



**Développement d'un thermogénérateur pour la récupération de chaleur des industries
de bouletage du minerai de fer dans un contexte d'opérationnalisation du
développement durable**

par Alexandre Gonçalves Andrade

**Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du
grade de Maître ès sciences (M. Sc.) en Ressources Renouvelables**

Québec, Canada

© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

RÉSUMÉ

Le réchauffement climatique est un problème majeur résultant de l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, causée principalement par les activités humaines. Cela entraîne des conséquences graves telles que l'augmentation des températures, la fonte des glaces et des événements climatiques extrêmes. Ce phénomène met en danger notre environnement, la sécurité alimentaire, la santé publique et l'économie mondiale. Pour faire face à ce défi, il est crucial de réduire les émissions de gaz à effet de serre, de promouvoir l'énergie de sources renouvelables et de prendre des mesures d'adaptation. Une action collective à l'échelle mondiale est essentielle pour préserver notre planète et assurer un avenir durable.

Ce mémoire de maîtrise présente le potentiel d'utilisation du concept de thermogénérateur dans certains processus industriels pour récupérer la chaleur perdue et dans le but de répondre partiellement et potentiellement à des cibles d'objectifs de développement durable du Programme 2030 des Nations Unies.

L'objectif principal du mémoire est de proposer une solution efficace pour récupérer la chaleur fatale, qui est généralement perdue et envoyée à l'environnement dans les installations industrielles. Pour ce faire, deux concepts de thermogénérateur ont été conçus avec des méthodes distinctes et ceux-ci ont été testés à l'échelle de laboratoire pour évaluer le potentiel de conversion de la chaleur fatale en électricité. Un prototype utilise la technologie de projection thermique via Plasma Spray et l'autre utilise le concept de thermopile classique. Les performances du thermogénérateur ont d'abord été évaluées en termes de génération de tension (voltage) par différentes échelles de température et ensuite en puissance électrique.

Ce travail détaille le développement des deux prototypes de thermogénérateur, avec l'évaluation de la génération d'électricité obtenue lors des essais. Il présente également une revue de littérature sur les différentes techniques menant à la production d'électricité, sur les technologies de récupération de chaleur des processus industriels, sur les thermogénérateurs, sur les technologies de projection thermique, sur le processus de production de boulettes de minerai de fer et sur les objectifs de développement durable. Un bilan de gaz à effet de serre appliqué à une usine de bouletage de minerai de fer a été réalisé afin de quantifier les bénéfices du projet dans une possible utilisation industrielle.

En raison de la configuration géométrique du prototype utilisant la technologie de projection thermique, il n'a pas été possible d'évaluer efficacement son rendement énergétique. Principalement, l'absence de disponibilité commerciale pour l'acquisition de poudres et de fils semi-conducteurs pouvant servir à la projection thermique a limité la possibilité de créer un prototype fonctionnel avec cette technologie. Conséquemment, un prototype a été fabriqué en utilisant des poudres métalliques. Malheureusement, en raison du transfert rapide de chaleur à partir du substrat métallique, des pertes par effet Joule, d'un revêtement présentant une porosité élevée et d'une épaisseur réduite, il n'a pas été possible d'atteindre un gradient de température suffisant pour générer une quantité mesurable d'électricité.

Le prototype basé sur le concept classique de thermopile offre une possibilité viable, bien que la génération d'électricité soit limitée. Cela s'explique en partie par l'utilisation de fils métalliques conducteurs plutôt que de matériaux semi-conducteurs, ce qui entraîne des pertes d'énergie importantes par effet Joule, réduisant ainsi la quantité totale d'électricité produite. Toutefois, en choisissant soigneusement les matériaux appropriés, il serait envisageable de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'une usine de bouletage de minerai de fer de 3,78 %, dans un scénario d'utilisation d'un pays disposant d'une infrastructure thermoélectrique.

