privés ou municipaux) en quantifiant les paramètres économiques et les émissions de Gaz à Effet de Serre des différents projets. Le rôle des subventions dans la faisabilité économique est également analysé dans les études de cas.

Les résultats présentés dans ce rapport et les bases de données géoréférencées permettront à toutes les parties prenantes de mieux quantifier le potentiel de valorisation des rejets thermiques, et d'évaluer ce potentiel sur des zones géographiques d'intérêt. Les bases de données sont conçues pour être évolutives, et pourront être améliorées en intégrant les données mesurées provenant de la divulgation volontaire ou obligatoire des rejets et des besoins thermiques. Les études de cas détaillées permettront également de comprendre les synergies possibles lors du développement de projets de valorisation.

Références

- Abdel-Aal, M., Schellart, A., Kroll, S., Mohamed, M., & Tait, S. (2018). Modelling the potential for multi-location in-sewer heat recovery at a city scale under different seasonal scenarios. *Water Research*, 145, 618-630. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.073>
- ADEME. (2017). *La chaleur fatale*. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chaleur_fatale-8821-2018-06_pdf.pdf
- Agri-Réseau. (2021). *La déshydratation—Fiches thématiques sur les systèmes alimentaires de proximité | Agri-Réseau général—Agri-Réseau | Documents*. <https://www.agrireseau.net/argeneral/documents/98610/la-deshydratation-fiches-thematiques-sur-les-systemes-alimentaires-de-proximite>
- Allen, D. T., Torres, V. M., Thomas, J., Sullivan, D. W., Harrison, M., Hendler, A., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Fraser, M. P., Hill, A. D., Lamb, B. K., Miskimins, J., Sawyer, R. F., & Seinfeld, J. H. (2013). Measurements of methane emissions at natural gas production sites in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(44), 17768-17773.
- Alvarez, R. A., Zavala-Araiza, D., Lyon, D. R., Allen, D. T., Barkley, Z. R., Brandt, A. R., Davis, K. J., Herndon, S. C., Jacob, D. J., Karion, A., Kort, E. A., Lamb, B. K., Lauvaux, T., Maasackers, J. D., Marchese, A. J., Omara, M., Pacala, S. W., Peischl, J., Robinson, A. L., ... Hamburg, S. P. (2018). Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain. *Science*, 361(6398), 186-188. <https://doi.org/10.1126/science.aar7204>
- Appels de propositions pour l'achat d'électricité | Hydro-Québec*. (2021). <https://www.hydroquebec.com/achats-electricite-quebec/contrats-electricite.html>
- Bouthillette Parizeau. (2021). *Étude et proposition de solutions visant la récupération de chaleur d'un centre de données vers une serre* (p. 163). Hydro-Québec.
- Brown, H. L. (1996). *Energy Analysis of 108 Industrial Processes*. The Fairmont Press, Inc.
- Burnham, A., Han, J., Clark, C. E., Wang, M., Dunn, J. B., & Palou-Rivera, I. (2012). Life-cycle greenhouse gas emissions of shale gas, natural gas, coal, and petroleum. *Environmental Science & Technology*, 46(2), 619-627. <https://doi.org/10.1021/es201942m>
- Calculators for pressure drop, pipe diameter, flow rate, Venturi tube, orifice plate and much more*. (s. d.). Consulté 7 juillet 2021, à l'adresse <https://www.pipeflowcalculations.com/index.xhtml>
- Canada's Oil Industry | Canadian Oil and Natural Gas Producers. (s. d.). *CAPP*. Consulté 7 juillet 2021, à l'adresse <https://www.capp.ca/oil/>
- Chauvel, A., & Institut français du pétrole (Éds.). (2001). *Manuel d'évaluation économique des procédés* (Nouv. éd. rev. et augm). Technip.
- Data Center Map—Colocation, Cloud, Managed Hosting etc*. (2021). <https://www.datacentermap.com/>
- Environnement et Changement climatique Canada. (2020a). *Inventaire officiel des gaz à effet de serre du Canada—Open Government Portal*. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/779c7bcf-4982-47eb-af1b-a33618a05e5b>
- Environnement et Changement climatique Canada. (2020b). *Programme de déclaration des gaz à effet*

de serre (PDGES)—Données sur les gaz à effet de serre (GES) des installations—Open Government Portal. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/a8ba14b7-7f23-462a-bdbb-83b0ef629823>

