

Récupération sous forme électrique de la chaleur des eaux de refroidissement

Rapport final du projet PART2009N005
Programme d'aide à la recherche et au transfert
Volet technologique

Présenté à
Mme. Thérèse Desnoyers

Par
Frédéric J. Lesage

Stéphane Piché - Technicien
Éric Sempels - Stagiaire
Nathaniel Lalande-Bertrand - Stagiaire

Gatineau, 11 janvier 2011

RÉSUMÉ

*Récupération sous forme électrique de la chaleur des eaux de refroidissement
PART2009N005*

Descripteurs : Générateur thermoélectrique, Puissance électrique, Conversion thermique, efficacité énergétique, échangeur de chaleur.

Afin d'arriver à une solution palpable au problème de déchets thermiques industriels, une étude sur la puissance électrique générée et le rendement de conversion de générateurs thermoélectriques a été réalisée. Des modules thermoélectriques disponibles sur le marché furent insérés dans des générateurs thermiquement en parallèle et électriquement en série. La résistance électrique externe varia durant le déroulement expérimental permettant ainsi d'évaluer son effet sur la puissance électrique générée afin d'identifier la résistance électrique externe optimale. Les paramètres de fonctionnement furent le débit d'eau chaude, le débit d'eau froide, le gradient de température et l'effet d'inserts initiateurs de turbulence. Ces paramètres n'affectèrent la résistance électrique externe optimale de chaque générateur. Cette résistance optimale identifiée n'accrut que lorsqu'elle augmentait en rapport avec le nombre de modules thermoélectriques à l'intérieur de chaque générateur. La puissance électrique générée avec la résistance externe optimale identifiée fut comparée avec un modèle théorique proposant que la résistance interne du générateur soit égale à la résistance externe optimale. Les résultats serviront à nous conduire vers une corrélation formulant la résistance électrique externe optimale d'un générateur thermoélectrique. En outre, les résultats de cette étude montrent que l'effet de certains inserts initiateurs de turbulence est doublement gagnant en raison d'une réduction de perte de charge et d'une augmentation importante de puissance électrique générée. Aussi, contrairement à ce qui se trouve dans la littérature, les résultats de cette étude montrent que le rendement ne croît pas d'une façon linéaire avec le débit d'eau chaude. En effet, les résultats démontrent qu'il existe un débit d'eau chaude optimal par rapport au rendement dépendant du gradient de température.

Frédéric J. Lesage
Chargé de projet

La Direction
Cégep de l'Outaouais

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	2
TABLE DES MATIÈRES.....	3
TABLE DES ILLUSTRATIONS	6
NOMENCLATURE	10
1. INTRODUCTION.....	12
1.1. Rejets thermiques industriels.....	12
1.2. Impact sur l’environnement	12
1.3. Récupération.....	13
1.4. Travaux antérieurs.....	14
2. MODÈLE MATHÉMATIQUE.....	14
2.1. Effet Seebeck.....	14
2.2. Équation de la chaleur	15
2.3. Module thermoélectrique en une dimension	17
2.3.1. Résistance interne d’un module thermoélectrique	19
2.3.2. Puissance maximale générée	20
2.3.3. Résistance électrique externe optimale	20
2.4. Rendement.....	21
3. MONTAGE EXPÉRIMENTAL.....	21
3.1. Schématique du montage	21
3.2. Modules Thermoélectriques.....	22
3.3. Générateurs thermoélectriques.....	23
3.4. Variation de la résistance électrique externe	24
3.5. Installation d’essais	25
3.6. Turbulences	27

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	29
4.1. Variation de la résistance externe	29
4.2. Effet de turbulence	35
4.3. Effet du débit sur la puissance générée.....	38
4.4. Rendement des générateurs	41
4.5. Comparaison de la théorie avec les résultats expérimentaux.....	43
4.5.1. Résistance interne	43
4.5.2. Puissance maximale générée	44
4.6. Courant généré et voltage.....	46
4.7. Perte de charge	53
4.8. Comparaison avec des résultats d'autres laboratoires.....	56
4.9. Performance visuel du générateur TEG40.....	58
5. CONCLUSIONS	59
6. RETOMBÉES	61
6.1. Retombées environnementales	61
6.2. Potentiel énergétique.....	61
6.3. Faisabilité technico-économique	63
6.4. Retombées socioéconomique	64
7. FUTURS PROJETS	64
7.1. Test alpha.....	64
7.2. Modélisation	66
7.2.1. Modèle mathématique et économique	66
7.2.2. Modèle écologique.....	67
7.3. Nouvelle conception	67
7.4. Récupération de la chaleur résiduelle sous forme gazeuse.....	68

7.5. Capteurs solaires thermoélectriques.....	69
RAPPORT DE STAGE.....	70
Bibliographie.....	72

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 2.2-1 : Volume infinitésimal.....	16
Figure 2.3-1 : Gradient de température à travers un thermocouple.....	17
Figure 3.1-1 : Gradient de température à travers un thermocouple	22
Figure 3.2-1 : Production d'une tension électrique à partir d'un gradient de température.	23
Figure 3.3-1 : Conception du générateur thermoélectrique de 12 modules.	24
Figure 3.4-1 : Rhéostat à compression plaque de carbone utilisé pour faire varier la résistance externe imposée sur le générateur thermoélectrique.	25
Figure 3.5-1 : Installation d'essais réalisée au Cégep de l'Outaouais.....	26
Figure 3.5-2 : Isolation d'un générateur et système de contrôle du débit et de la température de l'eau chaude.	26
Figure 3.5-3 : Montage des débitmètres.....	26
Figure 3.5-4 : Design de la plate-forme de l'installation d'essais.	27
Figure 3.6-1 : Inserts initiateurs de turbulence.....	28
Figure 3.6-2 : Fabrication des inserts initiateurs de turbulence.	29
Figure 4.1-1 : Puissance générée du générateur TEG8 avec une variation de résistance externe.	30
Figure 4.1-2 : Puissance générée du générateur TEG12 avec une variation de résistance externe.	30
Figure 4.1-3 : Puissance générée du générateur TEG40 avec une variation de résistance externe.	31
Figure 4.1-4 : Puissance générée du générateur TEG12 avec une variation de résistance externe à plusieurs débits. Une résistance optimale de 7 Ohm est identifiée.	32
Figure 4.1-5 : Puissance générée du générateur TEG12 avec une variation de résistance externe avec insert initiateur de turbulence. Une résistance optimale de 7 Ohm est identifiée.	33
Figure 4.1-6 : Puissance générée du générateur TEG12 avec une variation de résistance externe avec et sans insert initiateur de turbulence. Une résistance optimale de 7 Ohm est identifiée.....	33

Figure 4.1-7 : Puissance générée du générateur TEG40 avec une variation de résistance externe à plusieurs débits. Une résistance optimale de 17 Ohm est identifiée.	34
Figure 4.1-8 : Puissance générée du générateur TEG40 avec une variation de résistance externe avec et sans insert initiateur de turbulence. Une résistance optimale de 17 Ohm est identifiée.	34
Figure 4.1-9 : Comparaison de la résistance optimale des trois générateurs TEG8, TEG12 et TEG40.	35
Figure 4.2-1 : Effet des inserts initiateurs de turbulence sur la puissance d'électricité générée du TEG8.	36
Figure 4.2-2 : Effet d'insert initiateur de turbulence avec panneaux sur la puissance d'électricité générée du TEG12 comparé à la puissance générée sans insert.	37
Figure 4.2-3 : Effet d'insert initiateur de turbulence avec panneaux sur la puissance d'électricité générée du TEG40 comparé à la puissance générée sans insert.	37
Figure 4.3-1 : Effet sur la puissance générée du générateur TEG12 d'une variation de débit d'eau chaude et d'eau froide sur.	39
Figure 4.3-2 : Effet sur la puissance générée du générateur TEG8 d'une variation de débit d'eau chaude et d'eau froide sur.	40
Figure 4.3-3 : Puissance générée du générateur TEG8 par rapport au débit pour des gradient de température différents. Le débit d'eau froide est à 10 L/min.	40
Figure 4.4-1 : Rendement du générateur TEG8 par rapport au débit d'eau chaude pour plusieurs gradients de température sans inserts initiateurs de turbulence. Le débit d'eau froide est à 10 L/min et la résistance externe est 1 Ohm.	42
Figure 4.4-2 : Rendement du générateur TEG8 par rapport à la dissimilitude de température pour plusieurs débits d'eau chaude sans inserts initiateurs de turbulence. Le débit d'eau froide est à 10 L/min et la résistance externe est à 1 Ohm.	43
4.5.1-1 : Rapport de la résistance interne prédite du modèle avec la résistance optimale mesurée. Le débit d'eau chaude est à 5 L/min et le débit d'eau froide	

variant est indiqué dans le graphique. L'insert initiateur de turbulence panneaux 5/16 pouce est présent et la résistance externe est de 1 Ohm.....	44
Figure 4.5.2-1 : La puissance maximale d'électricité générée prédite par équation 2.3.2-2 comparée avec la puissance générée du générateur TEG12 avec une résistance externe optimale de 17 Ohm.....	45
Figure 4.5.2-2 : La puissance maximale d'électricité générée prédite par équation 2.3.2-2 comparée avec la puissance générée du générateur TEG40 avec une résistance externe optimale de 17 Ohm.....	46
Figure 4.6-1 : Voltage du générateur TEG8 avec une résistance externe d'un Ohm et l'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.	47
Figure 4.6-2 : Courant en Ampères du générateur TEG8 avec une résistance externe d'un Ohm et l'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.	48
Figure 4.6-3 : Comparaison de la dissimilitude de température du générateur TEG8 et de ses modules intérieurs. La résistance externe est d'un Ohm et l'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.	49
Figure 4.6-4 : Voltage du générateur TEG12 avec une résistance externe d'un Ohm et l'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.	50
Figure 4.6-5 : Courant en Ampères du générateur TEG12 avec une résistance externe d'un Ohm et l'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.	50
Figure 4.6-6 : Comparaison de la dissimilitude de température du générateur TEG12 et de ses modules intérieurs. La résistance externe est d'un Ohm et l'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.	51
Figure 4.6-7 : Voltage du générateur TEG40 avec une résistance externe d'un Ohm et un débit d'eau chaude de 5 L/min. L'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.	52
Figure 4.6-8 : Courant en Ampères du générateur TEG40 avec une résistance externe d'un Ohm et un débit d'eau chaude de 5 L/min. L'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.....	52
Figure 4.6-9 : Comparaison de la dissimilitude de température du générateur TEG12 et de ses modules intérieurs. La résistance externe est d'un Ohm, l'insert	

utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce et le débit d'eau chaude est de 5 L/min.	53
Figure 4.7-1 : Puissance générée du générateur TEG8 à 1 Ohm avec une perte de charge fixée. Le débit d'eau chaude est à 5 L/min et l'insert est de panneaux à chaque 5/16 de pouce et sans.	55
Figure 4.7-2 : Puissance générée du générateur TEG12 à 1 Ohm avec une perte de charge fixée. Le débit d'eau chaude est à 5 L/min et l'insert est de panneaux à chaque 5/16 de pouce et sans.	55
Figure 4.7-3 : Puissance générée du générateur TEG40 à 1 Ohm avec une perte de charge fixée. Le débit d'eau chaude est à 5 L/min et l'insert est de panneaux à chaque 5/16 de pouce et sans.	56
Figure 4.8-1 : Comparaison de la puissance générée du générateur de Niu, Yu et Wang (2009) de 56 modules aux générateurs de cette étude TEG8 et TEG40. ...	57
Figure 4.8-2 : Comparaison du rendement du générateur de Niu, Yu et Wang (2009) de 56 modules aux générateurs de cette étude TEG40.	58
Figure 4.9-1 : Représentation visuel de la capacité de production maximale du générateur TEG40.	59
Figure 6.2-1 : Énergie non-exploitée sous forme de chaleur résiduelle d'une fonderie d'aluminium (Roe, 2006).	62
Figure 6.2-2 : Conduit de gaz en provenance d'une fonderie d'aluminium (Roe, 2006).....	63
Figure 7.1-1 : Rangés de serveurs entreposés dans le centre de traitement de données de Primus télécommunication à Ottawa.....	65
Figure 7.1-2 : Aménagement fait au système de refroidissement pour accommoder un test alpha.....	66
Figure 7.3-1 : Nouvelle conception de forme géométrique d'un générateur thermoélectrique.....	68
Figure 7.4-1 : Générateur thermoélectrique adapté aux fluides gazeux et description du transport thermique d'un caloduc.	69
Figure 7.5-1 : Description du transport thermique résultant en une conversion de rayons solaires en électricité sans photovoltaïques.	70

NOMENCLATURE

Symbol	Quantité	Unité SI
A	Surface d'un thermocouple contre la céramique du module	m^2
c_p	Capacité thermique	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
D	Diamètre des conduites d'eau	m
E	Énergie thermique et mécanique	J
\dot{E}_e	Énergie entrante	J
\dot{E}_g	Énergie générée	J
\dot{E}_s	Énergie sortante	J
\dot{E}_{st}	Énergie stockée	J
f	Force par unité de volume	$N \cdot m^{-2}$
F	Force	N
I	Courant généré	A
k	Conductivité thermique	$K^{-1} \cdot m^{-1}$
L	Hauteur d'un module thermoélectrique	m
N, N_{mo}	Nombre de module	-
N_{ic}	Nombre de thermocouple	-
p	Pression	$N \cdot m^{-2}$
P	Puissance	W
q	Taux de transfert thermique	W
\dot{q}	Génération d'énergie par unité de volume	$W \cdot m^3$
q''	Flux thermique	$W \cdot m^{-2}$
R_{int}	Résistance intérieur	Ω
R_{ext}	Résistance extérieur	Ω
R_{opt}	Résistance extérieur optimale	Ω
Re	Nombre Reynold	-
Re_D	Nombre Reynold dans cylindre de diamètre D	-
T	Température	K
$TEG8$	Générateur thermoélectrique de 8 modules	-
$TEG12$	Générateur thermoélectrique de 12 modules	-
$TEG40$	Générateur thermoélectrique de 40 modules	-
$TEG56$	Générateur thermoélectrique de 56 modules	-
V	Voltage	V

\dot{V}	Débit	m^3s^{-1}
α	Coefficient Seebeck	$\mu\text{V}\text{K}^{-1}$
η	Rendement : Puissance électrique générée par rapport à l'énergie thermique extraite de l'eau chaude	-
μ	viscosité.	$\text{N}\cdot\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$
$\rho = \frac{1}{\sigma}$	Résistivité électrique	$\Omega\cdot\text{m}$
ρ_l	Densité du liquide	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
σ	Conductivité électrique	$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$
ΔT	Dissimilitude de Température	-

Indice	Signification
---------------	----------------------

<i>act</i>	actuel
<i>C</i>	Côté froid
<i>H</i>	Coté chaud
<i>m</i>	valeur mesurée
<i>p</i>	valeur prédite

1. INTRODUCTION

1.1. Rejets thermiques industriels

Dans les industries de transformation, les procédés énergivores sont soumis aux lois de la thermodynamique. Ces lois stipulent qu'il est impossible de refroidir un corps sans nécessairement en réchauffer un autre. Le refroidissement des procédés des installations industrielles est donc essentiel pour assurer la capacité de production des produits qui requièrent un apport d'énergie.

Dans plusieurs cas, le refroidissement est assuré en partie par l'air ambiant sous forme de convection naturelle ou forcée. Dans une majorité d'entre eux, le refroidissement aéraulique est insuffisant pour évacuer les surplus de chaleur générée par les procédés. Donc, dans la majorité des situations, la gestion des échanges thermiques est assurée par des échangeurs de chaleur qui produisent une eau chaude ultimement libérée à pression atmosphérique et à température variable à l'environnement.

1.2. Impact sur l'environnement

Les rejets thermiques hydrauliques sont ainsi des déchets qui sont évacués à l'environnement, habituellement dans une étendue d'eau ou un cours d'eau. Cet apport de chaleur sous forme d'eau chaude a nécessairement un impact négatif sur les écosystèmes affectés, impact qui peut devenir prépondérant en fonction des débits relatifs du rejet et du réservoir dans lequel il est déversé.

Si auparavant la société faisait peu de cas de ce type de pollution, aujourd'hui elle est sensibilisée à tout type d'altération aux écosystèmes. Alors pourquoi cette énergie n'est-elle pas récupérée et exploitée?

1.3. Récupération

L'eau chaude rejetée à l'environnement et provenant de procédés industriels contient certes de l'énergie, souvent en grande quantité en raison des débits impliqués. Toutefois, il s'agit d'une forme d'énergie de faible exergie ou si l'on préfère d'énergie dégradée. Il est difficile de la récupérer et jusqu'à aujourd'hui considéré peu rentable de le faire.

Trois types de récupération sont possibles : l'utilisation directe dans des applications ou de l'eau à température modérée est requise (par exemple en sericulture), l'utilisation indirecte où cette eau est injectée dans un procédé dans lequel on ajoute de l'énergie pour une fin donnée, et enfin, le but de cette étude, l'utilisation de cette eau chaude afin de produire la forme la plus noble (à l'exergie la plus élevée) d'énergie : l'électricité.

Cette énergie peut alors être employée directement sur le site de production ou injectée dans le réseau électrique. Le site devient alors centre de production décentralisé au même titre qu'une ferme solaire ou éolienne tout en ayant un impact positif sur l'environnement et sur le bilan carbone de l'industrie.

Aujourd'hui, l'énergie sous forme de chaleur rejetée à l'environnement qui était auparavant perçue comme une énergie trop pauvre pour être exploitée rentablement commence à être reconnue comme une source d'énergie à exploiter mais encore loin de son potentiel (Ozalp, 2009). Afin d'y arriver, ce projet expérimental étudie la viabilité d'une génération thermoélectrique alimentée par cette chaleur résiduelle. À cette fin, un générateur thermoélectrique a été conçu avec des modules thermoélectriques du semi-conducteur Bismuth Telluride intégrés ainsi qu'une installation d'essai. Les expériences ont examiné l'influence des inserts de turbulence, de la résistance externe et de la dissimilitude de température des liquides sur la puissance générée. Les résultats serviront à optimiser la chaîne d'événements concernée afin de conceptualiser un générateur thermoélectrique rentable à l'échelle industrielle.

1.4. Travaux antérieurs

Crane et Jackson (2004) ont modélisé numériquement un échangeur de chaleur typique de certains systèmes de refroidissement industriels afin de montrer que les générateurs thermoélectriques tels que proposé ici pourraient fonctionner conjointement avec des échangeurs de chaleur pour produire de l'électricité à l'échelle industrielle. Sandoz-Rosado et Stevens (2009) ont détaillé le progrès qui est en cours sur le rendement des matériaux thermoélectriques maintenant et bientôt disponibles sur le marché afin de montrer que les systèmes utilisant des générateurs thermoélectriques seront l'objet d'avancements majeurs dans les années qui viennent. À ce jour, le matériel Bi₂Te₃ a été identifié comme le semi-conducteur le plus performant par Crane et Bell (2006) et Kajikawa et Onishi (2008) pour un domaine d'application de 0°C à 150°C. Typiquement, la chaleur résiduelle industrielle tombe dans cette plage de température. Récemment, en 2009, Niu, Yu et Wang (2009) ont optimisé un générateur thermoélectrique avec du Bi₂Te₃ pour convertir la chaleur dégradée de faible température en électricité. Presque en parallèle, un prototype primitif qui était encore plus efficace que celui de Niu, Yu et Wang, en termes de puissance générée par rapport à la quantité de chaleur injectée et la quantité de Bi₂Te₃ utilisé, a été conçu et testé par notre équipe (Figures 1 et 2). Ces dernières études, ainsi que celles de Rodriguez et al. (2009) et Kiran-Ciliz (2003), sur les avancements des générateurs thermoélectriques et les bénéfices écologiques et économiques d'une conversion de chaleur résiduelle montrent qu'il est vraisemblable qu'une nouvelle conception de générateur thermoélectrique, rentable à l'échelle industrielle, est maintenant réalisable.

2. MODÈLE MATHÉMATIQUE

2.1. Effet Seebeck

Le mécanisme de la conversion de chaleur en électricité exploité dans cette étude est l'effet thermoélectrique Seebeck : lorsque les éléments d'un thermocouple

d'un semi-conducteur, thermiquement parallèles de type négatif et de type positif, sont en contact avec une dissimilitude de température aux extrémités, une force électromotrice est créée.

Les prototypes utilisés dans cette étude ont été conçu de façon à insérer les thermocouples en sandwich entre un échangeur de chaleur qui injecte de la chaleur et un dissipateur de chaleur qui éjecte celle qui est récupérée afin de maintenir le gradient de température nécessaire pour l'effet Seebeck.

2.2. Équation de la chaleur

L'équation de la chaleur est en conséquence d'un équilibre d'énergie. La conservation d'énergie exige que, pour un système fermé, la somme d'énergie entrante \dot{E}_e et l'énergie générée \dot{E}_g doit être égale à la somme d'énergie sortante \dot{E}_s et l'énergie stockée \dot{E}_{st} du système.

$$2.2-1 \quad \dot{E}_e + \dot{E}_g = \dot{E}_s + \dot{E}_{st}$$

Dans le contexte d'une transformation de chaleur en électricité grâce aux effets thermoélectriques, les énergies entrantes et sortantes sont des flux thermiques à l'entrée et à la sortie du système, l'énergie générée est de la chaleur transformée en électricité et l'énergie stockée est le taux de variation d'énergie thermique par la matière du système. En état stable, ce dernier est nul

L'équation de la chaleur est développée en considérant l'équilibre d'énergie d'un volume infinitésimal illustré ci-dessous.