Cette solution, qui nécessite plus de recherche et développement, peut contribuer à l'atteinte de cibles d'objectifs de développement durable des Nations Unies, notamment en luttant contre le changement climatique (Objectif 13) et en favorisant une énergie propre et abordable, ainsi qu'un mode de production plus durable (Objectifs 7 et 12). La récupération de la chaleur fatale des usines permet d'améliorer l'efficacité énergétique de l'industrie, de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et d'atténuer l'impact environnemental (Objectifs 7 et 9). Le développement d'un thermogénérateur pouvant être utilisé à l'échelle industrielle constitue une innovation pouvant générer des emplois, stimuler l'entrepreneuriat et contribuer à la croissance des petites et moyennes entreprises (Objectif 8). À ces fins, la recherche et le développement de technologies capables de réaliser cet objectif contribuent à l'innovation et augmentent le nombre de personnes et entreprises travaillant dans les secteurs de recherche et développement (Objectifs 9 et 17).

ABSTRACT

Climate change represents a critical challenge stemming from the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere, primarily driven by human activities. This issue results in severe consequences, including rising temperatures, ice cap melting, and extreme climatic events. This phenomenon poses a substantial threat to our environment, food security, public health, and the global economy. To address this pressing issue, it is imperative to reduce greenhouse gas emissions, foster the use of renewable energy sources, and implement adaptive measures. Global collective action is paramount to preserve our planet and ensuring a sustainable future.

This master's thesis explores the potential application of thermogenerator concepts in specific industrial processes to use wasted heat, thereby contributing partially and potentially to the objectives outlined in the Sustainable Development Goals of the United Nations' 2030 Program.

The primary aim of this thesis is to propose an effective solution for recuperating waste heat, which is typically dissipated into the environment in industrial facilities. To achieve this objective, two thermogenerator concepts were formulated using distinct methods and subjected to laboratory-scale testing to evaluate their capacity to convert waste heat into electricity. One prototype leverages thermal spray projection technology via Plasma Spray, while the other employs the classical thermopile concept. The thermogenerator's performance was initially assessed in terms of voltage generation across various temperature ranges and subsequently in terms of electrical power generation.

This work meticulously outlines the development of both thermogenerator prototypes, along with a comprehensive evaluation of the electricity generation achieved during the testing phase. Additionally, it provides an in-depth literature review covering various techniques related to electricity generation, heat recovery technologies in industrial processes, thermogenerators, thermal spray projection technologies, the iron ore pellet production process, and sustainable development goals. A greenhouse gas assessment was conducted for an iron ore pelletizing plant to quantify the potential benefits of the project when applied in an industrial context.

Due to the geometric configuration of the prototype using thermal spray projection technology, it was not possible to efficiently evaluate its energy efficiency. Mainly, the absence of commercially available powders and semiconductor wires for thermal spray projection limited the ability to create a functional prototype using this technology. Consequently, a prototype was fabricated using metallic powders. Unfortunately, due to the rapid heat transfer from the metallic substrate, losses by Joule effect, porosity on the coating, and a limited coating thickness, it was not feasible to attain a sufficient temperature gradient to generate a measurable quantity of electricity.

The prototype based on the classic thermopile concept offers a viable opportunity, although with limited electricity generation. This limitation partly results from the use of conductive metallic wires rather than semiconductor materials, leading to significant losses by Joule effect and a reduced overall electricity output. However, with meticulous material selection,

it becomes conceivable to reduce greenhouse gas emissions by 3.78% of an iron ore pelletizing plant located in a country using thermoelectric infrastructure.

This solution, which requires further research and development, holds the potential to contribute to the United Nations' Sustainable Development Goals, particularly in climate change mitigation (Goal 13) and the promotion of clean and affordable energy, combined with a more sustainable mode of production (Goals 7 and 12). The recovery of wasted heat from industrial facilities enhances energy efficiency, diminishes reliance on fossil fuels, and mitigates environmental impact (Goals 7 and 9). The development of an industrial-scale thermogenerator constitutes an innovative approach that can generate employment opportunities, stimulate entrepreneurship, and facilitate the growth of small and medium-sized enterprises (Goal 8). Ongoing research and development of technologies designed to achieve these goals are instrumental in fostering innovation and expanding the involvement of individuals and businesses in research and development sectors (Goals 9 and 17).