Environnement et Changement climatique Canada. (2021). *Normales climatiques canadiennes.* https://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/

Gobeil Dion & Associés. (2015). *Évaluation du chauffage à l'électricité pour les serres.* Journée Provinciale en Serriculture - CRAAQ. https://www.agrireseau.net/documents/91386/evaluation-du-chauffage-a-l_electricite-pour-les-serres

Google. (2021). *Google Satellite Maps.* Google Maps. <https://www.google.ca/maps/@45.4769912,-73.5820297,5273m/data=!3m1!1e3>

HUBER Solution for Heat Recovery from Sewers (ThermWin). (2021). <https://www.huber.fr/fr/solutions/utilisation-de-la-chaaleur/sewers-sources-of-energy.html>

Hydro-Québec. (2019). *COMPLÉMENT D'INFORMATION DU PLAN D'APPROVISIONNEMENT 2020-2029; Réseaux Autonomes.*

Hydro-Québec. (2020). *Une énergie propre à prix avantageux maintenant accessible à un plus grand ...* <http://nouvelles.hydroquebec.com/fr/communiqués-de-presse/1665/une-energie-propre-a-prix-avantageux-maintenant-accessible-a-un-plus-grand-nombre-de-producteurs-en-serre/>

INNOVAGRO Consultants. (2010). *Potentiel énergétique des rejets thermiques industriels au Québec.* INNOVAGRO Consultants Inc.

INNOVAGRO Consultants. (2018). *Caractérisation des rejets thermiques* (p. 41).

Investissement Québec. (2021). *Programme innovation—MEI.* Ministère de l'Économie et de l'Innovation. <https://www.economie.gouv.qc.ca/fr/bibliotheques/programmes/aide-financiere/programme-innovation/>

Latour, S. R., Blaney, B. L., & Menningmann, J. G. (1982). *Waste heat recovery potential in selected industries.* US Environmental Protection Agency, Industrial Environmental Research Laboratory.

Mazzetti, M. J. (2018, août 2). Matchmaking for industry sectors for waste heat utilization. *#SINTEFblog.* <https://blog.sintef.com/sintefenergy/waste-heat/>

McKenna, R. C., & Norman, J. B. (2010). Spatial modelling of industrial heat loads and recovery potentials in the UK. *Energy Policy*, 38(10), 5878-5891. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.042>

Microsoft. (2019). *Canadian Building Footprints.* <https://github.com/microsoft/CanadianBuildingFootprints>

MW Materials World—El SUPERMERCADO online de materiales. (s. d.). Consulté 7 juillet 2021, à l'adresse <https://www.mwmaterialsworld.com/>

Natural Gas Data—U.S. Energy Information Administration (EIA). (s. d.). Consulté 7 juillet 2021, à l'adresse <https://www.eia.gov/naturalgas/data.php>

Natural Gas Processing : The Crucial Link Between NG Production & Its Transportation to Market. (s. d.). Consulté 7 juillet 2021, à l'adresse <https://www.eia.gov/naturalgas/articles/ngprocessindex.php>

News Release : NREL Announces New Projects to Advance Medium- and Heavy-Duty Natural Gas Vehicle Technologies. (s. d.). Consulté 7 juillet 2021, à l'adresse <https://www.nrel.gov/news/press/2019/nrel-announces-new-projects-to-advance-medium-and-heavy-duty-natural-gas-vehicle-technologies.html>