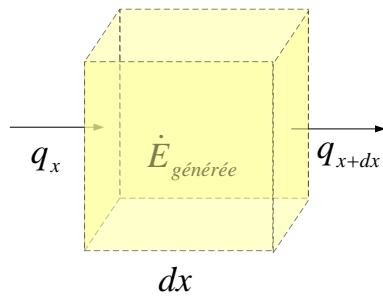


Figure 2.2-1 : Volume infinitésimal

La conservation d'énergie, équation 2.2-1, sur un infinitésimal implique que

$$2.2-2 \quad q_x + \dot{q}dx dy dz = \underbrace{q_x + \frac{dq_x}{dx} dx}_{q_{x+dx}} + 0$$

où \dot{q} est la génération d'énergie par unité de volume. Aussi, q_x est le taux de transfert thermique à travers la surface $dydz$ à la position x et $q_{x+dx} = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx$ est le taux de transfert thermique à travers la surface $dydz$ à la position $x+dx$.

L'équilibre ci-dessus se simplifie donc en,

$$2.2-3 \quad -\frac{dq_x}{dx} + \dot{q}dydz = 0$$

La loi de Fourier de conduction constate que le flux thermique à travers une surface est proportionnel au gradient de température tel que $q'' = -k \frac{dT}{dx}$ où q'' est le flux thermique par unité de surface. L'équation ci-dessus se réduit donc sous la forme de l'équation de la chaleur,

$$2.2-4 \quad \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) - \dot{q} = 0$$

2.3. Module thermoélectrique en une dimension

Le but de la modélisation mathématique d'un module thermoélectrique est de décrire les phénomènes physiques responsables de la conversion de chaleur en électricité d'une façon analytique afin d'optimiser la chaîne d'événements. La discussion suivante exprimera la puissance électrique générée en termes de paramètres qu'on peut contrôler en laboratoire et proposera des conditions optimales dans la maximisation de puissance électrique générée.

Le modèle suivant considère un module thermoélectrique avec un nombre N de thermocouples d'où chaque thermocouple est constitué d'un semi-conducteur de type-n et d'un semi-conducteur de type-p. Les deux métaux sont en jonction avec des céramiques; voir la Figure 2.3-1 .

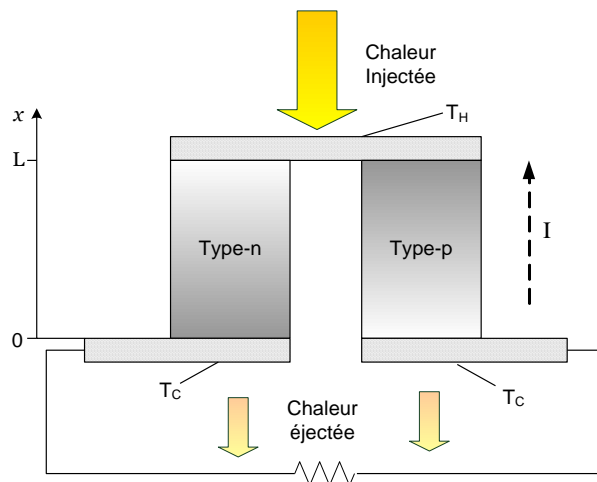


Figure 2.3-1 : Gradient de température à travers un thermocouple

Le modèle suppose que les propriétés sont constantes et isotropiques et que le coefficient Seebeck de matériaux d'interconnexion est zéro. Dans ce modèle, la génération d'énergie qui apparaît dans l'équation 2.2-4 sera la transformation de chaleur en électricité grâce à l'effet Seebeck. D'après la loi d'Ohm, l'énergie générée serait I^2R et donc par unité de volume et la définition de la résistance

d'un système $R = \frac{\rho L}{A}$ d'où ρ est la résistivité du matériau, l'équilibre énergétique devient,

$$2.3-1 \quad \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{I^2\rho}{kA^2} = 0$$

En considérant les bornes $T(x=0) = T_C$ et $T(x=L) = T_H$, l'équation de la chaleur est intégrée,

$$2.3-2 \quad T = -\frac{I^2\rho}{2kA^2}x^2 + \left(\frac{I^2\rho L}{2kA^2} + \frac{\Delta T}{L}\right)x + T_C$$

d'où $\Delta T = T_H - T_C$.

La conservation d'énergie à travers un module thermoélectrique exige que le flux thermique sortant soit égale au flux thermique entrant moins l'énergie absorbée par l'effet Seebeck. C'est-à-dire,

$$2.3-3 \quad q_C = q_H - I\alpha_{p,n}T_H$$

d'où $\alpha_{p,n} = \alpha_p - \alpha_n$ est la différence des coefficients Seebeck des deux semi-conducteurs du thermocouple.

La loi de conduction de Fourier stipule que $q_C = k(2A)\frac{dT}{dx}\big|_{x=L}$. On remarque que l'aire de chaque élément du thermocouple est considérée dans cette loi de Fourier et qu'elles sont égales. Le gradient de température en position $x=L$ est calculée à partir de l'équation 2.3-2. L'équilibre énergétique devient donc,

$$2.3-4 \quad q_H = \frac{2kA}{L}\Delta T - \frac{I^2\rho L}{A} + I\alpha_{p,n}T_H$$

Du côté froid du flux thermique en $x=0$, l'équilibre énergétique implique que $q_H = q_C - I\alpha_{p,n}T_H$. L'équation 2.3-2 devient,

$$2.3-5 \quad q_C = \frac{2kA}{L}\Delta T + \frac{I^2\rho L}{A} + I\alpha_{p,n}T_C$$

La puissance d'un module serait donc la somme de la dissimilitude thermique de ces N thermocouples,

$$2.3-6 \quad P = N(q_H - q_C) = -I^2\left(\frac{2N\rho L}{A}\right) + NI\alpha_{p,n}\Delta T$$

La puissance prédite ci-dessus sera comparée avec des résultats expérimentaux de cette étude.

2.3.1. Résistance interne d'un module thermoélectrique

Maintenant qu'une expression de la puissance générée est à la disposition, il est nécessaire de l'exprimer en termes de la résistance électrique externe imposée sur le système est de trouver son maximum en fonction de cette dernière.

On remarque que $\frac{2N\rho L}{A}$ n'est que la résistance de l'ensemble des éléments des thermocouples à l'intérieur du générateur.

$$2.3.1-1 \quad I^2R_{ext} = -I^2R_{int} + NI\alpha_{p,n}\Delta T$$

L'équation ci-dessus permet de calculer la résistance interne d'un module en isolant le terme R_{int} .

$$2.3.1-2 \quad R_{int} = \frac{NI\alpha_{p,n}\Delta T}{I} - R_{ext}$$

2.3.2. Puissance maximale générée

En supposant un courant non nul l'équation 2.3-6 couplée avec l'équation 2.3.1-1 mène à une expression de la puissance contenant la résistance interne et la résistance externe étant des variables indépendantes.

$$2.3.2-1 \quad P = \frac{(N\Delta T\alpha_{p,n})^2}{R_{\text{int}} + R_{\text{ext}}} - \frac{(N\Delta T\alpha_{p,n})^2 R_{\text{int}}}{(R_{\text{int}} + R_{\text{ext}})^2}$$

Une analyse d'optimisation de la puissance montre que le rendement maximal d'électricité a lieu quand la résistance externe imposée sur le système est égale à la résistance interne du module. C'est-à-dire, en respectant l'égalité $\frac{dP}{dR_{\text{ext}}} = 0$, une résistance externe optimale est démontrée d'être $R_{\text{opt}} = R_{\text{int}}$. Les conditions de puissance électrique maximale générée par le générateur thermoélectrique en laboratoire seront comparées avec la puissance générée prédite, équation 2.3.2-1 avec $R_{\text{int}} = R_{\text{ext}} = R_{\text{opt}}$.

$$2.3.2-2 \quad P = \frac{(N\Delta T\alpha_{p,n})^2}{4R_{\text{opt}}}$$

2.3.3. Résistance électrique externe optimale

La résistance électrique optimale du générateur est calculée à partir de l'équation 2.3.1-1 et l'égalité $R_{\text{int}} = R_{\text{ext}} = R_{\text{opt}}$,

$$2.3.3-1 \quad R_{\text{opt}} = \frac{N\alpha_{p,n}\Delta T}{2I}$$

Ce résultat analytique stupéfiant a été démontré par Hodes (2004). Un des objectifs de cette étude sera de valider expérimentalement la puissance maximale démontrée ci-dessus.

2.4. Rendement

Le rendement d'un générateur thermoélectrique sera défini étant le rapport d'énergie générée sous forme d'électricité et le flux thermique entrant (Guo, Xiao, & Yang, 2010). Elle est donc définie étant,

$$2.4-1 \quad \eta = \frac{P}{\dot{V}_H \rho_H c_{p,H} \Delta T_H}$$

D'où $\dot{V}_H \rho_H c_{p,H} \Delta T_H$ est le gain net de chaleur du générateur et P est la puissance en électricité générée.

3. MONTAGE EXPÉRIMENTAL

3.1. Schématique du montage

La représentation schématique du montage expérimental d'un générateur thermoélectrique de température faible est illustrée dans la Figure 3.1-1. Le système consiste principalement d'un convertisseur de chaleur en électricité, une conduite d'eau chaude et deux conduites d'eau froide.

Il est important de noter que le débit d'eau chaude et le débit d'eau froide sont en contre-courant. Ceci est nécessaire afin de stabiliser la température à travers les semi-conducteurs de Bi_2Te_3 . En effet, si les liquides courent en parallèles la dissimilitude de température entre les deux diminuerait en raison de leur interaction thermique. Cet affaiblissement de gradient de température réduirait l'effet Seebeck et en conséquence aussi la puissance électrique générée.

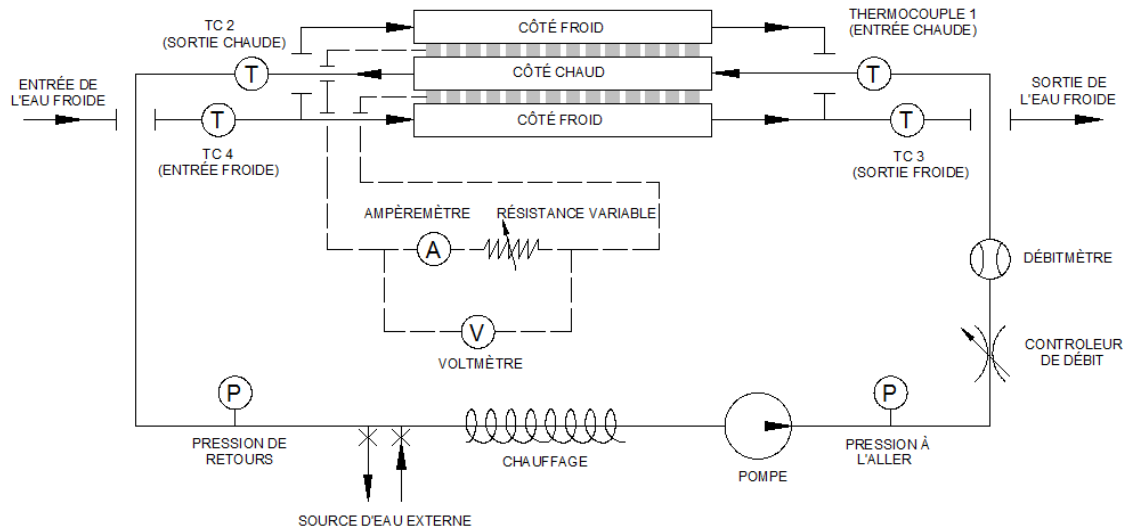


Figure 3.1-1 : Schématique du montage expérimental.

3.2. Modules Thermoélectriques

Le principe thermoélectrique de base d'un module thermoélectrique est illustré dans le schéma ci-dessous. Le module est constitué de semi-conducteurs placés en série alternée entre un de type négatif qui favorise un courant porteur de charges négatives et un de type positif qui favorise un courant porteur de charges positives. Ceci forme des thermocouples connectés électriquement en série et thermiquement en parallèle.

En mode de refroidissement, un courant électrique alimente le module. La chaleur est pompée d'un côté du semi-conducteur vers l'autre (effet Peltier), ce qui génère un gradient de température, une face devenant plus froide que l'autre.

En mode inversé, si un gradient de température est maintenu à travers le module, le flux de chaleur traversant le module est converti en énergie électrique. C'est cet effet thermoélectrique inversé non exploité qui sera employé dans ce projet (Rowe, 2006).

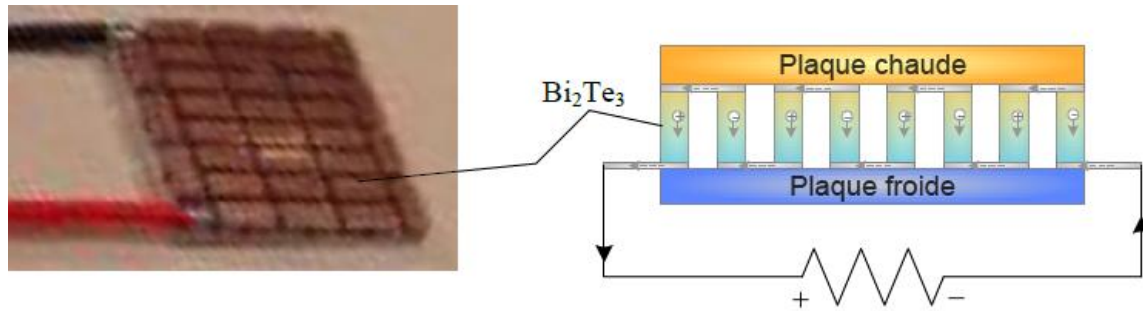


Figure 3.2-1 : Production d'une tension électrique à partir d'un gradient de température.

3.3. Générateurs thermoélectriques

Dans cette étude, trois générateurs thermoélectriques ont été conçus afin de tester tous les paramètres de fonctionnement sur la production d'électricité maximale.

Chaque générateur est fabriqué d'aluminium avec des modules thermoélectriques insérés à l'intérieur. Chaque module contient une couche du semi-conducteur Bismuth Telluride Bi_2Te_3 sandwichée par deux couches de céramique non-conductrices. Les modules sont de 30 mm par 30 mm par 4,8 mm. Le premier générateur contient 8 modules et mesure 4,92 pouces par 3,57 pouces par 0,68 pouce, le deuxième contient 12 modules et le plus gros générateur contient 40 modules et mesure 18,59 pouces par 3,57 pouces par 0,68 pouces. Dans cette dissertation, les générateurs de 8 modules, 12 modules et 40 modules seront nommés TEG8, TEG12 et TEG40 respectivement. Les conduites de fluides sont d'un diamètre intérieur de 9,52 mm et d'un diamètre extérieur de 12,7 mm. Le design du TEG12 est illustré dans la Figure 3.3-1 .

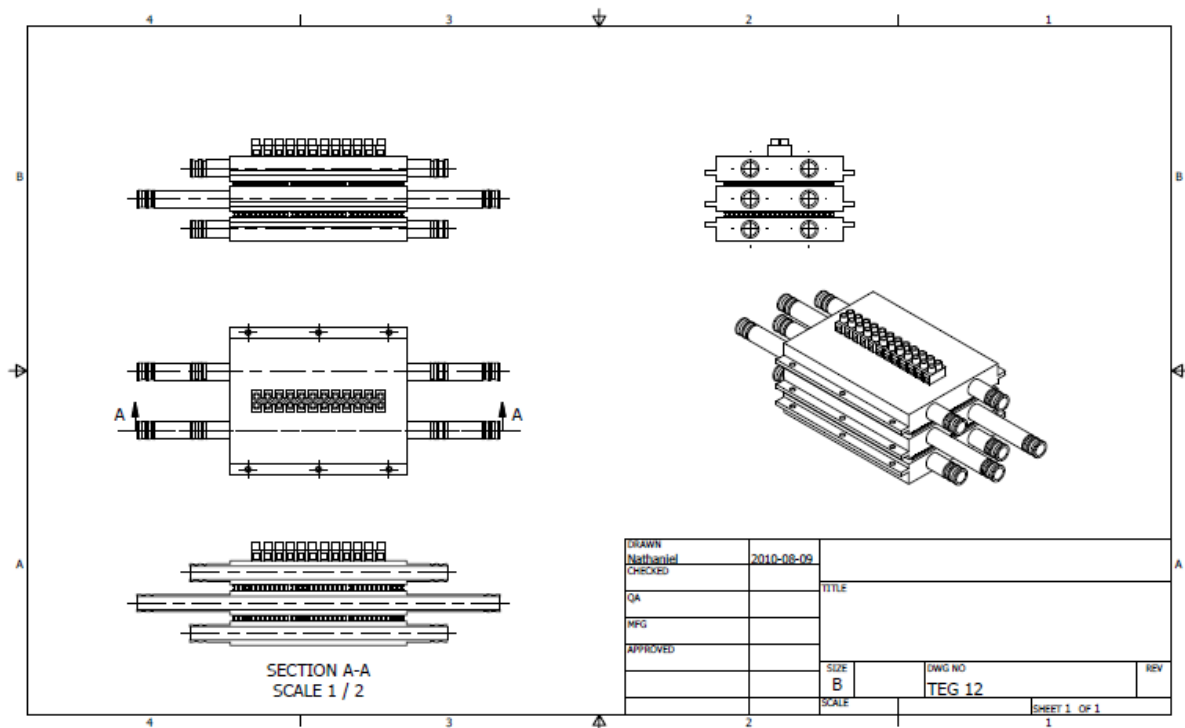


Figure 3.3-1 : Conception du générateur thermoélectrique de 12 modules.

3.4. Variation de la résistance électrique externe

Le choix de la résistance électrique externe imposée sur le système est essentiel pour la production électrique maximale. Afin de mieux étudier ce paramètre une méthode de variation de résistance a été adaptée. L'appareil est un ensemble de plaquette de carbone empilé horizontalement. Un dispositif permet d'appliquer une pression variable sur les plaquettes. En appliquant cette pression le contact électrique entre chacune des plaques améliore ce qui diminue la résistance électrique. Il est possible avec ce rhéostat de faire varier la résistance de 0 à 100 ohms avec une très bonne sensibilité dans la plage de 0-10 ohms. Cet appareil est représenté dans la figure ci-dessous.



Figure 3.4-1 : Rhéostat à compression plaque de carbone utilisé pour faire varier la résistance externe imposée sur le générateur thermoélectrique.

3.5. Installation d'essais

Une installation d'essai et de simulation industrielle a été mise au point avec une excellente précision sur le contrôle du débit d'eau chaude, la dissimilitude de température entre l'entrée froide et l'entrée chaude et la résistance électrique externe imposée sur le système. L'interface ScienceWorkshop 750 est l'appareil qui permet de faire le lien entre l'ordinateur et les capteurs. Le logiciel DataStudio fournie par Pasco, a été utilisé dans l'acquisition de données. Le générateur thermoélectrique a été isolé par une mousse de polystyrène afin de minimiser la perte thermique par diffusion. Le générateur était aussi entouré par une protection de fibre de verre en cas d'une fuite d'eau chaude.

L'installation au complet, l'isolation thermique d'un générateur et le control du débit et de la température de l'eau chaude, le montage des débitmètres ainsi que le design de la plate-forme sont représentés dans les quatre figures ci-dessous.



Figure 3.5-1 : Installation d'essais réalisée au Cégep de l'Outaouais

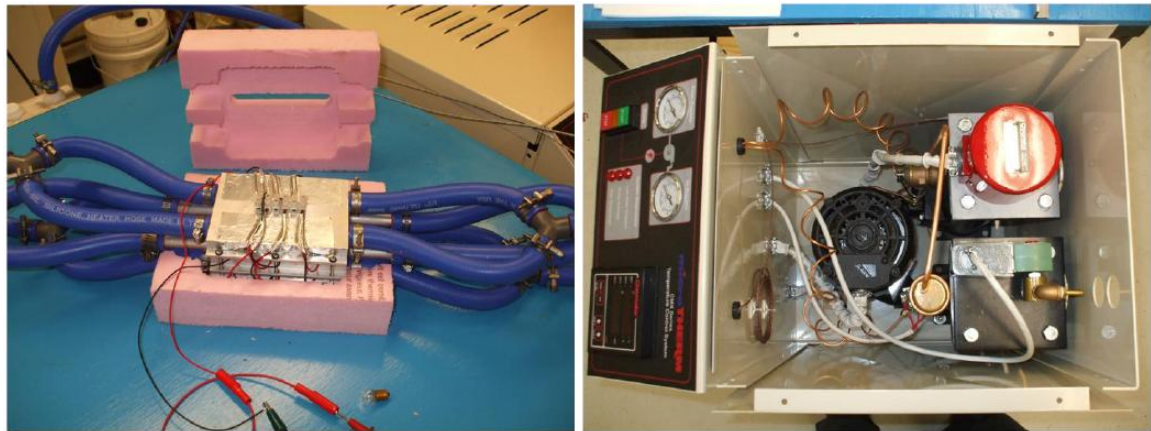


Figure 3.5-2 : Isolation d'un générateur et système de contrôle du débit et de la température de l'eau chaude.