TABLE DE MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT.....	iv
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vii
1. INTRODUCTION	1
1.1 CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ	3
1.2 CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LES TECHNOLOGIES DE RÉCUPÉRATION DE LA CHALEUR DE PROCESSUS INDUSTRIELS	7
1.3 CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LES THERMOGÉNÉRATEURS	13
1.3.1 THERMOPILES.....	18
1.4 CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LA PROJECTION THERMIQUE	19
1.4.1 FLAME SPRAY	22
1.4.1.1 FLAME POWDER ET WIRE FLAME	22
1.4.1.2 DETONATION-GUN SPRAYING (D-GUN™).....	23
1.4.1.3 HIGH VELOCITY OXY-FUEL (HVOF).....	24
1.4.2 ELECTRIC ARC SPRAY	25
1.4.2.1 ELECTRIC ARC	25
1.4.3 PLASMA ARC SPRAY	26
1.4.3.1 ATMOSPHERIC PLASMA SPRAYING (APS).....	26
1.4.3.2 VACUUM PLASMA SPRAYING (VPS)	27
1.5 CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LE PROCESSUS DE BOULETAGE DE MINÉRAI DE FER.....	28
1.5.1 LE PROCESSUS DE BOULETAGE DE MINÉRAI DE FER.....	29
1.5.2 LES ÉMISSIONS DE GES DANS L'INDUSTRIE DU BOULETAGE DE MINÉRAI DE FER	35

1.6 CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE.....	38
1.7 OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES.....	48
2. CONCEPT D'UTILISATION DE LA PROJECTION THERMIQUE POUR LA RÉCUPÉRATION DE CHALEUR : MATÉRIEL, MÉTHODES, RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	51
2.1 MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	51
2.1.1 SITE D'ÉTUDE.....	51
2.1.2 MATÉRIEL	51
2.1.3 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	52
2.1.4 PROCESSUS DE SÉLECTION DES MATÉRIAUX	52
2.1.5 MESURES DES VARIABLES DE PERFORMANCE DU THERMOGÉNÉRATEUR.....	54
2.1.6 PLAN DE TRAVAIL ET DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE	55
2.1.7 ANALYSES STATISTIQUES.....	56
2.2 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE.....	57
2.2.1 DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE - ÉTAPE 1.....	57
2.2.2 DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE - ÉTAPE 2.....	62
2.2.3 DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE - ÉTAPE 3.....	67
2.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION : ESSAIS DU PROTOTYPE.....	69
3. CONCEPT DE THERMOPILE POUR LA RÉCUPÉRATION DE CHALEUR : MATÉRIEL, MÉTHODES, RÉSULTATS ET DISCUSSION	75
3.1 MATÉRIEL ET MÉTHODES	75
3.1.1 SITE D'ÉTUDE.....	75
3.1.2 MATÉRIEL	75
3.1.3 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	75
3.1.4 MESURES DES VARIABLES DE PERFORMANCE DU THERMOGÉNÉRATEUR.....	77

3.1.5 PLAN DE TRAVAIL ET DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE	78
3.1.6 ANALYSES STATISTIQUES.....	81
3.2 RÉSULTATS ET DISCUSSION : ESSAIS DU PROTOTYPE	81
4. DISCUSSION SUR LES IMPACTS DU PROJET SUR L'OPÉRATIONNALISATION DU DÉVELOPPEMENT DURABLE.....	87
4.1 BÉNÉFICES ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DE L'UTILISATION DU THERMOGÉNÉRATEUR	88
4.1.1 BÉNÉFICES ÉCONOMIQUES	89
4.1.2 BÉNÉFICES ENVIRONNEMENTAUX.....	92
4.2 RÉPONSES À DES CIBLES DES 17 ODD DU PROGRAMME 2030 DES NATIONS UNIES 104	
5. CONCLUSION.....	111
LISTE DE RÉFÉRENCE	114
ANNEXE 1	121