- Pressions municipales—Rejets d’eaux usées—Données Québec.* (2021, mars 3).
<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/pressions-municipales-rejets-d-eaux-usees>
- Production Decline Curve Analysis—Energy Information Administration.* (s. d.). Consulté 7 juillet 2021, à l’adresse https://www.eia.gov/analysis/drilling/curve_analysis/
- QGIS Development Team. (2021). *QGIS Geographic Information System.* QGIS Association.
<https://www.qgis.org>
- Ramirez, P. (2019). *Quick methodology to conduct prefeasibility studies on Wet Air Oxidation* [Conférence].
- Ressources naturelles Canada. (2020a, janvier 30). *Secteur industriel – Industries désagrégées Canada Tableau 3 : Consommation d’énergie secondaire par industrie.*
<https://oe.e.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=CP§or=id&juris=ca&rn=3&page=0>
- Ressources naturelles Canada. (2020b, janvier 30). *Secteur industriel – Industries désagrégées Canada Tableau 6 : Émissions de GES par industrie – excluant les GES liés à l’électricité1.*
<https://oe.e.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=CP§or=id&juris=ca&rn=6&page=0>
- Ressources naturelles Canada. (2021). *Base de données complète sur la consommation d’énergie.*
https://oe.e.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/menus/evolution/tableaux_complets/liste.cfm
- Roy, P.-O., Ménard, J.-F., Fallaha, S., & Samson, R. (2021). *PROFIL ENVIRONNEMENTAL DE DIVERS SCÉNARIOS DE VALORISATION DES REJETS THERMIQUES.* CIRAIG, Polytechnique Montréal.
- Sawyer, R. (2004). Calculating total power requirements for data centers. *White Paper, American Power Conversion, 562.*
- Seider, W. D., Lewin, D. R., Seader, J. D., Widagdo, S., Gani, R., & Ng, K. M. (2017). *Product and process design principles : Synthesis, analysis and evaluation* (Fourth edition). Wiley.
- Shields, A. (2018, mai 14). Centrale de Bécancour : Lumière sur l’entente entre Hydro-Québec et TransCanada. *Le Devoir.* <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/527728/centrale-de-becancour-lumiere-sur-l-entente-entre-hydro-quebec-et-transcanada>
- SPSQ. (2013). *L’utilisation des rejets thermiques industriels comme source de chauffage dans la production en serre au Québec.* Syndicat des producteurs en serre du Québec.
- Statistique Canada. (2018, juin 13). *La Base de données ouvertes sur les immeubles.*
<https://www.statcan.gc.ca/fra/ecdo/bases-donnees/bdoi>
- Statistique Canada. (2020a). *Aperçu statistique de l’industrie des légumes de serre du Canada 2019* [Plan d’activités]. <https://www.agr.gc.ca/fra/secteurs-agricoles-du-canada/horticulture/rapports-sur-l-industrie-horticole/apercu-statistique-de-lindustrie-des-legumes-de-serre-du-canada-2019/?id=1609252451699#a1.2>
- Statistique Canada. (2020b, novembre 25). *Tableau 25-10-0025-01 Industries manufacturières, total annuel de la consommation énergétique de combustibles en gigajoules, 31-33.*
<https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2510002501>
- Statistique Canada. (2021a). *Estimation de la superficie totale des serres et mois en exploitation (Tableau 32-10-0018-01).* <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210001801>

- Statistique Canada. (2021b). *Estimation des serres spécialisées en exploitation, de la superficie en serre et des mois en exploitation (Tableau 32-10-0019-01)*.
<https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210001901>
- Statistique Canada. (2021c). *Production et valeur des fruits et légumes de serre*.
<https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210045601>
- Stricker Associates Inc. (2007). *Market study on waste heat and requirements for cooling and refrigeration in Canadian industry*. Stricker Associates Inc. Canada.
- Transition Énergétique Québec. (2021a). *Programme ÉcoPerformance*.
<https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/affaires/programmes/ecoperformance>
- Transition Énergétique Québec. (2021b). *Valorisation des rejets thermiques*.
<https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/en/affaires/appel-de-propositions/valorisation-des-rejets-thermiques>
- Université Laval et Bureau de Coopération Interuniversitaire. (2021). *Géoindex*.
<https://geoapp.bibl.ulaval.ca/>
- U.S Department of Energy. (2008). *Waste Heat Recovery : Technology and Opportunities in U.S. Industry*. 112.
- Velichko, V. V., Tikhomirov, A. A., & Ushakova, S. A. (2018). Estimating CO₂ gas exchange in mixed age vegetable plant communities grown on soil-like substrates for life support systems. *Life Sciences in Space Research*, 16, 47-51. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.11.001>
- Whitmore, J., & Pineau, P.-O. (2021). *L'état de l'énergie au Québec 2021*. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. <https://energie.hec.ca/eeq/>

Annexe A: Méthodologie de calcul de la taille du gisement de chaleur pour les études de cas

Définitions générales

Estimation d'ordre de grandeur de la taille des gisements de chaleur en utilisant des modèles de calculs simples

Quatre cas de figure³:

1. Fumées — gaz de combustion ou air sec (150°C à 800°C)
2. Rejet de vapeur — pression base à moyenne (100°C à 257°C/15 à 650 psi)
3. Rejets gazeux — émissions de gaz ou d'air humide (80°C à 500°C)
4. Rejets liquides — flux en état liquide (50°C à 300°C)

Hypothèses de base

- Modèles simples pour l'estimation de l'énergie utilisable dans le chauffage de bâtiments (voir schémas annexés)
- Estimations de propriétés des fluides simplifiées (loi de gaz parfaits, air et eau purs, capacités calorifiques moyennes, etc.)