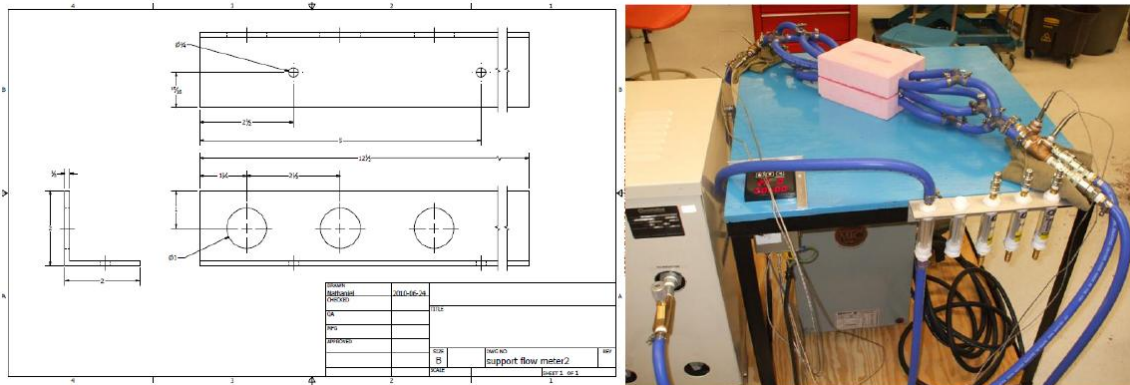


Figure 3.5-3 : Montage des débitmètres.

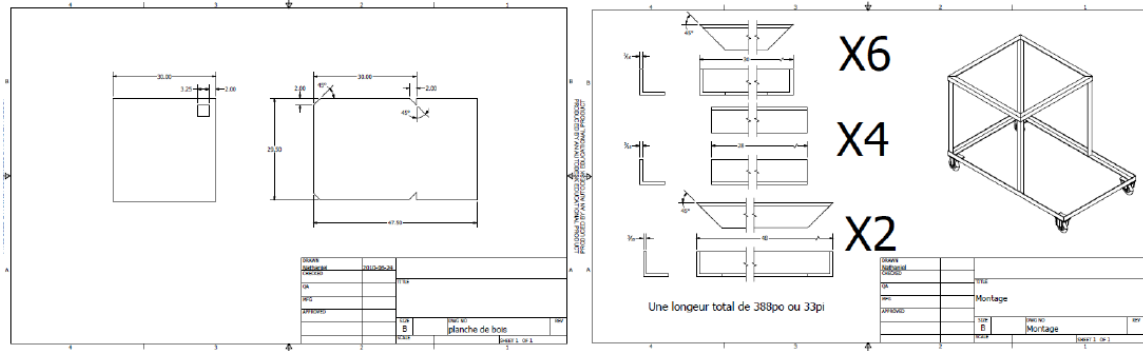


Figure 3.5-4 : Design de la plate-forme de l’installation d’essais.

3.6. Turbulences

Un des paramètres étudiés dans cette investigation est l’effet de turbulence. Il est important de noter que la turbulence est toujours présente dans les conduites d’eau en raison du petit diamètre des tuyaux.

En effet, si le nombre non-dimensionnel Reynold d’un débit de fluide à l’intérieur d’un tuyau est supérieur à 2300 le débit est dans le régime de turbulence. On rappelle que relative à un régime laminaire, lorsque le régime d’un écoulement est turbulent, le coefficient de transport thermique est plus élevé (Incropera, Dewitt, Bergman, & Lavine, 2007). Un régime de turbulence est donc favorable pour mieux injecter de la chaleur du côté chaud d’un module ainsi que pour mieux dissiper la chaleur du côté froid de ce même module. Cependant, pour un tuyau de diamètre de 9,52 mm, comme ils le sont dans cette étude, la turbulence est facilement atteinte, même pour des débits faibles, et elle est tout simplement initiée par les murs intérieurs des tuyaux. Ceci est démontré en calculant un nombre Reynold supérieur à 2300.

Le nombre non-dimensionnel Reynold pour un débit à l’intérieur d’un tuyau de diamètre D est défini étant,

$$3.6-1 \quad Re_D = \frac{4\dot{V}\rho}{\pi D\mu}$$

Dans cette étude, de l'eau a été utilisée entre 20 et 90 degré Celsius avec un débit variant entre 5 et 10 L/min. En appliquant les propriétés de l'eau au nombre Reynold pour cette plage de température et de débit, le domaine du nombre Reynold de cette étude tombe entre 11598,6 et 112285. Ce domaine est entièrement au-dessus du nombre critique de 2300 indiquant que la turbulence est ubiquiste dans toutes les expériences de cette étude. Ceci est souvent le cas pour un écoulement dans un tuyau et en raison de l'omniprésence de la turbulence, il y a une lacune d'études sur l'effet de turbulence sur la puissance électrique générée d'un générateur thermoélectrique.

Cette étude a l'intention d'évaluer l'effet de turbulence initié par des formes géométriques insérées à l'intérieur des conduites d'eau. Les inserts initiateurs de turbulence sont représentés dans la figure ci-dessous. Trois inserts différents ont été utilisés dont une étaient conçu de façon spirale et deux d'ouvertures alternées séparées par 5/8 de pouce et 5/16 de pouce avec des panneaux en pentes.



Figure 3.6-1 : Inserts initiateurs de turbulence.

Les inserts avec des panneaux ont donné un rendement de puissance électrique plus élevé comme il est souligné dans la section 4. L'insert initiateur de turbulence avec des panneaux à chaque 5/16 de pouce a donc été conçu pour

chacun des générateurs. Il a fallu machiner une boîte permettant de percer des trous dans une feuille de cuivre sans compromettre la rigidité de la feuille. Ceci est illustré dans la figure ci-dessous.



Figure 3.6-2 : Fabrication des inserts initiateurs de turbulence.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Variation de la résistance externe

Des expériences ont été réalisées pour trois gradients de température différents. Chaque expérience évaluait la puissance générée par chacun des trois générateurs TEG8, TEG12 et TEG40 avec une résistance externe variable afin d'identifier la résistance externe optimale du générateur. La résistance externe optimale d'un générateur thermoélectrique fut testée ultérieurement (Rodriguez, Vian, Astrain, & Martinez, 2009), (Niu, Yu, & Wang, 2009). Le montage expérimental de Rodriguez, Vian, Astrain, & Martinez et de Niu, Yu, & Wang ne permettait qu'une résistance externe par expérience. En contraste, le montage expérimental de cette étude permettait de varier la résistance externe imposée sur le système durant

une expérience. En conséquence, le comportement de la puissance générée par rapport à la résistance externe et la résistance externe optimale du générateur peuvent être mieux évalués. Les résultats sont résumés dans les trois graphiques suivants du le débit d'eau chaude était de 5 L/min et le débit d'eau froide de 10 L/min.

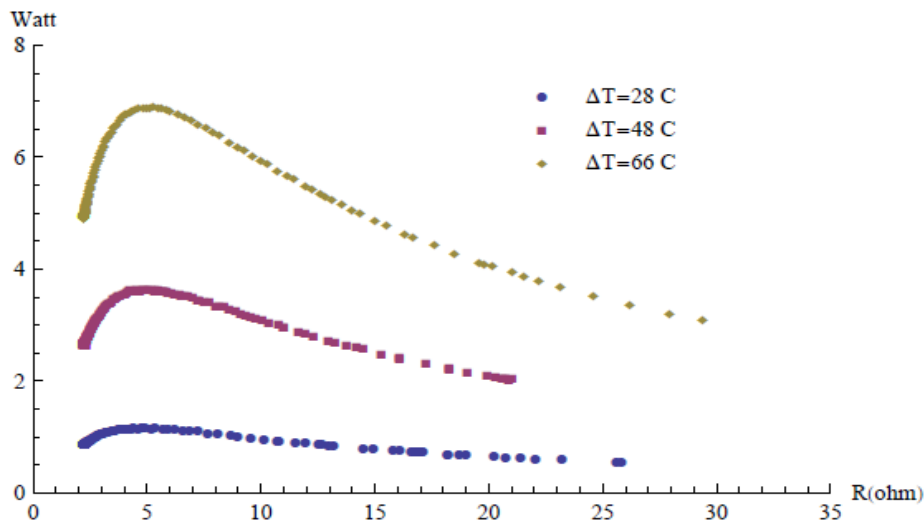


Figure 4.1-1 : Puissance générée du générateur TEG8 avec une variation de résistance externe.

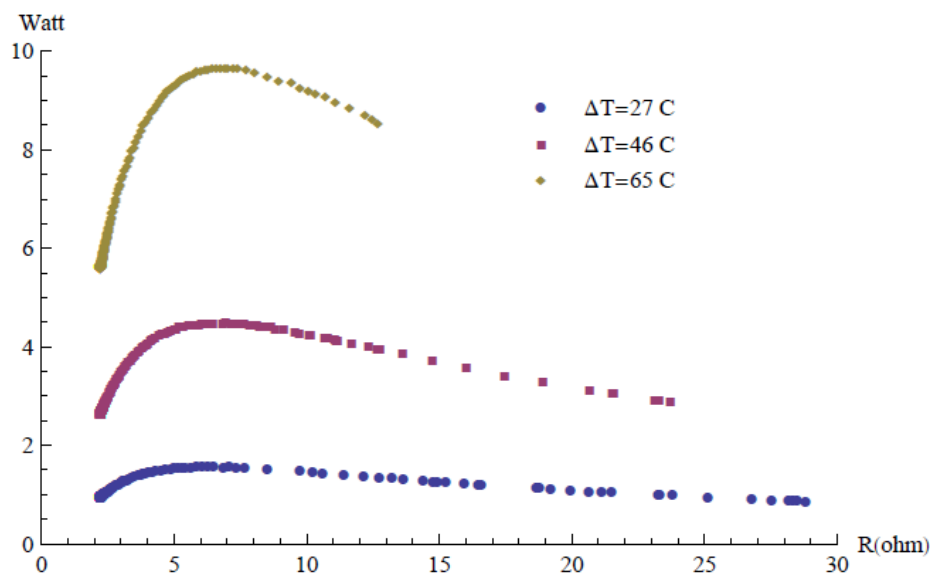


Figure 4.1-2 : Puissance générée du générateur TEG12 avec une variation de résistance externe.

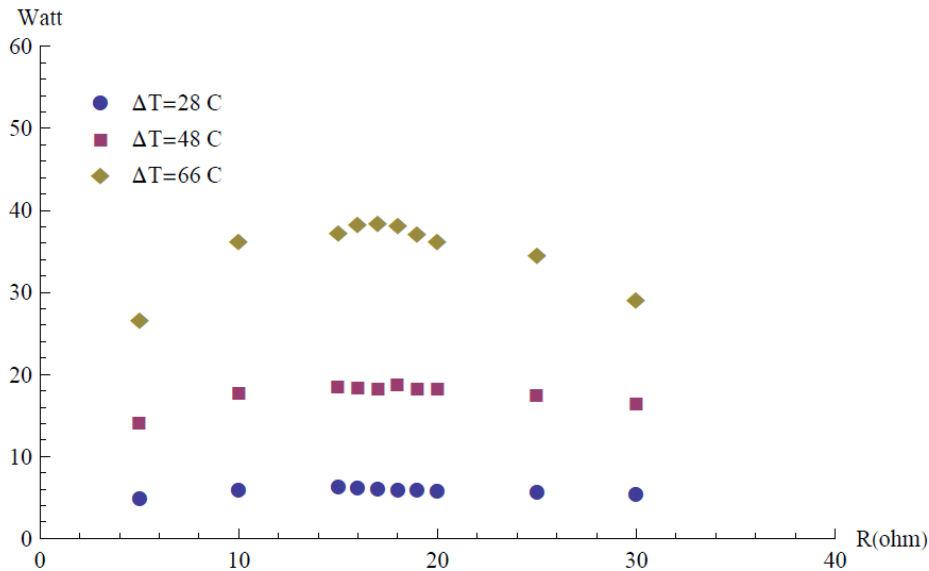


Figure 4.1-3 : Puissance générée du générateur TEG40 avec une variation de résistance externe.

Les résultats indiquent clairement que le choix de résistance externe est essentiel dans la maximisation de puissance générée par un générateur thermoélectrique. Les résistances externes optimales de cette étude ont été identifiées étant 5 Ohm, 7 Ohm et 17 Ohm pour les générateurs TEG8, TEG12 et TEG40 respectivement. Il est noté que le rapport de résistance optimale de deux générateurs approche le rapport de la quantité de Bi_2Te_3 de ces deux derniers. Il est donc vraisemblable qu'il existe une corrélation entre la résistance interne d'un générateur et la résistance externe optimale du générateur comme il est suggéré par l'équilibre énergétique présenté dans le modèle mathématique.

Il fut confirmé dans des études ultérieures (Crane & Bell, 2006) que la résistance externe optimale est égale à la résistance intérieure du générateur. Or, cette étude rentre en contradiction avec les résultats de ce dernier puisque chaque module utilisé de cette étude a une résistance intérieure de 7 Ohm. En raison du nombre de modules dans chaque générateur et de leur connexion en série, il est clair que la résistance intérieure de chaque générateur de cette étude est largement au-dessus de la résistance externe optimale identifiée. On remarque que dans les représentations graphiques des résultats que la résistance externe optimale n'est

pas dépendant du gradient de température. Ceci est mieux noté par les expériences des Figure 4.1-4 à Figure 4.1-8 d'où les courbes représentées dans ces graphiques sont générées par l'ensemble des données de chaque expérience. Celles-ci montrent que la résistance électrique externe optimale d'un générateur demeure invariante malgré une variation de gradient de température, de débit ou d'insert de turbulence. On constate que le choix de résistance externe optimale n'est que dépendant de la quantité de matériaux thermoélectriques utilisés et donc de la résistance interne du générateur. Ceci est consistant avec le modèle mathématique de la section 2.3.

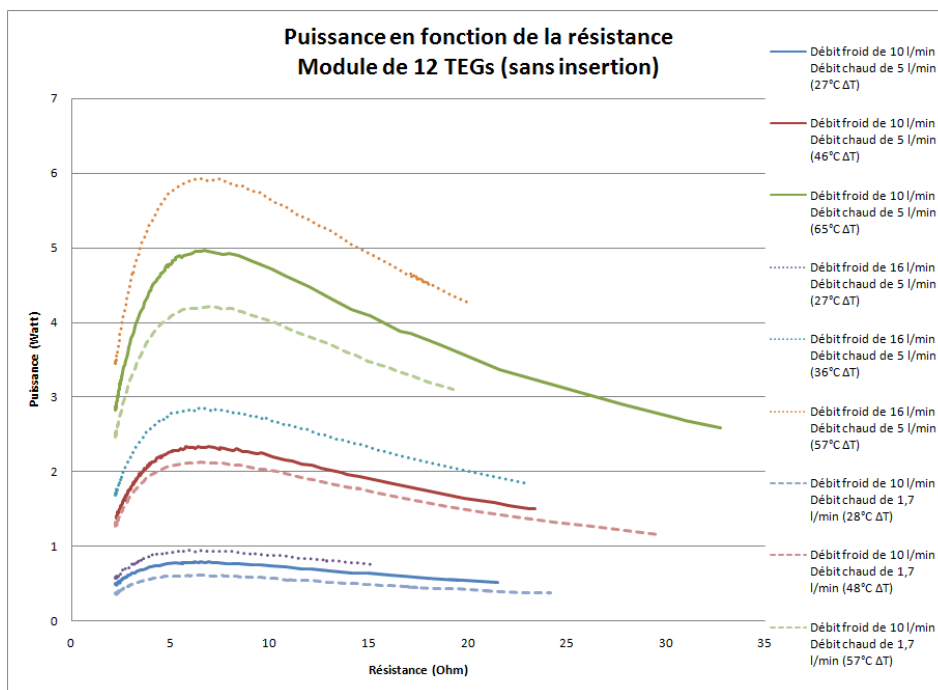


Figure 4.1-4 : Puissance générée du générateur TEG12 avec une variation de résistance externe à plusieurs débits. Une résistance optimale de 7 Ohm est identifiée.

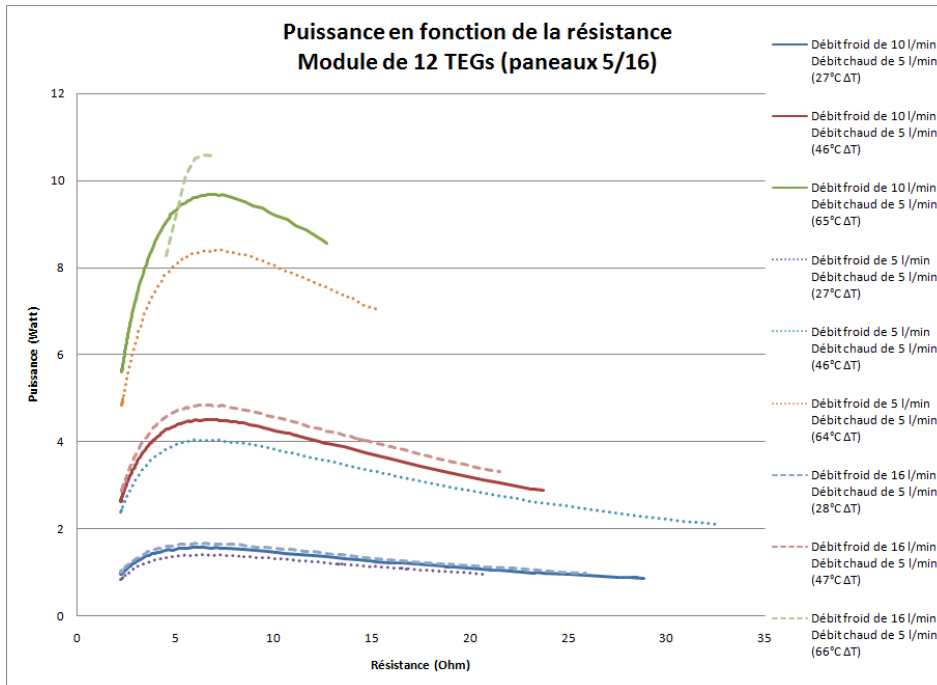


Figure 4.1-5 : Puissance générée du générateur TEG12 avec une variation de résistance externe avec insert initiateur de turbulence. Une résistance optimale de 7 Ohm est identifiée.

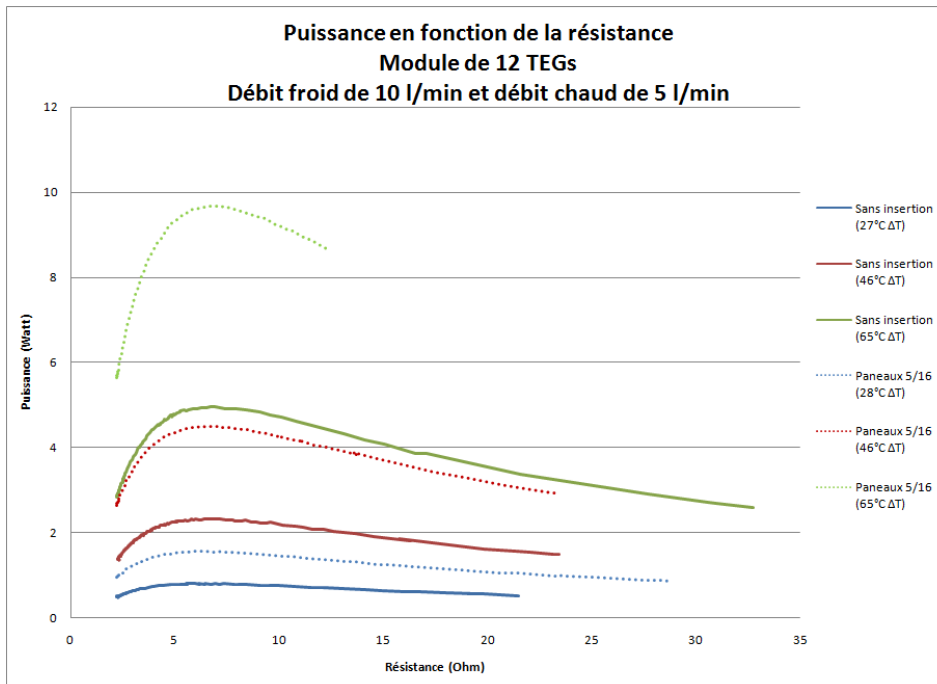


Figure 4.1-6 : Puissance générée du générateur TEG12 avec une variation de résistance externe avec et sans insert initiateur de turbulence. Une résistance optimale de 7 Ohm est identifiée.