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE GÉNÉRATION D'ÉLECTRICITÉ.	6
TABLEAU 2. COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE RÉCUPÉRATION DE LA CHALEUR.	12
TABLEAU 3. GRANDEUR DES THERMOGÉNÉRATEURS SELON L'APPLICATION (MAMUR ET AHISKA 2014 - ADAPTÉ).	16
TABLEAU 4. TYPES DE TECHNIQUES DE PROJECTION THERMIQUE LES PLUS UTILISÉS DANS L'INDUSTRIE, SELON DAVIS (2004).	20
TABLEAU 5. ÉMISSION DE GES PAR CARACTÉRISTIQUE DE PROCÉDÉS (BRAGA <i>ET AL.</i> 2023 - MODIFIÉ)	37
TABLEAU 6. COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE RÉCUPÉRATION DE LA CHALEUR.	59
TABLEAU 7. PERFORMANCE DU PROJET EN COMPARAISON AVEC LE MODULE DE PELTIER TRÈS PERFORMANT.	85
TABLEAU 8. DIMENSIONS D'ENDROITS D'INSTALLATION DU THERMOGÉNÉRATEUR.	91
TABLEAU 9. CALCULS DES BÉNÉFICES ÉCONOMIQUES DU CONCEPT DE THERMOPILE CLASSIQUE.	92
TABLEAU 10. POTENTIELS DE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL (PRG) SUR 100 ANS ET PROVENANT DU CINQUIÈME RAPPORT D'ÉVALUATION DU GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (PRG 100 – GIEC 2013) (IPCC 2013)	94
TABLEAU 11. FACTEURS D'ÉMISSION DES ADDITIFS UTILISÉS DANS LA PRODUCTION DE BOULETTES DE MINÉRAI DE FER.	94
TABLEAU 12. SCÉNARIOS DE RÉFÉRENCE ET DE PROJET ASSOCIÉS À L'UTILISATION D'UN THERMOGÉNÉRATEUR DANS UNE USINE DE BOULETAGE DE MINÉRAI DE FER.	96
TABLEAU 13. CONSOMMATION D'ADDITIFS DANS UNE USINE DE BOULETAGE DE MINÉRAI DE FER POUR LES CALCULS DU PROJET.	97
TABLEAU 14. SOMMAIRE DES CALCULS D'ÉMISSIONS DE GES POUR LES SCÉNARIOS DE RÉFÉRENCE ET DE PROJET. ANALYSE FAITE SELON LES PRINCIPES DE ISO 14064-1.	98

TABLEAU 15. DÉTAILS D'ÉMISSIONS DE GES POUR LES SCÉNARIOS DE RÉFÉRENCE ET DE PROJET. ANALYSE FAITE SELON LES PRINCIPES DE ISO 14064-1.....	99
TABLEAU 16. CALCULS D'ÉMISSION DES GES POUR LES SCÉNARIOS UTILISANT UN TEG CONVENTIONNEL. ANALYSE FAITE SELON LES PRINCIPES DE LA NORME ISO 14064-1.....	103
TABLEAU 17. DÉFIS DE RÉDUCTION D'ÉMISSION DE GES DANS L'INDUSTRIE DE BOULETAGE DE MINÉRAI DE FER (PRINCIPAUX JOUEURS DANS LE MARCHÉ).....	108