Variables et unités des modèles

Q_{nette} = taille du gisement de chaleur [GJ]

\dot{m} = débit d'air ou eau [kg/h]

n = nombre d'heures par an [h]

$\overline{C_p}$ = capacité calorifique moyenne (air ou eau) [J/(kg K)]

T = température du rejet (fournie par le client) [°C]

F = facteur de chaleur nette dans le cas d'emploi d'une thermopompe

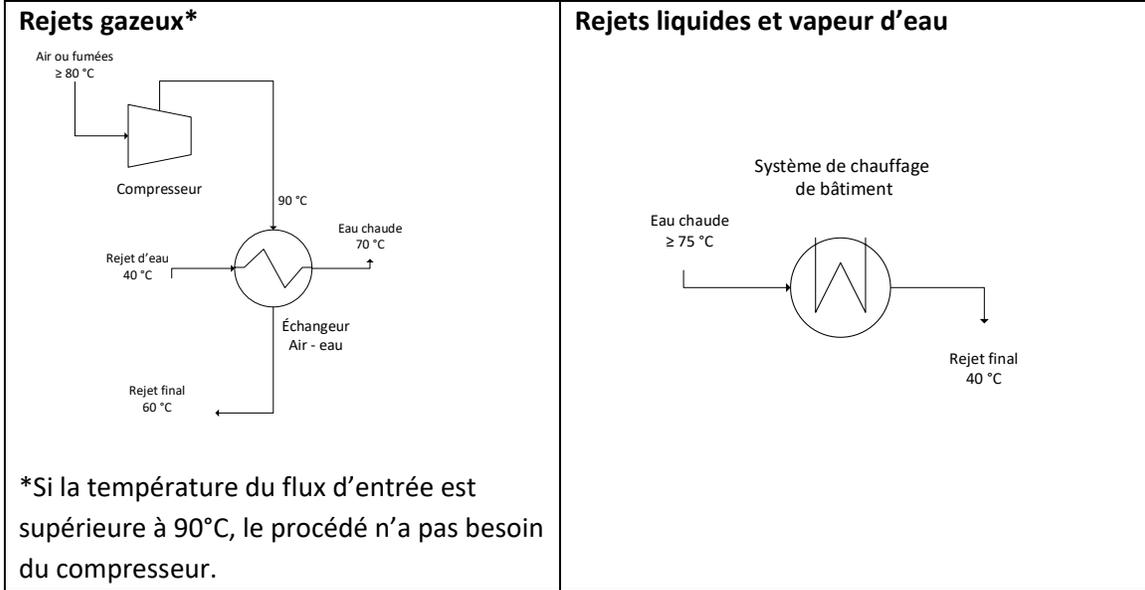
Autres indications :

- Les données de température et débit fournies par le client doivent être remises aux unités montrées ci-dessus.
- Le débit d'air est normalement exprimé en unités volumiques. Alors, il faut estimer le débit massique selon **cette séquence de calculs** :

³ Cas de figure définis par la Polytechnique de Montréal pour la réalisation de la cartographie de rejets thermiques.

- Convertir les unités de débit volumique (ft³/min, m³/min, etc.) à m³/h
- Multiplier par la densité de l'air à 25 °C; Densité (25 °C) = 1,183 9 kg/m³

Schémas simplifiés



Modèles de calculs

1. Fumées — gaz de combustion ou air sec (150°C à 800°C)

$$Q_{nette} = n * \dot{m} * (\overline{C_p})_{air} * (T_i - 60) / 10^9$$

$(\overline{C_p})_{air} = 1090 \text{ J}/(\text{kg K})$, température moyenne de 750 K
 $T_i = T$ (fournie par le client)

2. Rejet de vapeur – pression base à moyenne (100°C à 257°C/15 à 650 psi)

$$Q_{nette} = n * \dot{m} * (\overline{C_p})_{vapeur} * (T_i - 60) / 10^9$$

$(\overline{C_p})_{vapeur} = 1926 \text{ J}/(\text{kg K})$, température moyenne de 460 K
 $T_i = T$ (donnée du client)