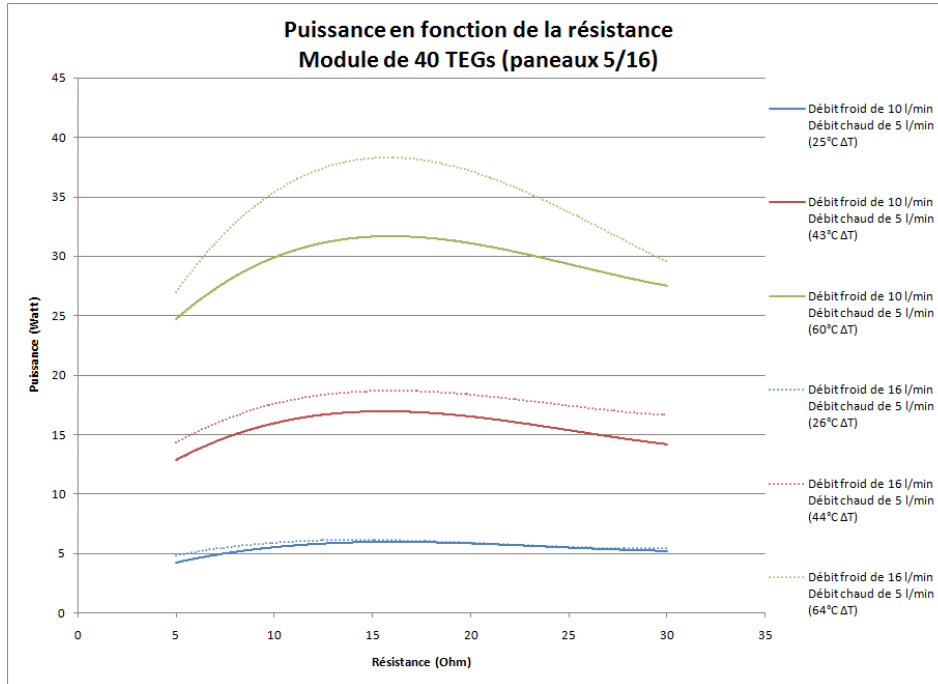


Figure 4.1-7 : Puissance générée du générateur TEG40 avec une variation de résistance externe à plusieurs débits. Une résistance optimale de 17 Ohm est identifiée.

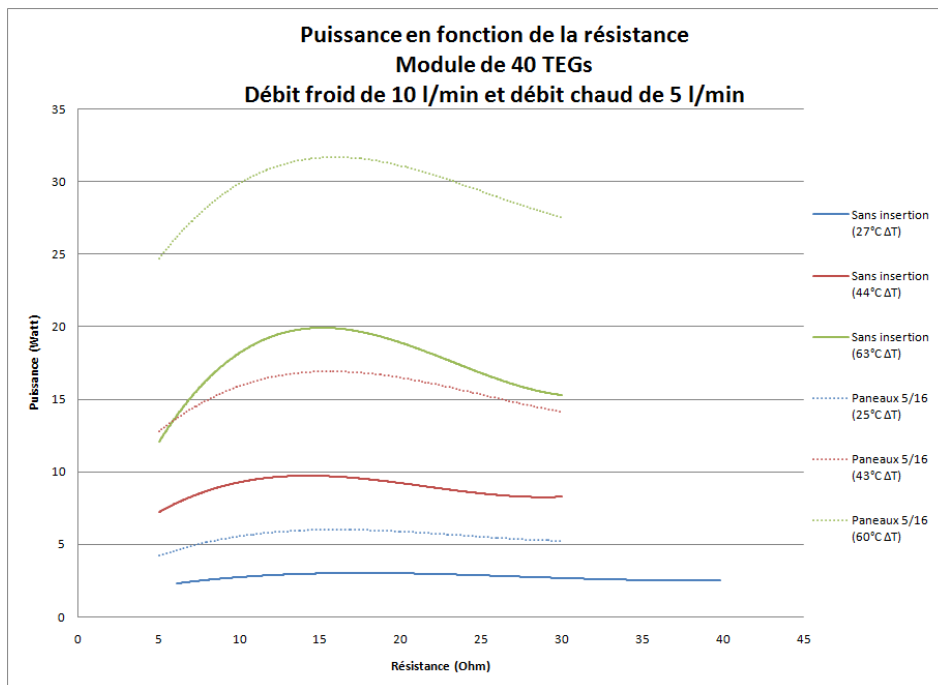


Figure 4.1-8 : Puissance générée du générateur TEG40 avec une variation de résistance externe avec et sans insert initiateur de turbulence. Une résistance optimale de 17 Ohm est identifiée.

Une comparaison de performances des trois générateurs montre qu'effectivement la résistance optimale augmente avec une augmentation de modules thermoélectriques. Ceci est illustré dans la figure ci-dessous d'où les résultats d'une expérience effectuée sur chacun des trois générateurs sont compilés dans le même graphique. Encore, les courbes sont générées par les données des expériences.

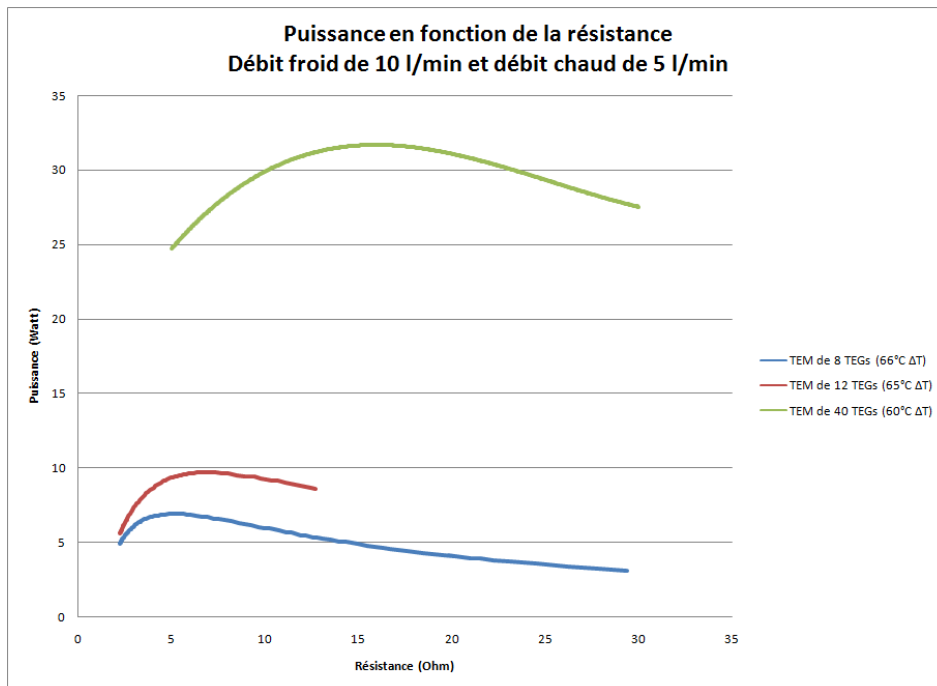


Figure 4.1-9 : Comparaison de la résistance optimale des trois générateurs TEG8, TEG12 et TEG40.

4.2. Effet de turbulence

L'effet d'inserts de turbulence fut étudié avec les inserts décrits dans la section 3.6. Quatre expériences furent réalisées avec le générateur TEG8 afin de comparer la performance du générateur associée à chaque insert. Tous les paramètres ont été constants à l'exception de l'insert utilisé. Les résultats sont illustrés ci-dessous.

Les Figure 4.2-1 à Figure 4.2-3 montrent qu'en effet la puissance électrique générée est améliorée avec un insert d'initiateur de turbulence. En particulier,

l'insert de forme spirale influence faiblement la puissance générée à comparer avec celui des panneaux qui augmente la puissance générée d'une façon significative. Cependant, l'insert avec des panneaux à tous les 5/8 de pouce donne des résultats presque identiques que l'insert avec deux fois plus de panneaux à tous les 5/16 de pouce. L'influence de l'insert initiateur de turbulence est particulièrement évidente dans la Figure 4.2-2 d'où la puissance générée est quasiment doublée en présence de l'insert par rapport à la puissance générée en absence d'insert.

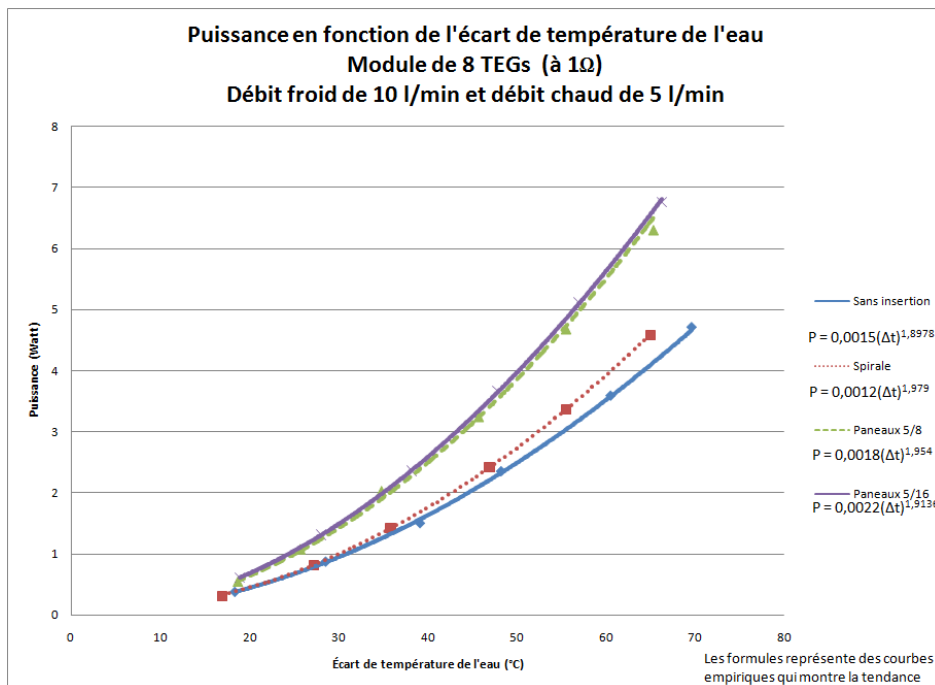


Figure 4.2-1 : Effet des inserts initiateurs de turbulence sur la puissance d'électricité générée du TEG8.

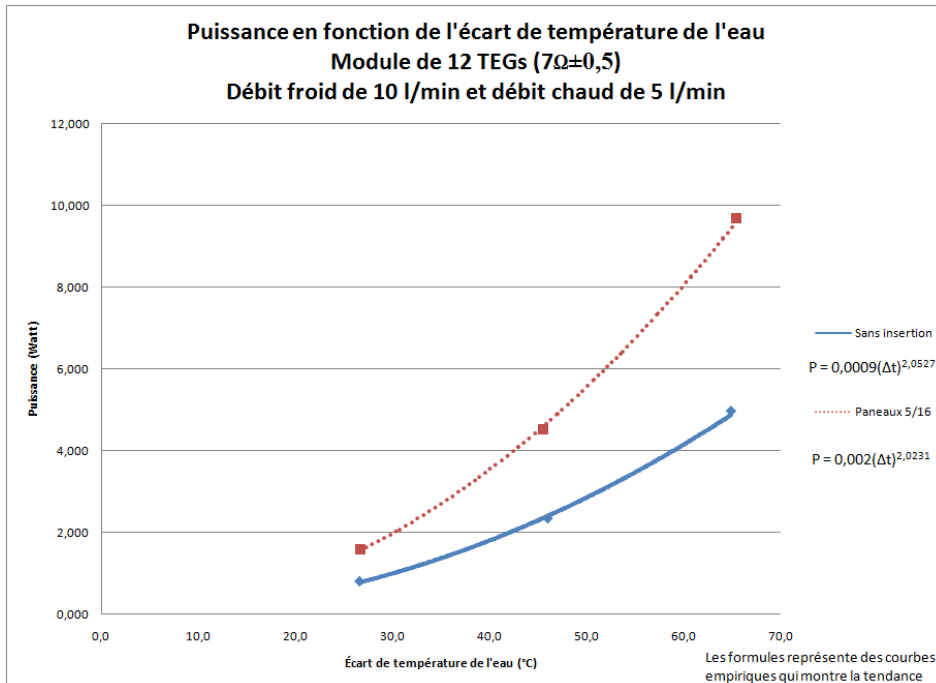


Figure 4.2-2 : Effet d'insert initiateur de turbulence avec panneaux sur la puissance d'électricité générée du TEG12 comparé à la puissance générée sans insert.

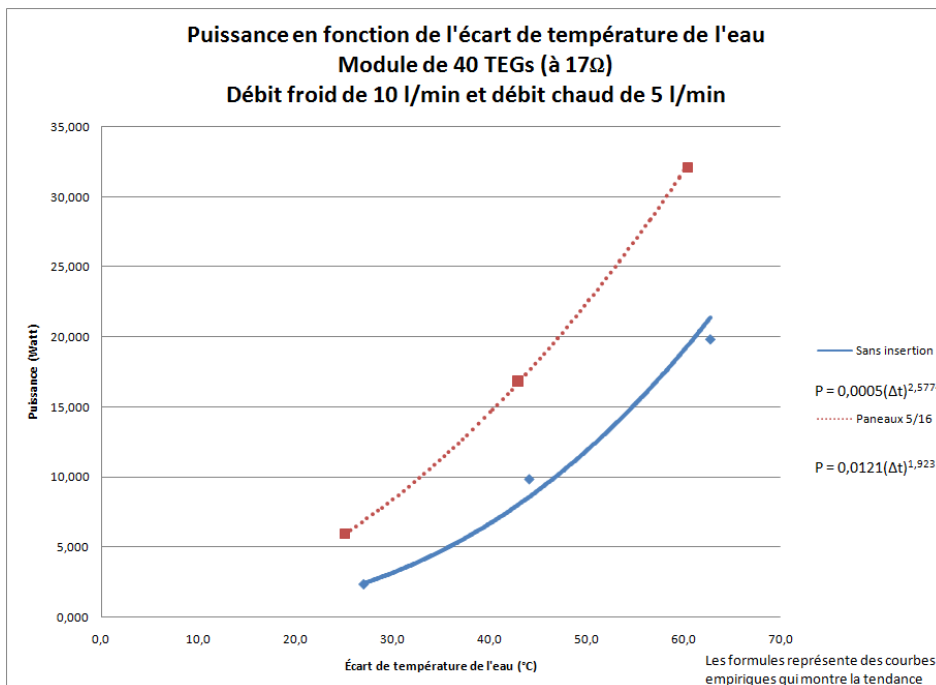


Figure 4.2-3 : Effet d'insert initiateur de turbulence avec panneaux sur la puissance d'électricité générée du TEG40 comparé à la puissance générée sans insert.

4.3. Effet du débit sur la puissance générée

Le rendement d'un générateur est considéré étant le rapport de la puissance générée en électricité par rapport à l'énergie injectée. L'énergie injectée dans les générateurs de cette étude dépend du débit d'eau chaude et de la température de l'eau chaude. Les résultats ci-dessus montrent clairement qu'une augmentation de température augmente la puissance électrique générée du générateur.

Cependant, étant donné que le but de cette étude est d'avancer vers un générateur rentable à l'échelle industrielle, il est important d'étudier l'effet d'une augmentation d'injection de chaleur en augmentant le débit d'eau chaude et non sa température. Il était donc nécessaire de réaliser des expériences variant le débit de l'eau chaude afin d'étudier le rendement optimal d'un générateur plutôt que tout simplement étudier la puissance maximale d'un générateur.

La Figure 4.3-1 et la Figure 4.3-2 montrent clairement qu'une augmentation de débit d'eau chaude augmente la puissance électrique générée du générateur. Ce résultat est attendu en raison du fait qu'une augmentation du débit d'eau chaude implique un flux thermique plus élevé. Cependant, en triplant le débit d'eau chaude, la puissance augmente faiblement. Ceci implique qu'un débit optimal de rendement énergétique qui convient à la taille des conduites d'eau du générateur est à identifier.

On remarque qu'une augmentation du débit d'eau froide d'un générateur sans varier les autres paramètres améliore le rendement électrique du générateur. Si l'eau froide est en abondance, comme il est souvent le cas dans l'industrie canadienne, il serait donc important d'étudier l'équilibre énergétique entre le gain électrique d'un débit d'eau froide élevé avec la dépense énergétique de la pompe à eau.

Les représentations graphiques montrent de courbe de puissance en croissance exponentielle par rapport au gradient de température. L'interprétation est qu'une température plus élevée rendra le générateur plus efficace. Dans une application

industrielle, la température de chaleur résiduelle à exploiter n'est pas un des paramètres contrôlables. Alors, la seule façon de contrôler le flux thermique entrant dans un générateur thermoélectrique est de contrôler le débit de la source chaude. Le débit de la source chaude sera un des paramètres principaux dans l'optimisation d'un générateur.

La Figure 4.3-3 illustre que malgré qu'un débit plus élevé améliore la puissance générée du générateur, la courbe de puissance générée est en croissance légère par rapport au débit d'eau chaude. Une étude du débit optimale du rendement énergétique est donc nécessaire.

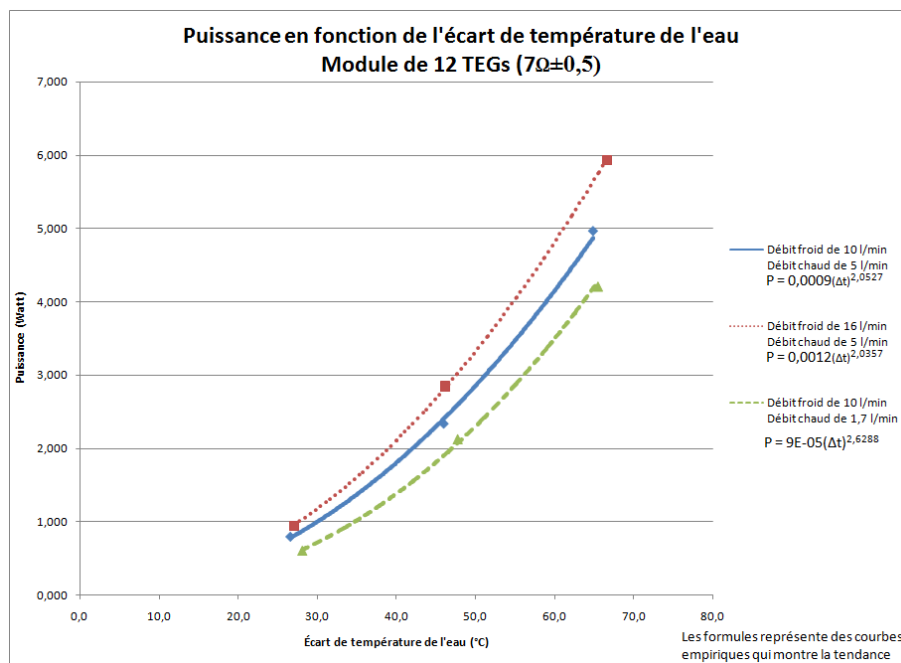


Figure 4.3-1 : Effet sur la puissance générée du générateur TEG12 d'une variation de débit d'eau chaude et d'eau froide sur.

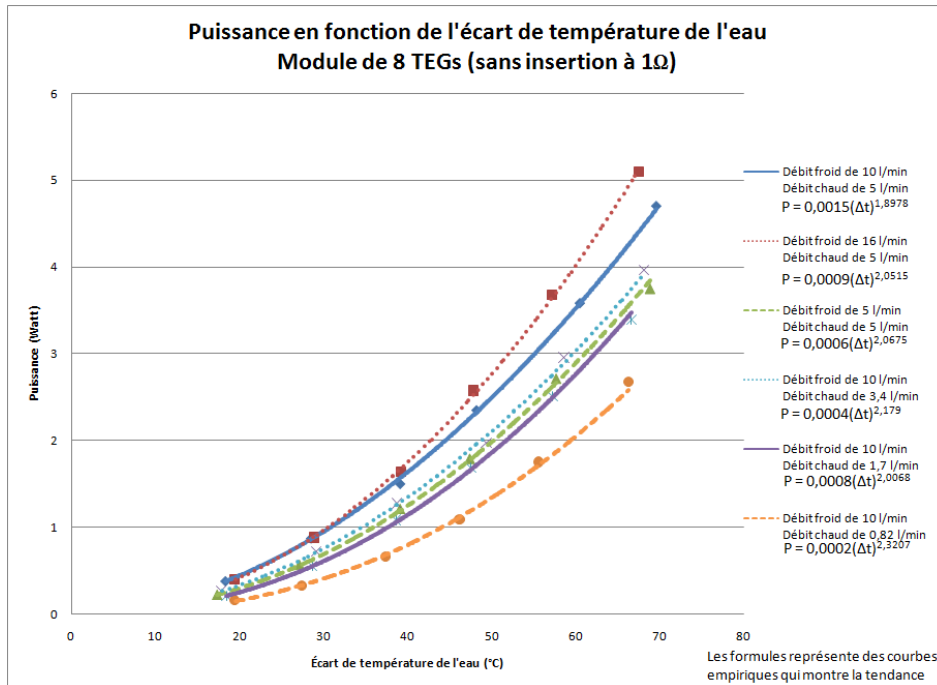


Figure 4.3-2 : Effet sur la puissance générée du générateur TEG8 d'une variation de débit d'eau chaude et d'eau froide sur.

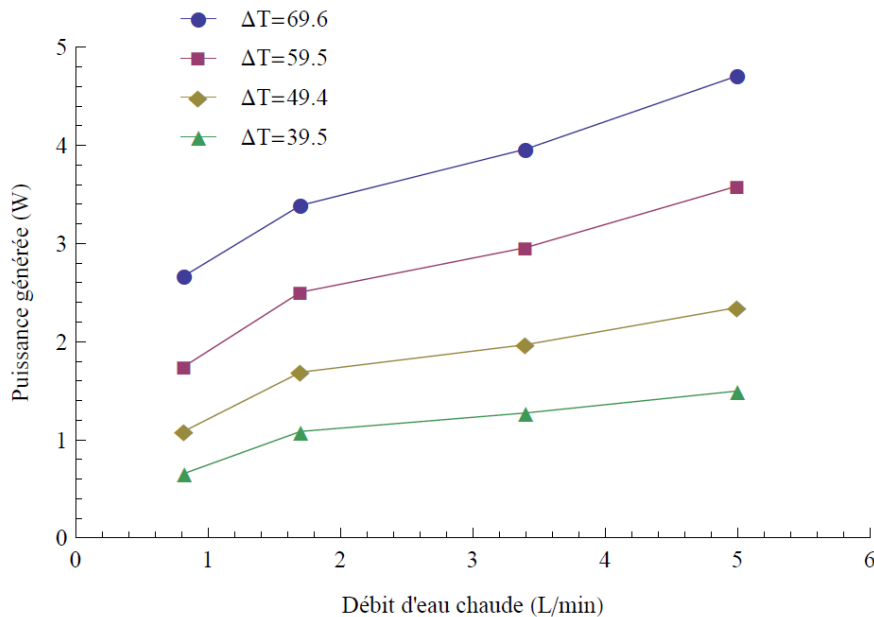


Figure 4.3-3 : Puissance générée du générateur TEG8 par rapport au débit pour des gradient de température différents. Le débit d'eau froide est à 10 L/min.