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. LES 17 OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE DU PROGRAMME DE DÉVELOPPEMENT DURABLE À L'HORIZON 2030 (NATIONS UNIES 2015).	1
FIGURE 2. PROCESSUS HALL-HÉROULT DE LA TRANSFORMATION D'ALUMINE EN ALUMINIUM (TIRÉE DE KVANDE ET DRABLOS 2014 AVEC AUTORISATION).	8
FIGURE 3. A) SCHÉMA D'UN THERMOGÉNÉRATEUR SIMPLE (ENESCU 2019). B) REPRÉSENTATION D'UN MODULE DE PELTIER COMPOSÉ DE DIVERS THERMOÉLÉMENTS (TIRÉE DE SNYDER ET TOBERER 2008 AVEC AUTORISATION).	15
FIGURE 4. FIGURES DE MÉRITE (ZT) DES SEMI-CONDUCTEURS À DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES (HE <i>ET AL.</i> 2013).....	18
FIGURE 5. SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT D'UNE THERMOPILE (WIKIPEDIA 2022).	18
FIGURE 6. CARACTÉRISTIQUES COMMUNES DU REVÊTEMENT PAR PROJECTION THERMIQUE. TIRÉ DE TEJERO-MARTIN <i>ET AL.</i> (2019).	21
FIGURE 7. PARAMÈTRES ET VARIABLES TYPIQUES DE LA PROJECTION THERMIQUE (KOIVULUOTO 2022).	22
FIGURE 8. SCHÉMA DU PROCESSUS DE BOULETAGE DE MINERAI DE FER – <i>TRAVELING GRATE</i>	31
FIGURE 9. FLUX DES GAZ À L'INTÉRIEUR DU FOUR DE BOULETAGE DE MINERAI DE FER (TIRÉE DE THOMAZINI 2021 AVEC AUTORISATION).	34
FIGURE 10. CONCEPT DU THERMOGÉNÉRATEUR À PARTIR DE LA PROJECTION THERMIQUE.	52
FIGURE 11. PLAQUE CHAUFFANTE AGITATRICE CIMAREC™ BASIC STIRRING HOTPLATES.....	54
FIGURE 12. A) MULTIMÈTRE MODÈLE FLUKE 289, B) MULTIMÈTRE MODÈLE FLUKE 1587 FC.....	55
FIGURE 13. SÉRIE GALVANIQUE (TUGSATAYDIN 2020).	58
FIGURE 14. DÉMONSTRATION DE COMBINAISONS DE MATÉRIAUX POUR L'ESSAI DE SÉLECTION DES MEILLEURS COUPLAGES.	59

FIGURE 15. A) SCHÉMA D'ESSAIS JUSQU'À 300 °C. B) SCHÉMA D'ESSAIS AVEC DES TEMPÉRATURES PLUS ÉLEVÉS QUE 300 °C.	60
FIGURE 16. SCHÉMA D'ESSAI POUR L'ÉVALUATION DE COURANT GÉNÉRÉ PAR COUPLAGE DES MATÉRIAUX.	60
FIGURE 17. COURBE DE TENSION ÉLECTRIQUE (MV) PAR TEMPÉRATURE DES COMBINAISONS DES FILS DE <i>TWIN-ARC SPRAY</i> POUR L'ÉTAPE 1 DES ESSAIS.	61
FIGURE 18. COURBE DE PUISSANCE ÉLECTRIQUE (MW) PAR TEMPÉRATURE DES COMBINAISONS DES FILS DE <i>TWIN-ARC SPRAY</i> POUR L'ÉTAPE 1 DES ESSAIS.	61
FIGURE 19. EFFETS DE LA PROJECTION THERMIQUE PAR LA TECHNOLOGIE <i>TWIN ARC</i> SUR LE BOIS.	62
FIGURE 20. EFFETS DE LA PROJECTION THERMIQUE PAR LA TECHNOLOGIE <i>TWIN-ARC</i> SUR UNE BASE MÉTALLIQUE.	63
FIGURE 21. EFFETS DE LA PROJECTION THERMIQUE PAR LA TECHNOLOGIE <i>PLASMA SPRAY</i> SUR UNE BASE MÉTALLIQUE.	64
FIGURE 22. ANALYSE MICROSCOPIQUE DE LA PROJECTION THERMIQUE PAR LA TECHNOLOGIE <i>PLASMA SPRAY</i> SUR UNE BASE MÉTALLIQUE. AMPLIFICATION : 10 MIL (MILLIÈME DE POUCE). MICROSCOPE : NIKON OPTHIPOT-100. LOGICIEL : CLEMEX VISION.	65
FIGURE 23. ÉTAPES DE FABRICATION DU PROTOTYPE AVEC LA PROJECTION THERMIQUE.	66
FIGURE 24. PROTOTYPE FAIT À PARTIR DE LA PROJECTION THERMIQUE.	67
FIGURE 25. CONFIGURATION DU PROTOTYPE PAR PROJECTION THERMIQUE POUR LES ESSAIS.	67
FIGURE 26. SCHÉMA D'ESSAI ET PHOTO DE L'UTILISATION D'UNE PLUS GRANDE SURFACE DE PROJECTION DE 250 CM ²	68
FIGURE 27. PERFORMANCE DE GÉNÉRATION D'ÉLECTRICITÉ DE LA COMBINAISON DES FIL 3 X FIL 5 PAR RAPPORT AU CONCEPT D'UTILISATION D'UNE PLUS GRANDE SURFACE (UTILISATION DES MÊMES MATÉRIAUX).	69
FIGURE 28. TEMPÉRATURE DU A) PANNEAU CHAUFFANT + SABLE, B) INTÉRIEUR DU TUYAU, C) SURFACE FROIDE DU TUYAU. ESSAIS À TEMPÉRATURE DE 50 °C.	70