3. Rejets gazeux — émissions de gaz ou d'air humide (80°C à 500°C)

$$Q_{nette} = F * n * \dot{m} * (\overline{C_p})_{air} * (T_i - 60) / 10^9$$

$(\overline{C_p})_{air} = 1090 \text{ J}/(\text{kg K})$, température moyenne de 750 K

Condition	$T_i =$	$F =$
$T \leq 90 \text{ °C}$	90 °C	0.57*
$T \geq 90 \text{ °C}$	T (donnée fournie par le client)	1

*Estimé par le CTTÉI par modélisation de la thermopompe

4. Rejets liquides — flux en état liquide (50°C to 300°C)

$$Q_{nette} = n * \dot{m} * (\overline{C_p})_{eau} * (T_i - 40) / 10^9$$

$(\overline{C_p})_{eau} = 4390 \text{ J}/(\text{kg K})$, température moyenne de 175 °C

Annexe B: Hypothèses techno-économiques des études de cas

Tableau 22 : Hypothèses techno-économiques pour les 5 cas

Paramètres	Hypothèses	Valeur	Commentaires
Capitalisation	Durée de vie du procédé et horizon de temps	15 ans	Estimation de l'amortissement de l'investissement initial
Exploitation	Utilisation/Opération	Cascades, RTFT et Saint-Félicien BT : 2 620 h/an Saint-Félicien HT, Xylo-Carbone et Projet Zibi : 8 000 h/an	Modélisation de complexes agricoles et/ou de parcs industriels récepteurs des rejets thermiques
Financiers, services et divers	Taux de change	1,5 \$ CAN/EUR	Estimation des coûts en EUR (logiciel)
	Frais divers	2 % du CAPEX 50 % de l'entretien	Valeurs moyennes selon l'expérience du CTTÉI (modifiables selon le scénario particulier du client)
Frais de personnel	Opérateurs	35 \$/h x 25 %	Tarifs de personnel moyens et taux d'occupation suggérés (modifiables selon le scénario particulier du client)
	Superviseur	50 \$/h x 10 %	
Consommables	Électricité	≈ 0,07 \$/kWh	Estimé à partir du tarif M accordé par Hydro-Québec aux projets de valorisation énergétique

Paramètres	Hypothèses	Valeur	Commentaires
Revenus	Vente d'énergie	Estimé pour chaque cas	Revenus estimés afin de cibler une PRI après aides financières d'au moins 1 an
Tarifs référentiels	Gaz naturel	≈ 11,2 \$/GJ	Estimé à partir du tarif D3 d'Énergir en 2021
	Mazout	≈ 20.77 \$/GJ	Estimé à partir des données de la régie de l'énergie du Québec

Annexe C: Tableau sommaire de l'indicateur *Changement climatique, PRG 100 ans*

Le tableau suivant, tiré du rapport présentant les analyses de cycle de vie (Roy et al., 2021), présente le sommaire des émissions de GES (via l'indicateur *Changement climatique, PRG 100 ans*) pour les scénarios investigués.

Tableau S-23 : Sommaire des résultats de l'indicateur *Changement climatique, PRG 100 ans*.

	Unité	Cascades	Rio Tinto	St-Félicien	Xylocarbone	Zibi
		Mazout	GN	GN	Mazout	GN
Chaleur transmise et utilisée	[kg CO2 eq/ MJ chaleur]	0,002	0,006	0,006	0,031	0,014
Substitution des combustibles fossiles	[kg CO2 eq/ MJ chaleur]	-0,121	-0,091	-0,18	-0,122	-0,091
Impact du scénario ⁴	[kg CO2 eq/ MJ chaleur]	-0,119	-0,086	-0,172	-0,091	-0,077
Quantité de chaleur requise par le scénario	[GJ/an]	35 600	80 700	111 769	7 857	63 501
Bilan GES annuel des scénarios ⁵	[ton CO2 eq/an]	-4 243	-6 906	-9 634	-714	-4 904

Où « Chaleur transmise et utilisée » représente les rejets thermiques valorisés, « Substitution des combustibles fossiles » représentent la diminution des émissions GES associés à la substitution des combustibles fossiles par la chaleur valorisée et la « Quantité de chaleur requise par le scénario » représente la demande de chaleur annuelle fournie au complexe valorisant la chaleur.

⁴ Obtenu par l'équation suivante : Chaleur transmise et utilisée + substitution des combustibles fossiles

⁵ Obtenu par l'équation suivante : (Chaleur générée+ Substitution des combustibles fossiles) x chaleur générée