4.4. Rendement des générateurs

Le rendement du générateur TEG8 est évalué en fonction du débit et en fonction du gradient de température. On rappelle que le rendement d'un générateur est la puissance en électricité générée par rapport à la quantité d'énergie injectée. C'est-à-dire, le rendement d'un générateur thermoélectrique est $\eta = \frac{P}{\dot{V}_H \rho_H c_{p,H} \Delta T_H}$. Les

résultats sont illustrés ci-dessous d'où la densité et la capacité thermique de l'eau chaude sont 989 kg/m³ et 4180 J/kg·K respectivement.

Les deux figures montrent clairement que le rendement maximal augmente avec une augmentation de gradient de température. Cependant, le choix du débit est moins clair. Par exemple, avec une dissimilitude de température entre le côté chaud et le côté froid du générateur de 39 degrés, le rendement maximal est atteint avec un débit d'eau chaude de 1.7 L/min. Le graphique montre que pour ces conditions, un débit inférieur ainsi qu'un débit supérieur diminuent le rendement. Cependant, avec une dissimilitude de température inférieure de 28 degrés, le rendement maximal se trouve plutôt au débit d'eau chaude de 28 degrés.

Ceci est en contradiction avec (Niu, Yu, & Wang, 2009) qui ont conclu que le rendement d'un générateur augmente tout simplement avec une augmentation de débit d'eau chaude. La Figure 4.4-1 montre que ceci n'est pas toujours le cas. Ce phénomène n'a pas été observé par (Niu, Yu, & Wang, 2009) en raison du faible débit employé par rapport à la quantité de modules thermoélectriques utilisés. Leur générateur contenait 56 modules thermoélectriques à comparer au générateur de 8 modules TEG8 de cette étude. Le résultat est tel que leur domaine d'application de débit inférieur à 6,67 L/min n'était jamais suffisant pour atteindre le débit optimal de leur générateur de 56 modules. Leurs résultats donnent l'impression que le rendement continuera à augmenter avec une augmentation de débit d'eau chaude, alors qu'avec le plus petit générateur TEG8,

le débit optimal est atteint plus facilement et il montra clairement qu'après que le débit optimal est atteint, le rendement retombe en décroissance.

Le choix du débit d'eau chaude est donc essentiel dans la maximisation de puissance électrique générée d'un générateur. Il fut aussi observé que le débit d'eau chaude optimal est dépendant du gradient de température.

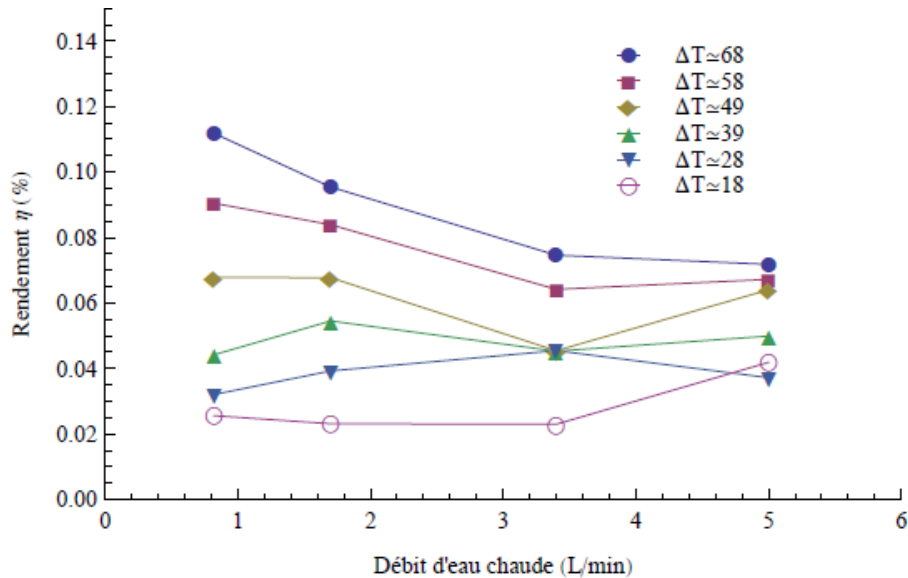


Figure 4.4-1 : Rendement du générateur TEG8 par rapport au débit d'eau chaude pour plusieurs gradients de température sans inserts initiateurs de turbulence. Le débit d'eau froide est à 10 L/min et la résistance externe est 1 Ohm.

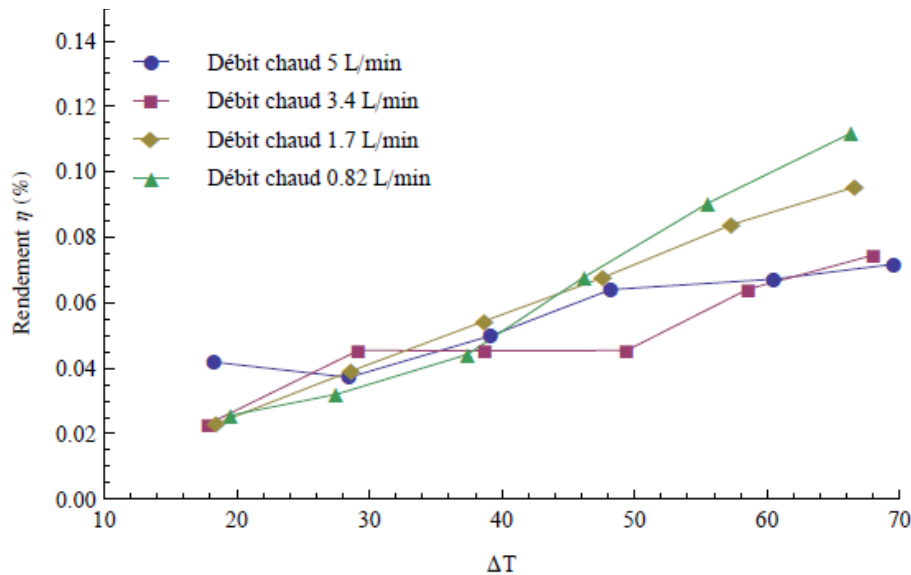


Figure 4.4-2 : Rendement du générateur TEG8 par rapport à la dissimilitude de température pour plusieurs débits d'eau chaude sans inserts initiateurs de turbulence. Le débit d'eau froide est à 10 L/min et la résistance externe est à 1 Ohm.

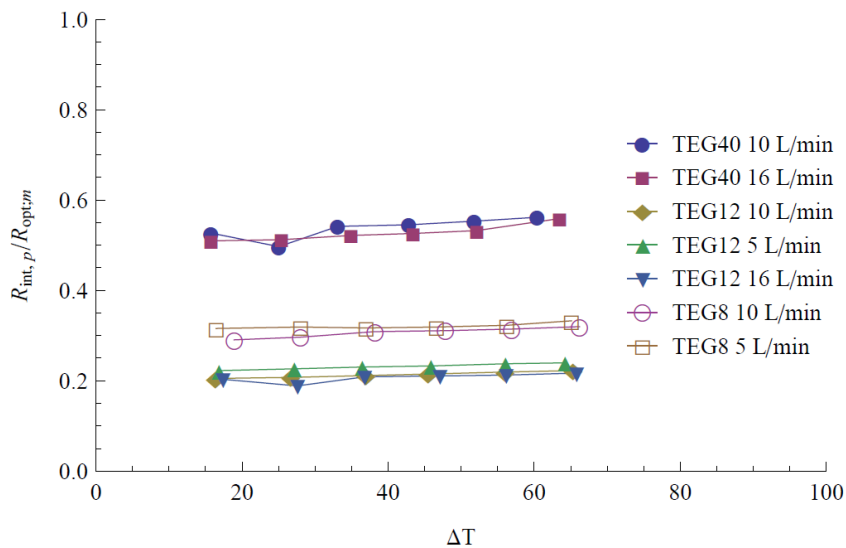
4.5. Comparaison de la théorie avec les résultats expérimentaux

4.5.1. Résistance interne

La résistance interne de chaque générateur prédite par l'équation 2.3-2 est comparée avec la résistance optimale mesurée de chaque générateur de cette étude. Théoriquement, le rapport devrait être égal à 1 puisque la résistance interne d'un générateur dans le modèle est égale à la résistance externe optimale.

Des expériences furent réalisées d'où la résistance externe imposée sur chaque générateur était d'un Ohm. Malgré qu'un Ohm ne soit pas la résistance externe optimale d'aucun des générateurs, d'après le modèle, la résistance interne donnant la valeur de la résistance externe optimale de chaque générateur pourrait être calculée à partir de n'importe quelle résistance externe.

Les résultats des expériences variant le débit d'eau froide et le gradient de température avec insert initiateur de turbulence et un débit d'eau chaude de 5 L/min sont illustrés ci-dessous. Les résultats montrent que la résistance interne prédite du modèle et la résistance externe optimale mesurée ne sont pas égale comme le modèle avait déterminé. Cependant, les résultats sont encourageants puisqu'ils montrent qu'il est vraisemblable qu'un modèle employant la même approche mais avec moins de suppositions (par exemple, un modèle qui inclut la résistance des céramiques d'un module thermoélectrique (Rodriguez, Vian, Astrain, & Martinez, 2009)) approcherait plus un rapport de 1 entre la résistance interne prédite et la résistance externe optimale.



4.5.1-1 : Rapport de la résistance interne prédite du modèle avec la résistance optimale mesurée. Le débit d'eau chaude est à 5 L/min et le débit d'eau froide variant est indiqué dans le graphique. L'insert initiateur de turbulence panneaux 5/16 pouce est présent et la résistance externe est de 1 Ohm.

4.5.2. Puissance maximale générée

Les résistances externes optimales qui maximisent la puissance électrique générée des générateurs TEG12 et TEG40 ont été identifiées expérimentalement étant 7 Ohm et 17 Ohm respectivement. Deux expériences ont été réalisées avec chaque générateur en présence d'inserts de panneaux à chaque 5/16 de pouce et

en absence d'insert. Le débit d'eau chaude était maintenu à 5 L/min et le débit d'eau froide était maintenu à 10 L/min.

Le but des expériences était de mesurer la puissance générée de chaque générateur avec la résistance électrique externe optimale e chacun identifiée par rapport à un gradient de température variant. Les résultats, représentés dans les figures ci-dessous, énoncent que l'équation 2.3.2-2 sous-estime la puissance générée d'un générateur. La faiblesse du modèle est nécessairement en raison de la supposition que le céramique est sans résistivité électrique et la supposition que l'isolation thermique est parfaite. Dans la modélisation de la puissance générée d'un générateur thermoélectrique ces derniers devraient être y intégrés.

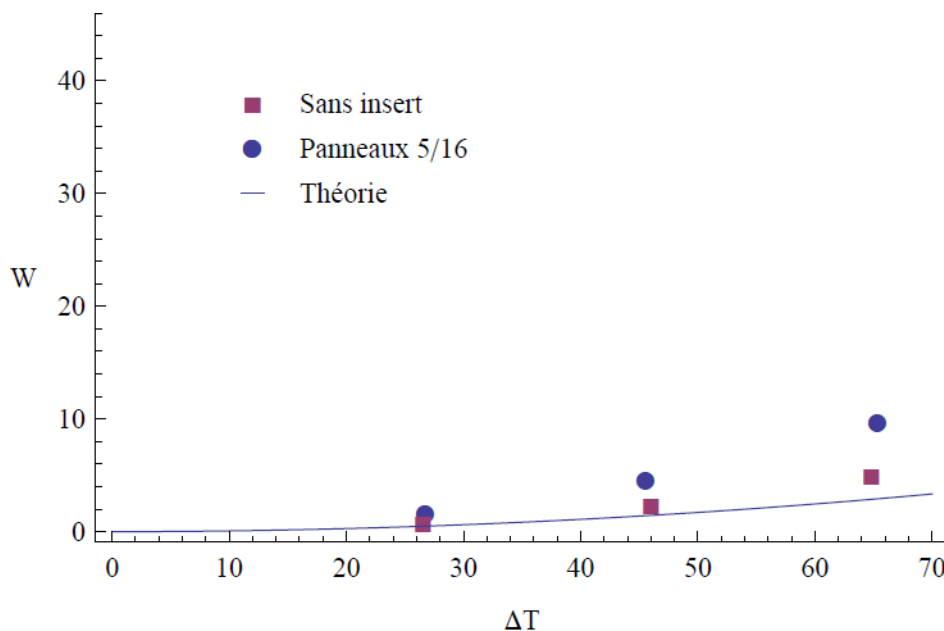


Figure 4.5.2-1 : La puissance maximale d'électricité générée prédite par équation 2.3.2-2 comparée avec la puissance générée du générateur TEG12 avec une résistance externe optimale de 17 Ohm.

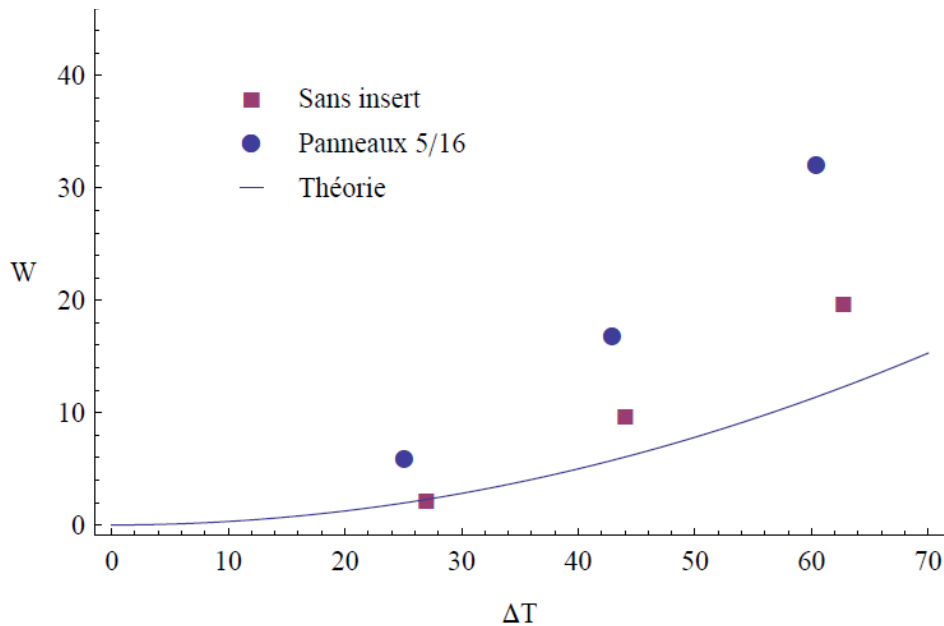


Figure 4.5.2-2 : La puissance maximale d'électricité générée prédite par équation 2.3.2-2 comparée avec la puissance générée du générateur TEG40 avec une résistance externe optimale de 17 Ohm.

4.6. Courant généré et voltage

La dissimilitude de température actuelle entre les jonctions des éléments du semi-conducteur Bi_2Te_3 et les céramiques en contact avec l'aluminium du générateur est évalué à partir du voltage généré $V = 2\alpha N_{tc} N_{mo} \Delta T_{act}$ (Niu, Yu, & Wang, 2009). Dans le but d'optimisation, il est important de maximiser et maintenir le gradient de température à travers les modules puisque c'est ce dernier qui génère l'effet Seebeck. Il est donc nécessaire d'étudier le voltage par rapport au gradient de température à travers le générateur au complet afin d'évaluer le gradient de température à travers les modules du générateur.

Les figures ci-dessous montrent que le voltage et l'ampérage des trois générateurs TEG8, TEG12 and TEG40 ont une croissance linéaire par rapport au gradient de température sous une variété de conditions, un phénomène observé par Niu, Yu, & Wang (2009). Les résultats montrent que la génération de courant et d'ampérage est augmentée en présence d'inserts de turbulence et en augmentant le débit chaud et/ou le débit froid.

Les résultats illustrés ci-dessous montrent une corrélation linéaire sous maintes conditions entre la dissimilitude de température à travers les modules ΔT_{act} et la dissimilitude de température à travers le générateur ΔT . La pente inférieure à 1 indique qu'une diffusion de chaleur non-désirée est présente dans le générateur durant son fonctionnement. Cette diffusion de chaleur est telle que le côté chaud des modules n'atteint pas la température de l'eau chaude et que la température du côté froid des modules n'attient pas la température de l'eau froide. Une pente de 1 représenterait le cas idéal d'où le gradient de température généré par les conduites d'eau devient égal au gradient de température à travers les modules.

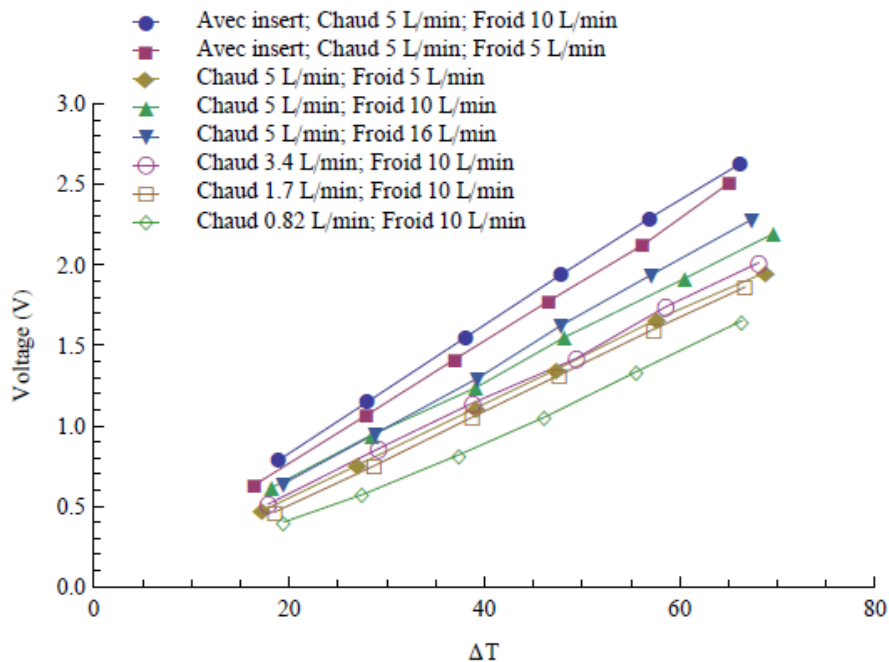


Figure 4.6-1 : Voltage du générateur TEG8 avec une résistance externe d'un Ohm et l'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.

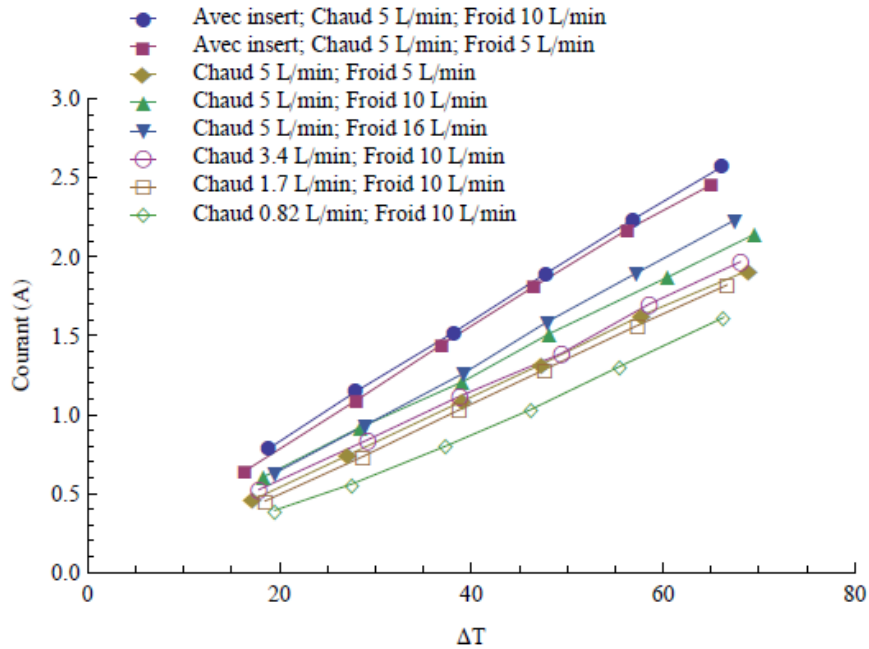


Figure 4.6-2 : Courant en Ampères du générateur TEG8 avec une résistance externe d'un Ohm et l'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.

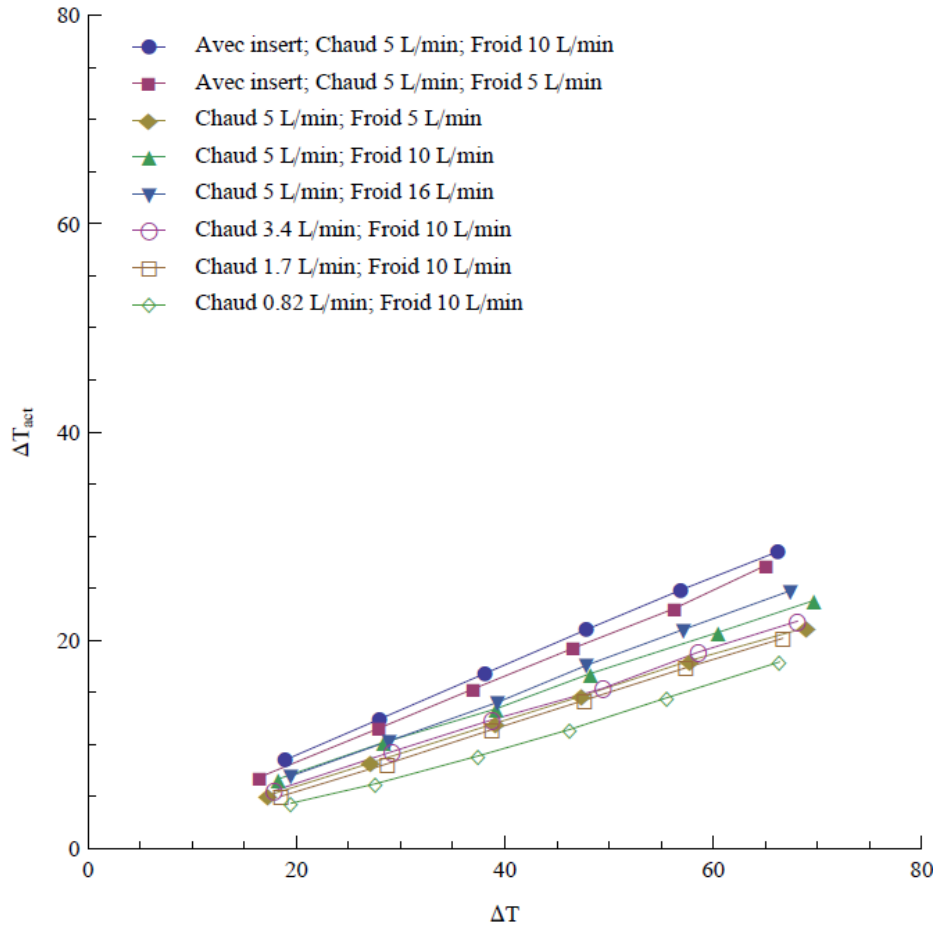


Figure 4.6-3 : Comparaison de la dissimilitude de température du générateur TEG8 et de ses modules intérieurs. La résistance externe est d'un Ohm et l'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.

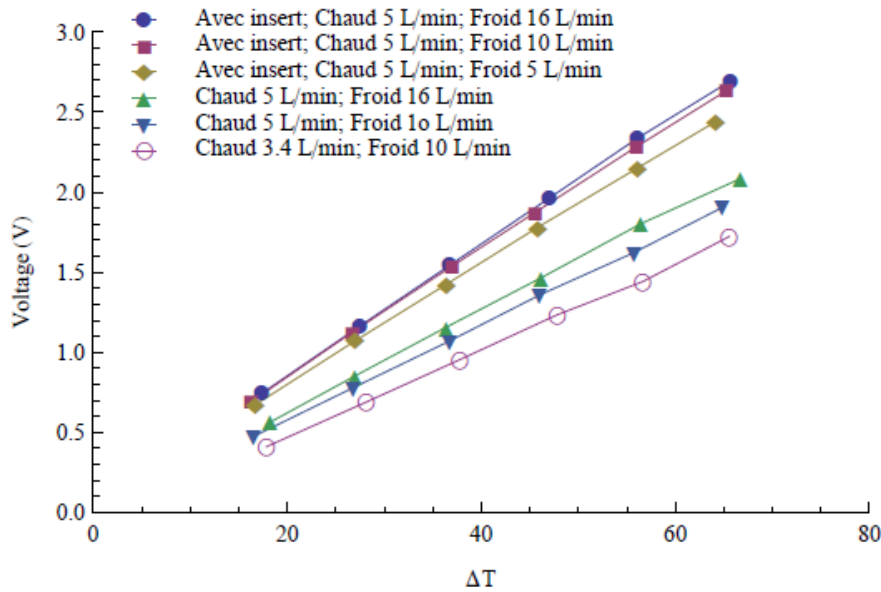


Figure 4.6-4 : Voltage du générateur TEG12 avec une résistance externe d'un Ohm et l'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.

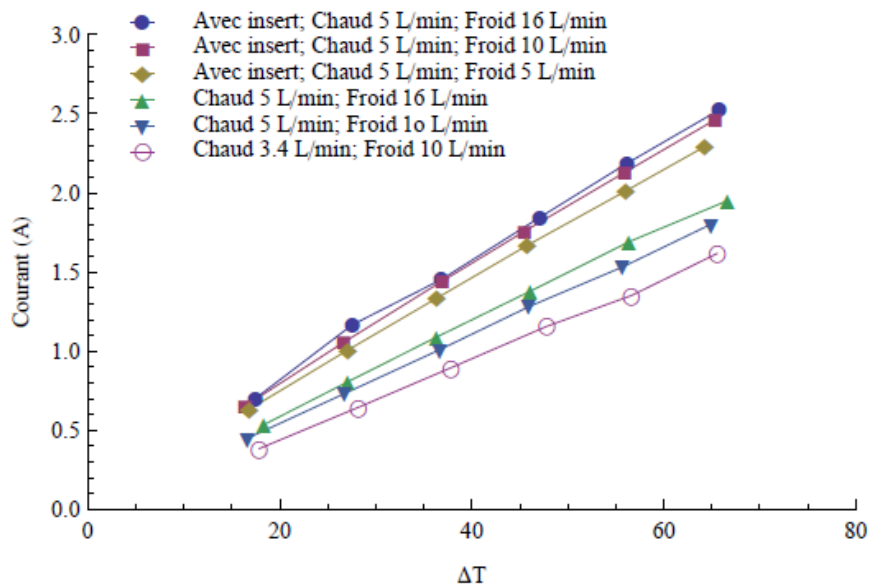


Figure 4.6-5 : Courant en Ampères du générateur TEG12 avec une résistance externe d'un Ohm et l'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.

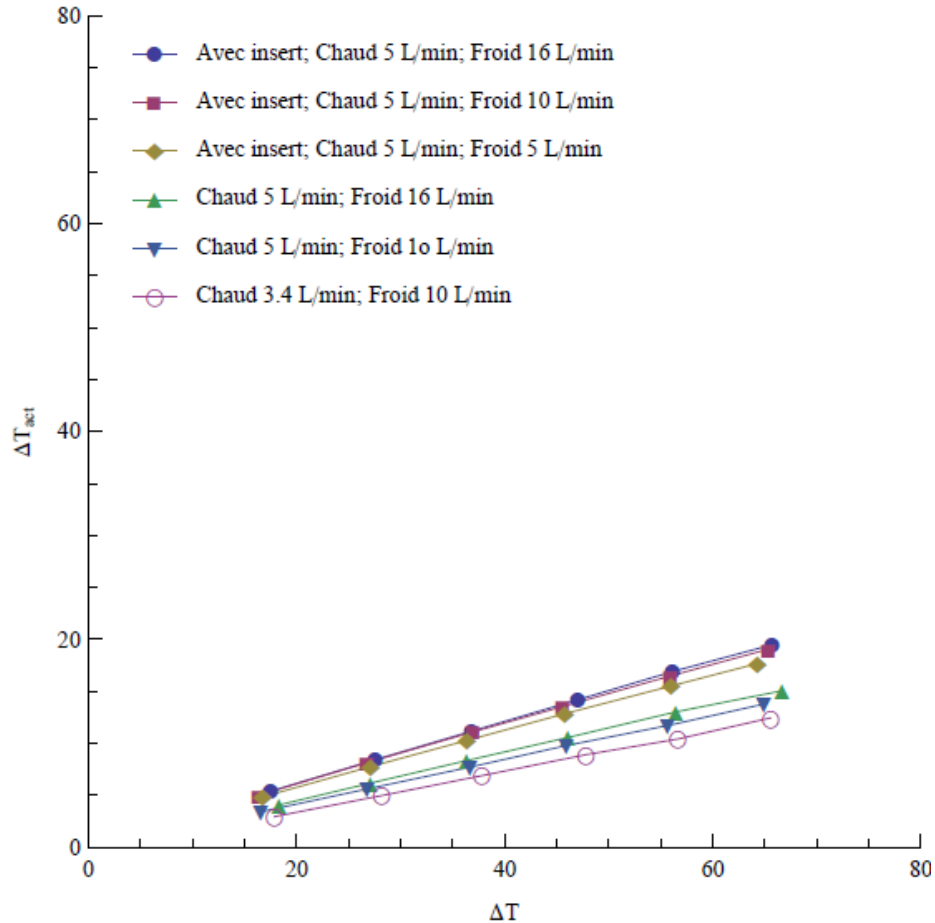


Figure 4.6-6 : Comparaison de la dissimilitude de température du générateur TEG12 et de ses modules intérieurs. La résistance externe est d'un Ohm et l'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.

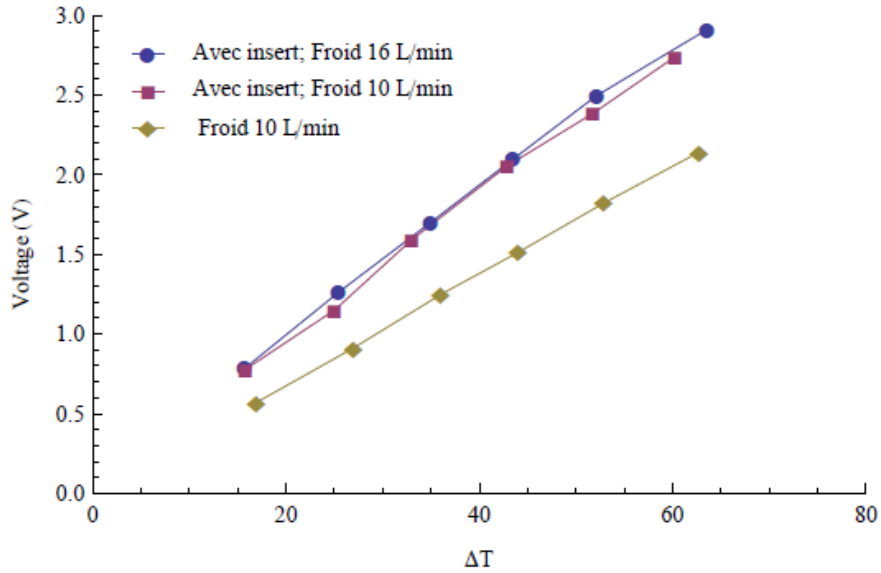


Figure 4.6-7 : Voltage du générateur TEG40 avec une résistance externe d'un Ohm et un débit d'eau chaude de 5 L/min. L'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.

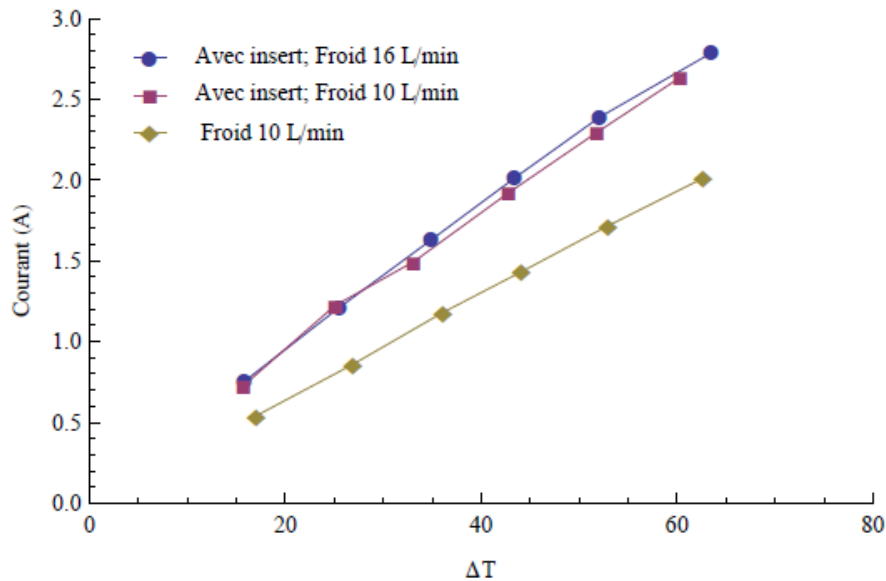


Figure 4.6-8 : Courant en Ampères du générateur TEG40 avec une résistance externe d'un Ohm et un débit d'eau chaude de 5 L/min. L'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce.

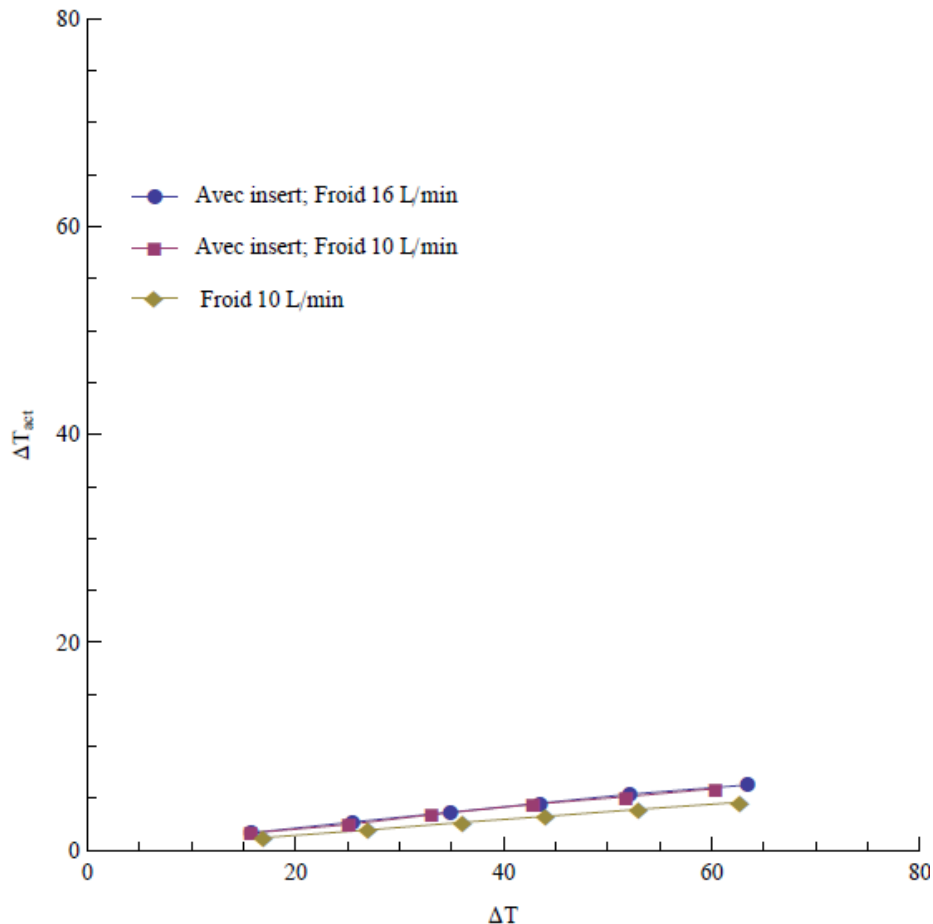


Figure 4.6-9 : Comparaison de la dissimilitude de température du générateur TEG12 et de ses modules intérieurs. La résistance externe est d'un Ohm, l'insert utilisé est de panneaux à chaque 5/16 de pouce et le débit d'eau chaude est de 5 L/min.

4.7. Perte de charge

La perte de charge est le facteur le plus important dans la rentabilité éventuel d'un générateur thermoélectrique à l'échelle industrielle. Ceci est dû au fait qu'une augmentation de perte de charge fait travailler la pompe à eau d'avantage. Dans un scénario industriel, une pompe à eau travail afin d'évacuer le fluide non-désiré. L'installation d'un générateur thermoélectrique en mi-chemin serait disruptive à l'écoulement en augmentant la perte de charge et en conséquence la pompe aurait besoin d'une puissance plus élevée. Donc tout effort de maximiser l'électricité générée par un générateur thermoélectrique pourrait être futile à cause d'une augmentation de puissance parallèle de la pompe à eau. Cependant,

le rendement puissance générée- flux thermique standard décrit ci-dessus ne considère pas la perte de charge à travers le générateur.

Il faut donc s'assurer que les méthodes d'amélioration identifiées ci-dessus ne sont pas en conséquence d'une augmentation de perte de charge importante. On rappelle que les expériences ci-dessus montrent qu'il semble exister des débits optimaux, une résistance externe optimale et un effet de turbulence optimale. Idéalement, une étude complète sur le rendement étant définie comme la puissance générée par rapport au travail supplémentaire de la pompe à eau serait réalisée. En particulier, une étude complète sur le rendement optimal par rapport au débit d'eau chaude et au débit d'eau froide et leurs effets sur la perte de charge est nécessaire pour mieux optimiser un générateur.

En attendant cette dernière, l'effet des inserts initiateurs de turbulences sur la perte de charge fut identifié en réalisant des expériences dans lesquelles les seuls paramètres variables sont la turbulence et la perte de charge. Il est bien connu que la résistance électrique externe imposée sur le générateur n'a aucun effet sur la perte de charge et donc la résistance externe imposée sur le générateur ne variait pas.

Les résultats illustrés ci-dessous montrent que les inserts initiateurs de turbulence de panneaux à chaque 5/16 de pouce non seulement augmentent la puissance générée d'une façon considérable mais ils diminuent légèrement la perte de charge. Ces inserts sont donc doublement gagnants dans le sens qu'en leurs présences la puissance générée est plus importante et la pompe travaille moins qu'en leur absence.

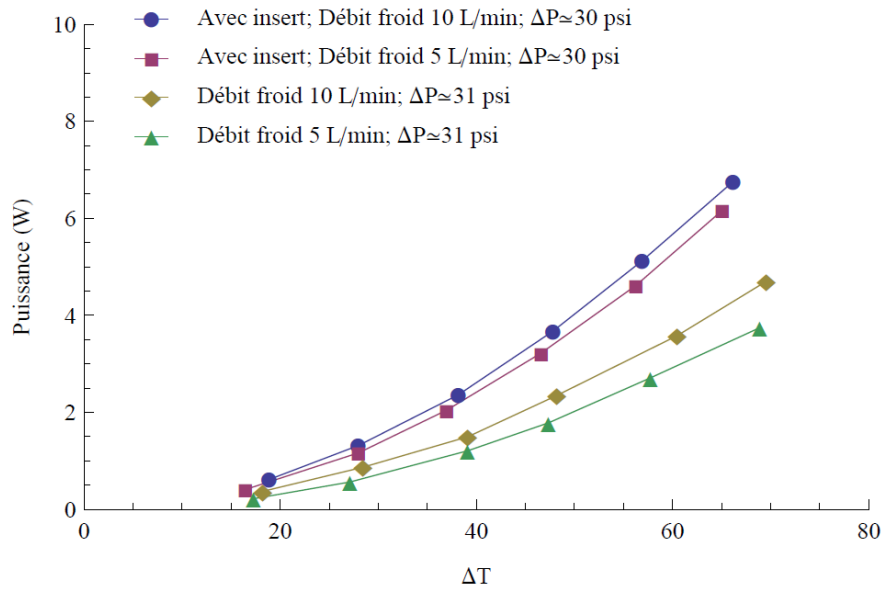


Figure 4.7-1 : Puissance générée du générateur TEG8 à 1 Ohm avec une perte de charge fixée. Le débit d'eau chaude est à 5 L/min et l'insert est de panneaux à chaque 5/16 de pouce et sans.

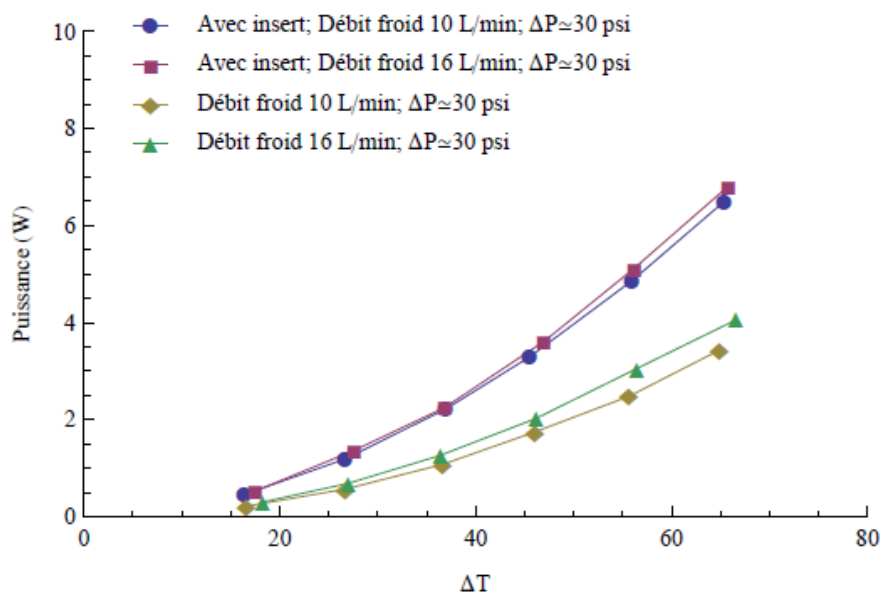


Figure 4.7-2 : Puissance générée du générateur TEG12 à 1 Ohm avec une perte de charge fixée. Le débit d'eau chaude est à 5 L/min et l'insert est de panneaux à chaque 5/16 de pouce et sans.

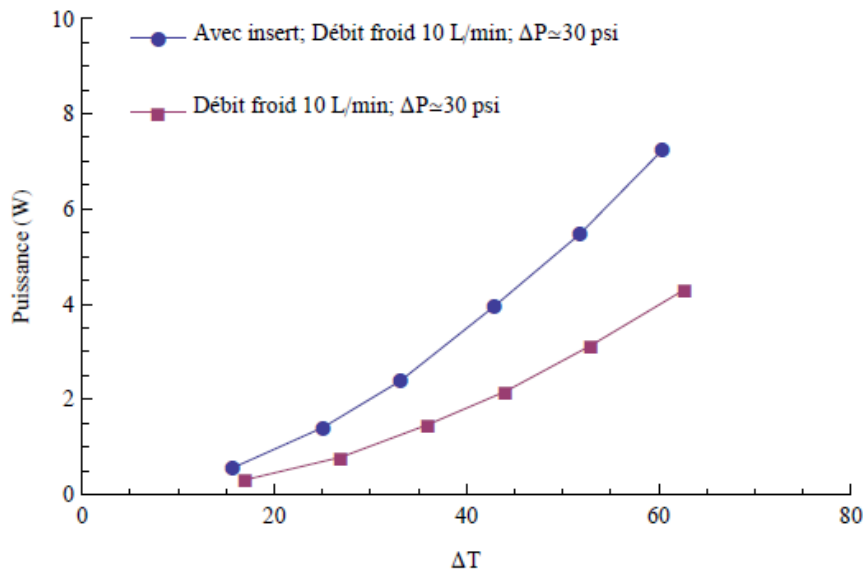


Figure 4.7-3 : Puissance générée du générateur TEG40 à 1 Ohm avec une perte de charge fixée. Le débit d'eau chaude est à 5 L/min et l'insert est de panneaux à chaque 5/16 de pouce et sans.

4.8. Comparaison avec des résultats d'autres laboratoires

La puissance générée optimisée avec les inserts de panneaux à chaque 5/16 de pouce des générateurs TEG8 et TEG40 est comparée avec celle de Niu, Yu et Wang (2009). Ces derniers ont mesuré la production d'électricité d'un générateur thermoélectrique d'une injection thermique d'eau chaude et d'une diffusion thermique d'eau froide. Leur générateur comprenait 56 modules d'où chacun contenait la même quantité de Bismuth Telluride Bi_2Te_3 que les modules utilisés de cette étude. Leur débit d'eau chaude 33,4% supérieur au débit d'eau chaude de cette étude.

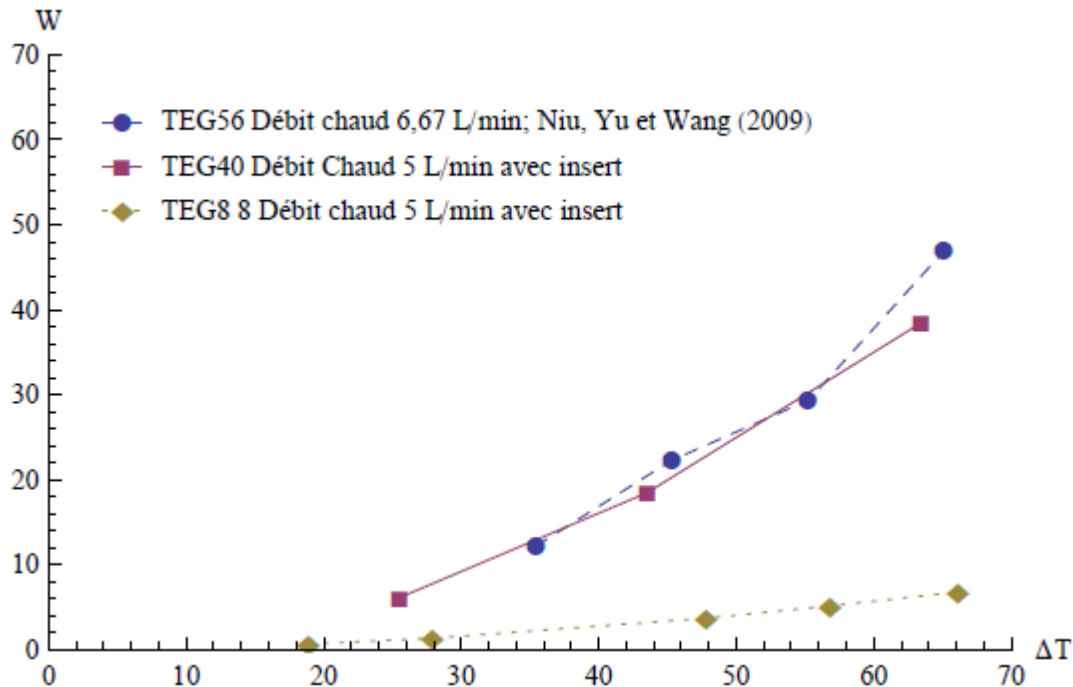


Figure 4.8-1 : Comparaison de la puissance générée du générateur de Niu, Yu et Wang (2009) de 56 modules aux générateurs de cette étude TEG8 et TEG40.

Les résultats montrent que les générateurs de cette étude ont été mieux optimisés puisqu'avec une injection thermique inférieure à celle de Niu, Yu et Wang et avec moins de matériaux thermoélectrique, le générateur TEG40 générer quasiment la même puissance électrique. Il est vraisemblable que cette meilleure performance est en raison du contre-courant entre le débit d'eau chaude et du débit d'eau froide dans la conception des générateurs de cette étude et en raison de la présence des inserts initiateurs de turbulence. Il est noté que dans la conception étagère employée par Niu, Yu et Wang que les débits d'eau chaude et d'eau froide sont parfois en contre-courant et parfois en courant parallèle.

Cependant, le rendement η , identifié étant le rapport entre la puissance générée par rapport au flux thermique, de l'étude de Niu, Yu et Wang est supérieur au rendement du générateur TEG40. Ceci est illustré dans la figure ci-dessous. Cette contradiction vraisemblable est dû au fait que le flux thermique considère seulement la chaleur éjectée de l'eau chaude et non l'injection calorifique totale. C'est-à-dire, les conduites d'eau chaude du générateur de Niu, Yu et Wang

refroidi moins par rapport à la puissance générée que celles de cette étude et donc leur rendement de puissance générée par rapport au flux thermique est plus élevé. Or, dans une application industrielle, ce qui sortirait du générateur serait tout simplement un déchet thermique impliquant qu'il est avantageux de refroidir le déchet le plus que possible. Cet aspect est perdu dans l'évaluation du rendement puisque un plus petit refroidissement génère un rendement plus élevé.

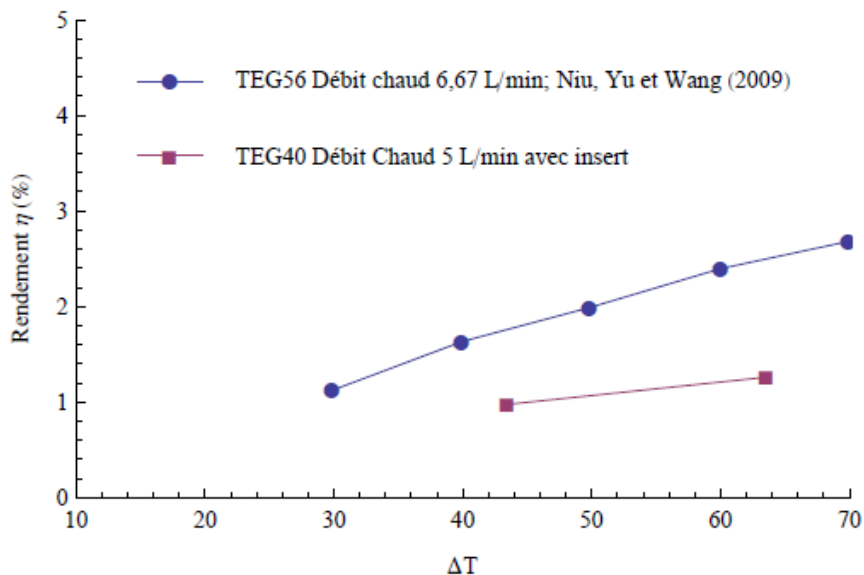


Figure 4.8-2 : Comparaison du rendement du générateur de Niu, Yu et Wang (2009) de 56 modules aux générateurs de cette étude TEG40.

4.9. Performance visuel du générateur TEG40

Afin de mieux démontrer le potentiel d'un générateur thermoélectrique, les ampoules ci-dessous font illustration de la capacité électrique d'un générateur thermoélectrique avec 5 L/min d'eau chaude. En contexte industriel, une industrie papetière typique du Québec rejette environ 70 000 L/min de fluide chaud. Il serait donc important de faire une étude complète d'un générateur thermoélectrique optimisé avec les méthodes identifiées dans cette étude à

l'échelle industrielle afin d'identifier le vrai potentiel d'un générateur thermoélectrique dans une application industrielle.

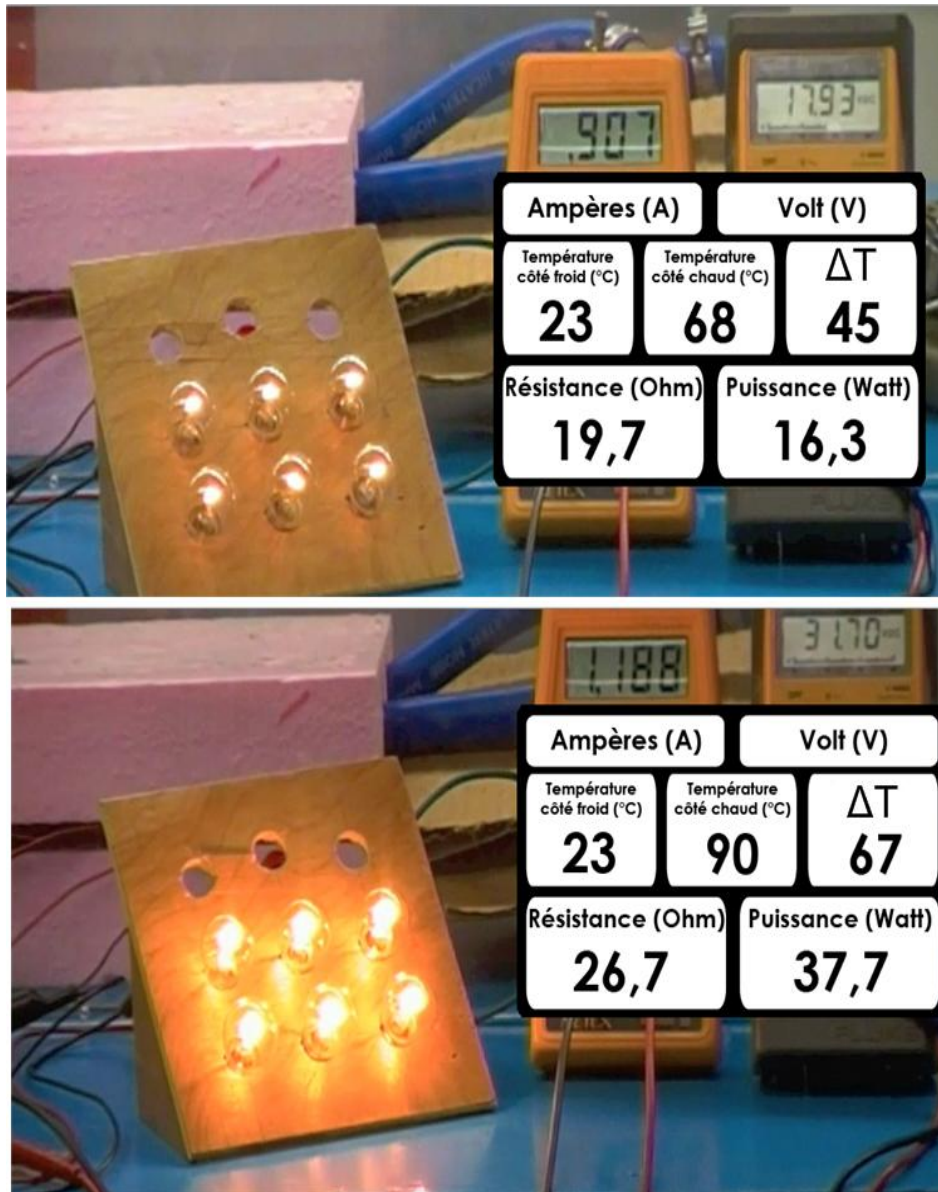


Figure 4.9-1 : Représentation visuel de la capacité de production maximale du générateur TEG40.

5. CONCLUSIONS

Une étude sur la génération d'électricité à partir de l'eau chaude afin d'exploiter les déchets thermiques industriels fut réalisée avec une série de test sur trois générateurs thermoélectriques de tailles différentes. La résistance externe varia

durant une expérience plutôt que de la varier en une série d'expériences. Le comportement d'un générateur thermoélectrique par rapport à la résistance externe ainsi que la résistance externe optimale du générateur furent identifiés avec beaucoup de précision. Les résultats démontrèrent une résistance externe optimale associée à chaque générateur invariante par rapport au débit, à la turbulence et au gradient de température. Une corrélation entre la résistance externe optimale d'un générateur et la résistance interne du générateur est donc imminente.

Dans le but de maximiser la puissance électrique générée, l'effet de certains inserts initiateurs de turbulence fut doublement gagnant en raison d'une réduction de perte de charge et d'une augmentation importante de puissance électrique générée. En particulier, les inserts à panneaux sont beaucoup plus efficaces que celles de forme spirale.

Contrairement à ce qui se trouve dans la littérature, les résultats de cette étude montrent que le rendement ne croît pas d'une façon linéaire avec le débit d'eau chaude. En effet, la courbe identifiée linéaire par Niu, Yu et Wang n'était que la partie croissante d'une courbe parabolique comme le montre les résultats de cette étude. Ceci est significatif puisque cela montre qu'il existe un débit d'eau chaude optimal respectif à la taille des conduites d'eau du générateur et dépendant du gradient de température. Dorénavant, il sera nécessaire d'identifier le débit d'eau chaude optimale dans la maximisation de puissance électrique générée.

Le modèle mathématique primitif détaillé dans cette étude sous-estima la puissance maximale d'un générateur thermoélectrique en raison des suppositions simplificatrices. Dans la modélisation de la puissance générée d'un générateur thermoélectrique, la résistivité électrique des céramiques et l'isolation thermique non parfaite devraient être considérés.

6. RETOMBÉES

6.1. Retombées environnementales

On rappelle que ce projet s'attaque au problème d'eau chaude dégradée résiduelle qui est le résultat du refroidissement industriel nécessaire dans le raffinage du pétrole, dans les usines chimiques, etc. Dans ces processus, d'énormes quantités d'énergie dégradée sous forme de chaleur contenant des éléments toxiques sont typiquement dégagées par des tours de refroidissements où la chaleur est diffusée dans l'air (Bruno, Vidal, & Coronas, 2006) ou en évacuant l'eau chaude dans des lacs ou des rivières (la méthode typique des centrales nucléaires (Zeng, 2002) et de l'industrie papetière). Ce processus a un impact négatif sur l'environnement et représente une perte d'énergie économiquement importante tel que démontré par Pulat, Etemoglu, & Can (2009) et Wang, Chiou, & Wu (2007).

La technologie proposée par cette étude refroidirait les déchets industriels avant qu'ils ne soient ultimement intégrés dans l'environnement local. Le fait de refroidir ces résidus industriels a certes un impact positif sur l'environnement local en termes d'impact thermique. Mais aussi en termes de production d'éléments toxiques par celui-ci. En effet, l'étude publiée par Oral, Sikula, Puchyr, Hajny, Stehlik, & Bebar (2005) a montré qu'avec un traitement thermique approprié des pertes calorifiques dans l'industrie papetière tchèque, les émissions de monoxyde de carbone furent réduites de 187 600 kg/an.

6.2. Potentiel énergétique

Dès que l'industrie fonctionne, de la chaleur est nécessairement produite en excès. Un exemple de l'abondance de cette chaleur non-désirée consiste en la production d'aluminium au Québec qui occupe le deuxième rang des exportations québécoises. Une fonderie d'aluminium moderne consomme 13 MW-h par tonne d'aluminium produite. On estime que 50% de cette énergie est perdue sous forme de chaleur résiduelle (Roe, 2006). Appliqué à l'ensemble de la production d'aluminium et étendu à l'ensemble des industries énergivores (Acier, électrolyse,

fonderies, pâtes et papiers, etc.), ce potentiel représente donc un gisement d'énergie considérable non-exploité qui est de plus en croissance avec l'économie québécoise.

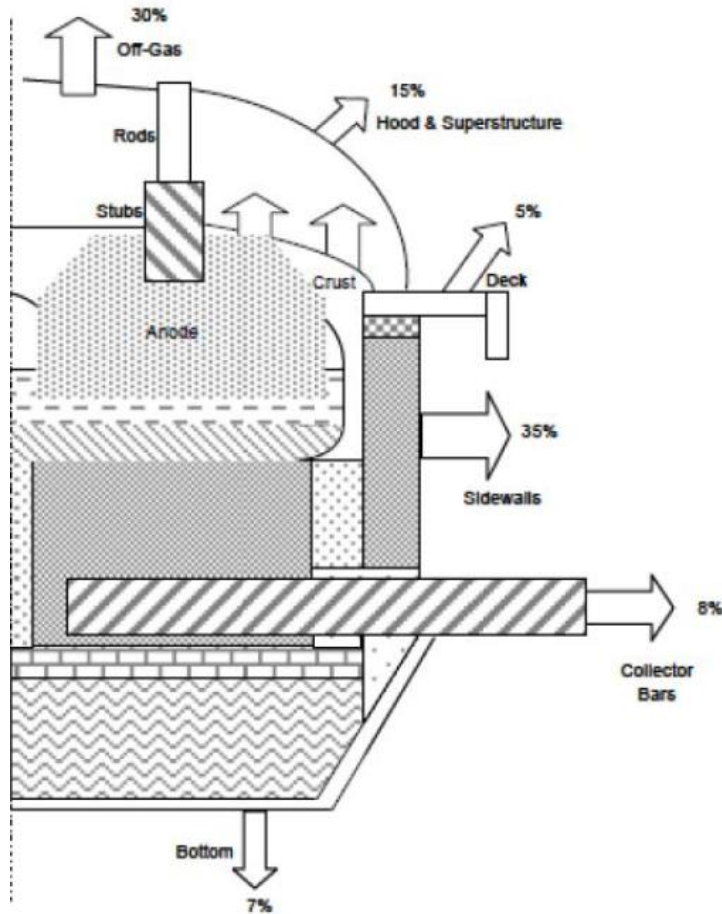


Figure 6.2-1 : Énergie non-exploitée sous forme de chaleur résiduelle d'une fonderie d'aluminium (Roe, 2006).

Typiquement, cette chaleur résiduelle illustrée dans la figure ci-dessus est éjectée par des conduits de gaz, illustrés ci-dessous. Dans ce processus, une fonderie d'une production de 25 000 tonne par année transporte dans ces conduits 80 MW de chaleur résiduelle d'un débit de 800 Nm³/s (Roe, 2006). Ces conduits donnent une accessibilité à cette chaleur résiduelle pour être couplés avec un générateur thermoélectrique.



Figure 6.2-2 : Conduit de gaz en provenance d'une fonderie d'aluminium (Roe, 2006)

6.3. Faisabilité technico-économique

Le rendement intrinsèque de la récupération est très faible et fonction du rapport entre la température de la source froide et de la source chaude. Cela est connu. Toutefois, il ne s'agit pas d'un facteur à considérer en termes de rentabilité économique.

Il faut considérer la valeur de l'énergie produite par rapport au coût d'installation et d'entretien de la technologie et du surcoût lié à l'accroissement de pression requise pour évacuer le rejet à l'environnement, le cas échéant. Il faudrait aussi considérer les revenus issus des tonnes de carbone évités par la consommation d'une énergie propre, le cas échéant.

L'intérêt de cette technologie réside dans ce qu'elle ne comporte aucune pièce mobile en raison du fait que la conversion de chaleur en électricité ait lieu à l'échelle atomique. L'entretien de cette technologie sera donc minimal.

6.4. Retombées socioéconomique

L'industrie papetière est en décroissance partout au Québec et si les bonnes nouvelles annoncées en décembre par Abitibi-Bowater sont encourageantes, la dette de l'entreprise demeure élevée à 870 millions et l'avenir global de cette industrie est toujours en péril face à la baisse de consommation de papier journal. Les produits de pâtes et papier demeurent une industrie importante au Québec et elle occupait le troisième rang avec 3,9% des exportations québécoises en 2009 (Institut de la statistique du Québec, 2009). Cette industrie pourrait profiter d'une technologie qui diminuerait sensiblement ses coûts de production et qui améliorerait son image corporative. Il est aussi vraisemblable que toute amélioration dans la production d'électricité à partir de la chaleur industrielle conduirait à un convertisseur de chaleur en électricité appliqué aux gros véhicules. Ceci pourrait conduire à un partenariat avec les nombreuses entreprises québécoises qui sont responsables du premier export québécois, les avions et moteurs d'avion (Institut de la statistique du Québec, 2009).

Tout avancement dans la technologie thermoélectrique et ses applications auront une incidence positive sur les entreprises actives dans la production de métaux et de composés de haute pureté pour des applications électroniques dont les plus actives sont basées au Québec, le plus notamment 5N plus de Montréal.

7. FUTURS PROJETS

7.1. Test alpha

Un centre de traitement de données gère la chaleur résiduelle produite par le fonctionnement de serveurs d'internet rangés entreposés. Quand la bande passante d'un client travail, les instruments électroniques des serveurs chauffent. En raison de la sensibilité des instruments électroniques, un contrôle climatique des lieux est indispensable.

Afin de valider la technologie thermoélectrique d'énergie verte dans un contexte industriel réel, un prototype à l'échelle industrielle sera installé dans le système de refroidissement du centre de traitement de données de Primus télécommunications à Ottawa. Un investissement a été fait dans un des centres de traitement de données de Primus. Ce centre pourrait donc servir comme premier site industriel pour tester et utiliser en production cette technologie à l'extérieur des laboratoires du Collège. Les serveurs et l'aménagement réalisé sont illustrés dans les figures ci-dessous.

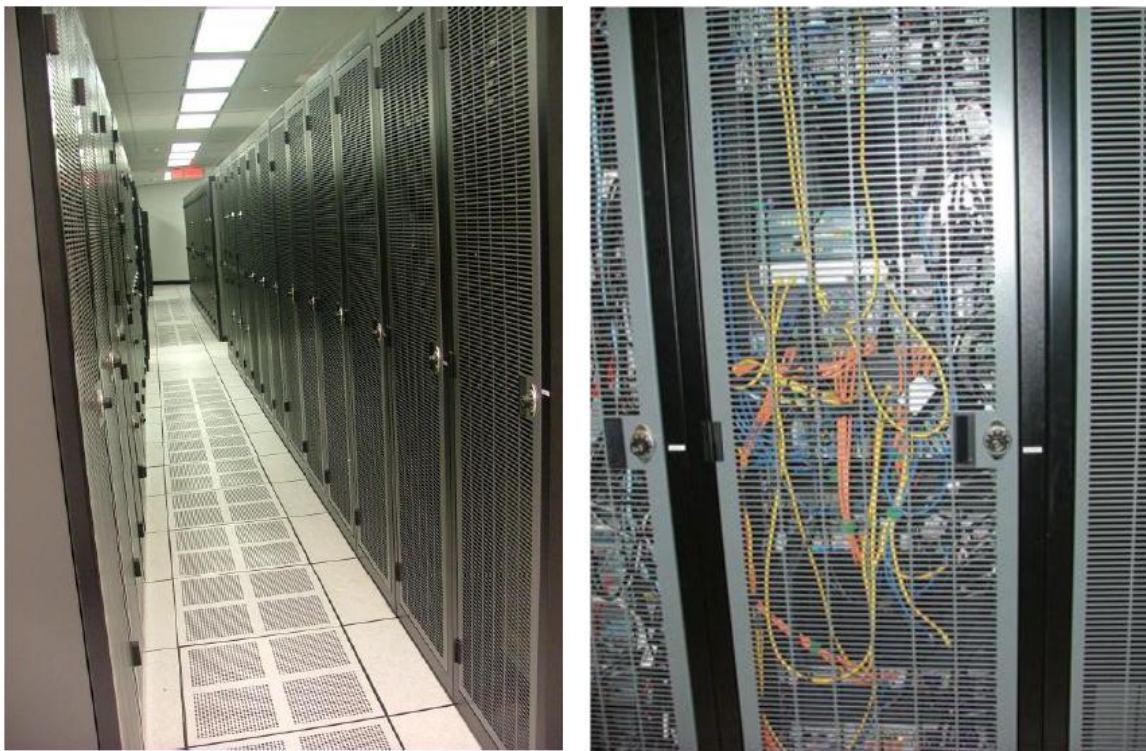


Figure 7.1-1 : Rangés de serveurs entreposés dans le centre de traitement de données de Primus télécommunication à Ottawa.



Figure 7.1-2 : Aménagement fait au système de refroidissement pour accommoder un test alpha.

7.2. Modélisation

7.2.1. Modèle mathématique et économique

Il est évident que le rendement puissance générée - flux thermique ne représente pas le rendement qui mènerait à une rentabilité maximale. Cet aspect, en particulier l'absence de la perte de charge dans la modélisation, de la performance d'un générateur thermoélectrique fut largement ignoré jusqu'à présent. Un futur modèle sera réalisé prenant en considération l'alimentation en puissance additionnelle nécessaire à la pompe en raison de la présence d'un générateur thermoélectrique.

Un tel modèle considérerait le gradient de pression et sa force résultante $\vec{f} = -\nabla\bar{p}$ (White, 2008). En une dimension (la direction du débit) et en état stable, ce dernier se développe en $\int \frac{dF}{dt} dx = -\dot{V} \cdot \Delta p$. La pompe aura donc besoin d'une

puissance additionnelle équivalente à $\dot{V} \cdot \Delta p$ en raison de la présence d'un générateur thermoélectrique. Le gain net de puissance électrique inclura la puissance équilibrante de la force résultante de la perte de charge et la puissance générée par le générateur thermoélectrique.

En réalisant le modèle mathématique incluant le gradient de pression, un modèle économique pourrait être élaboré. Ce modèle économique considérera la puissance nette générée par la technologie proposée et sa valeur en électricité. De plus, le modèle considérera le prix des matériaux, de l'installation et de l'entretien de cette technologie tout en fonction de la quantité de chaleur résiduelle industrielle. La technologie proposée risque de se distinguer par rapport à d'autre forme de récupération énergétique thermique (Cycle de Rankine) en raison de l'immobilité des pièces. Le générateur est sans mécanisme puisque toute conversion ait lieu à l'échelle atomique. Une telle technologie n'aurait donc quasiment aucun coût d'entretien.

7.2.2. Modèle écologique

Un modèle écologique représentant le vrai gain environnemental de la technologie proposée sera réalisé. Les facteurs contributeurs ne seront pas nécessairement les mêmes que dans le modèle économique.

Le coût environnemental de l'extraction des matériaux Bismuth Telluride nécessaires sera comparé au coût des autres matériaux générateurs d'électricité comme les matériaux photovoltaïques. Cet impact négatif sera évalué en fonction de l'impact positif doublement gagnant de la technologie qui génère de l'électricité d'un résidu et qui refroidit un déchet avant de le reintégré dans l'environnement.

7.3. Nouvelle conception

Afin d'augmenter le coefficient de transport thermique une nouvelle conception de générateur thermoélectrique fut réalisée avec une aire de surface de débit

d'eau contre les modules thermoélectriques plus élevée que dans ces prédécesseurs. En effet, une aire de surface plus élevée augmenterait le transport thermique qui injecterait et éjecterait la chaleur du côté chaud et du côté froid respectivement de façon plus efficace. En conséquence le gradient de température nécessaire serait mieux maintenu résultant en une puissance d'électricité plus élevée. Une description sous forme de dessin de cette conception est illustrée dans la figure ci-dessous.

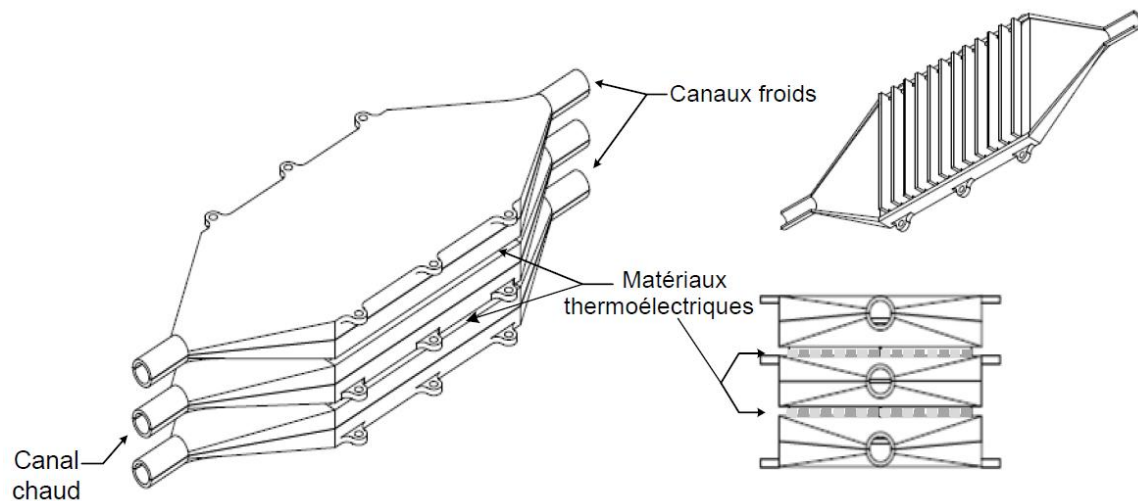


Figure 7.3-1 : Nouvelle conception de forme géométrique d'un générateur thermoélectrique.

7.4. Récupération de la chaleur résiduelle sous forme gazeuse

Afin d'exploiter la chaleur résiduelle industrielle sous forme gazeuse, il serait nécessaire de faire une étude semblable à celle de celle-ci adaptée aux fluides gazeux. La conception d'un tel générateur thermoélectrique considérerait une conduite de gaz chaud entourée des matériaux thermoélectriques pour sustenter un côté du gradient de température désiré. Ces matériaux semi-conducteurs seront eux mêmes sandwichés par un système de caloducs qui servira à refroidir l'autre côté. Des caloducs standards seront adaptés à la diffusion dans l'air ambiant avec des ailettes afin de favoriser l'évacuation de chaleur. On rappelle

qu'un caloduc peut être assimilé à un tube scellé contenant un liquide qui s'évapore et se condense en circuit fermé. Un résumé du mécanisme de transport thermique d'un caloduc est représenté dans la figure ci-dessous ainsi qu'une illustration du générateur proposé.

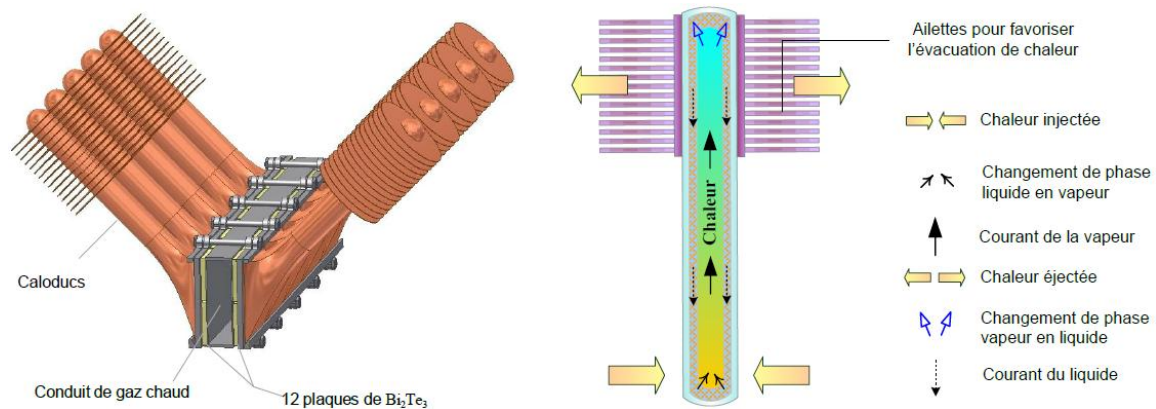


Figure 7.4-1 : Générateur thermoélectrique adapté aux fluides gazeux et description du transport thermique d'un caloduc.

7.5. Capteurs solaires thermoélectriques

Les installations isolées non reliées au réseau hydroélectrique sont alimentées par des générateurs activés par des moteurs à combustion interne qui ont les désavantages de bruit, de pollution et d'usage de carburants non-renouvelables. Aussi, les méthodes photovoltaïques sont très coûteuses. Un des futurs projets propose une alternative basée sur les capteurs solaires thermiques et les caloducs.

La transformation d'énergie solaire en énergie thermique par l'intermédiaire de capteurs solaires thermiques sous vide est présentement seulement utilisée pour réchauffer de l'eau mais offrirait des rendements électriques exceptionnellement élevés si on les couplait avec des éléments Peltier.

Pour concentrer et mieux dissiper les flux thermiques aux interfaces du thermoélectriques, des caloducs seront insérés sur chaque face (voir schéma ci-dessous). Ainsi, à partir d'un gradient de température initié par les capteurs solaires thermiques sous vide stabilisés par des caloducs, on souhaite que

l'association de ses deux technologies puisse être capable de transformer l'énergie solaire en électricité de façon rentable.

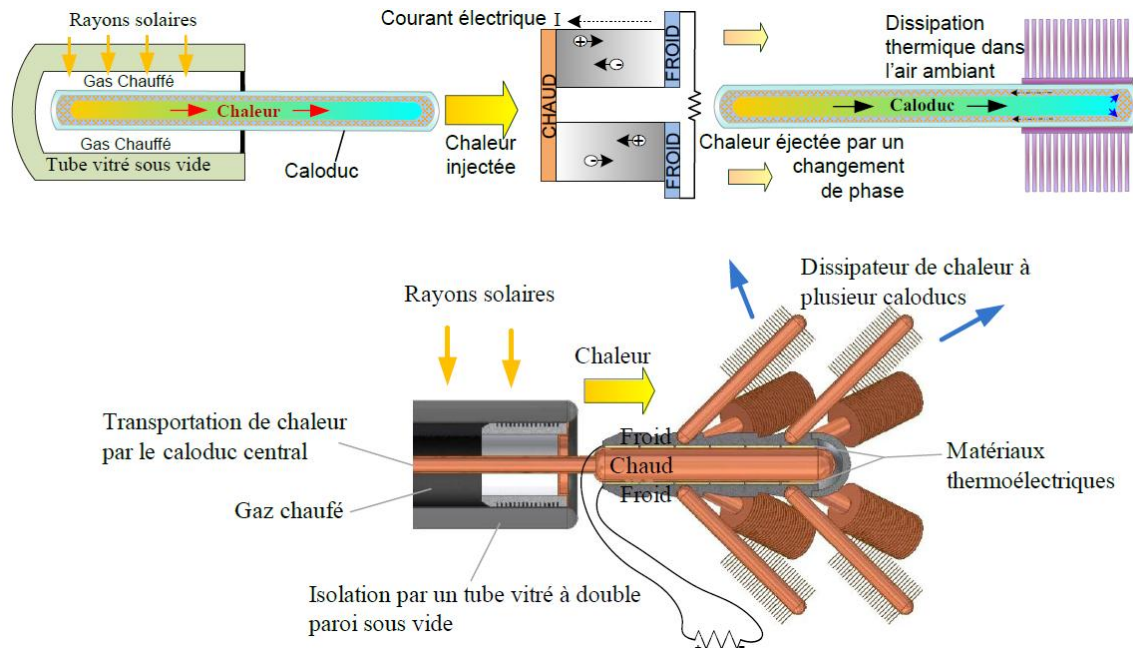


Figure 7.5-1 : Description du transport thermique résultant en une conversion de rayons solaires en électricité sans photovoltaïques.

RAPPORT DE STAGE

Eric Sempels et Nathaniel Lalande-Bertrand ont chacun complété 180 heures de travail sur ce projet dont 120 heures étaient en laboratoire au Cégep de l'Outaouais en présence du technicien Stéphane Piché.

Entre autres, leurs responsabilités incluaient les dessins de montages expérimentales, l'achèvement d'une installation d'essai et l'exécution d'expériences ainsi que l'acquisition de données.

Il est sans hésitation que je souligne qu'Éric, Nathaniel et Stéphane ont complété leurs tâches respectives avec beaucoup de soins et qu'ils ont largement dépassé mes attentes. Leurs dévouement au projet fut son succès.

En outre, l'ingéniosité du technicien Rémi Pelletier était indispensable dans l'effilochage de ce qui est la résistance électrique optimale d'un générateur thermoélectrique. On remercie.

Frédéric J. Lesage
Chargé de projet

La Direction
Cégep de l'Outaouais

Bibliographie

- André, C., Vasilevskiy, D., Turenne, S., & Masut, R. A. (2009). Extruded Bismuth-Telluride-Based n-Type Alloys for Waste Heat Thermoelectric Recovery Applications. *Journal of Electronic Materials* , 38 (7), 1061-1067.
- Bruno, J., Vidal, A., & Coronas, A. (2006). Improvement of the raw gas drying process in olefin plants using an absorption cooling system driven by quench oil waste heat. *Energy Conversion and Management* , 47, 97-113.
- Carey, V. P. (1992). *Liquid-Vapor Phase-change Phenomena*. Taylor and Francis.
- Clin, T., Turenne, S., Vasilevskiy, D., & Masut, R. A. (2009). Numerical Simulation of the Thermomechanical Behavior of Extruded Bismuth Telluride Alloy Module. *Journal of Electronic Materials* , 38 (7), 994-1001.
- Crane, D. T., & Bell, L. E. (2006). Progress Towards the Performance of a Thermoelectric Power Generator. *2006 International Conference on Thermoelectrics*, 1-4244-0811-3/06.
- Crane, D., & Jackson, S. (2004). Optimization of cross flow heat exchangers for thermoelectric waste heat recovery. *Energy Conversion Management* , 45, 1565-1582.
- Guo, X., Xiao, H., & Yang, S. (2010). Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system. *Applied Energy* , 3131-3136.
- Haider, J. H., & Ghojel, J. I. (2001). Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermoelectric generators. *20th International Conference on Thermoelectrics*, (pp. 413-417).
- Hodes, M. (2004). One-dimensional analysis of thermoelectric modules. *Thermomechanical Phenomenon in Electronic Systems-Proceedings of the Intersociety Conference* (pp. 242-250). Las Vegas: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Incropera, F. J., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Introduction to Heat Transfer* (éd. 5e). John Wiley and Sons.

- Kajikawa, T., & Onishi, T. (2008). Development for Advanced Thermoelectric Conversion Systems. *2007 International Conference on Thermoelectrics*, 978-1-4244-2263-0/08.
- Kiran-Ciliz, N. (2003). Reduction in resource consumption by process modification in cotton wet processes. *J. Clean Prod.* , 11, 481-486.
- Kiseev, V. M., Vlassov, V. V., & Muraoka, I. (2010). Experimental optimization of capillary structures for loop heat pipes and heat switches. *Applied Thermal Engineering* , 30, 1312-1319.
- Liu, D., Tang, G.-F., Zhao, F.-Y., & Wang, H.-Q. (2006). Modeling and experimental investigation of looped separate heat pipe as waste heat recovery facility. *Applied Thermal Engineering* , 26, 2433-2441.
- Ma, L., Lu, Z., Zhang, J., & Liang, R. (2010). Thermal performance analysis of the evacuated tube solar collector. *Building and Environment* , 45, 1959-1967.
- Niu, X., Yu, J., & Wang, S. (2009). Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator. *Journal of Power Sources* , 188, 621-626.
- Oral, J., Sikula, J., Puchyr, R., Hajny, Z., Stehlik, P., & Bebar, L. (2005). Processing of waste from pulp and paper plant. *Journal of Cleaner Production* , 13, 509-515.
- Ozalp, N. (2009). Utilization of Heat, Power, and Recovered Waste Heat for Industrial Processes in the U.S. Chemical Industry. *Journal of Energy Resources Technology* , 131/ 022401-1.
- Panton, R. L. (1996). *Incompressible Flow* (éd. 2e). John Wiley & Sons.
- Pulat, E., Etemoglu, A. B., & Can, M. (2009). Waste-heat recovery potential in Turkish textile industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 13, 663-672.
- Rodriguez, A., Vian, J. G., Astrain, D., & Martinez, A. (2009). Study of thermoelectric Systems applied to electric power generation. *Energy Conversion and Management* , 50, 1236-1243.
- Roe, C. L. (2006). *Waste Heat Recovery from Aluminum Smelting Process Off-Gas*. Nine Sigma no. 50292-1.
- Rowe, D. M. (2006). *Thermoelectrics Handbook Macro to Nano*. Taylor & Francis Group.

- Sandoz-Rosado, E., & Stevens, R. (2009). Experimental Characterization of Thermoelectric Modules and Comparison with Theoretical Models for Power. *Journal of Electronic Materials* , DOI:10.1007/s11664-009-0744-0.
- Trinkle, C., Zörner, W., Alt, C., & Stadler, C. (2005). Performance of Vacuum Tube and Flat Plate Collectors Concerning Domestic Hot Water Preparation and Room Heating. *2nd European Solar Thermal Energy Conference 2005*.
- Vasiliev, L. L. (2005). Heat pipes in modern heat exchangers. *Applied Thermal Engineering* , 25, 1-19.
- Wang, F., Chiou, J., & Wu, P. (2007). Economic Feasibility of waste heat to power conversion. *Applied Energy* , 84, 442-454.
- White, F. M. (2008). *Fluid Mechanics* (éd. 6e). McGraw Hill.
- Zang, H., & Zhuang, J. (2003). Research, development and industrial application of heat pipe technology in China. *Applied Thermal Engineering* , 23, 1067-1083.
- Zeng. (2002). Transport waste heat from a nuclear power plant into coastal water. *Coastal Engineering* , 44, 301-319.