FIGURE 29. TEMPÉRATURE DU A) PANNEAU CHAUFFANT + SABLE, B) INTÉRIEUR DU TUYAU, C) SURFACE FROIDE DU TUYAU. ESSAIS À TEMPÉRATURE DE 70 °C.	70
FIGURE 30. TEMPÉRATURE DE A) LA PARTIE EXTERNE DU TUBE AVEC LA GLACE CARBONIQUE, B) LA GLACE CARBONIQUE. TEMPÉRATURE DE 50 °C.	71
FIGURE 31. ESSAIS AVEC UNE CHAMBRE INSTRUMENTÉE. TENSION (VOLTAGE) GÉNÉRÉE PAR SECONDE, PROTOTYPE UTILISANT LA PROJECTION THERMIQUE.	72
FIGURE 32. ANALYSE MICROSCOPIQUE DE LA PROJECTION THERMIQUE DES COUCHES DU PROTOTYPE EN TUBE. AMPLIFICATION : 8 MIL (MILLIÈME DE POUCE). MICROSCOPE : NIKON OPTHIPOT-100. LOGICIEL : CLEMEX VISION.	73
FIGURE 33. PROJECTION THERMIQUE PAR <i>PLASMA SPRAY</i> AVEC COUCHE DE FINITION PLUS ÉPAISSE.	74
FIGURE 34. TENSION DE DIFFÉRENTS THERMOCOUPLES PAR RAPPORT À UNE TEMPÉRATURE DE RÉFÉRENCE DE 0 °C SELON DIN EN 60 584 (CAMBRIDGE 2009). PHOTO : (WIKIPEDIA 2023).	76
FIGURE 35. DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE BASÉ SUR LES FILS DE THERMOCOUPLES.	77
FIGURE 36. ASSEMBLAGE DES CÂBLES DU PROTOTYPE BASÉ SUR LE CONCEPT DE THERMOPILE.	79
FIGURE 37. ESSAIS AVEC LE PROTOTYPE BASÉ SUR LE CONCEPT DE THERMOPILE.	80
FIGURE 38. ESSAIS POUR L'ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE INTERNE DU CIRCUIT.	80
FIGURE 39. ANALYSE DE RÉGRESSION DES RÉSULTATS DE TENSION (VOLTAGE) D'ESSAIS COMPARÉE À LA COURBE DE VOLTAGE DU THERMOCOUPLE DE TYPE E SELON LA LITTÉRATURE.	81
FIGURE 40. IMPACT DE LA QUANTITÉ DE CONNEXIONS EN SÉRIE SUR LE VOLTAGE GÉNÉRÉ EN FONCTION DE LA DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURES.	82
FIGURE 41. HISTOGRAMME DE LA RÉSISTANCE INTERNE DU CIRCUIT PAR LA QUANTITÉ DE CONNEXIONS.	83

FIGURE 42. GRAPHIQUE DE DISPERSION DE LA RÉSISTANCE INTERNE DU CIRCUIT/QUANTITÉ DE CONNEXIONS PAR GRADIENT DE TEMPÉRATURE.	83
FIGURE 43. HISTOGRAMME DE TENSION (VOLTAGE) PAR TEMPÉRATURE PAR QUANTITÉ DE CONNEXIONS EN SÉRIE.	84
FIGURE 44. PROPOSITION DE BRIQUE RÉFRACTAIRE GÉNÉRATRICE D'ÉLECTRICITÉ (NE REPRÉSENTE PAS LE PRODUIT FINAL NI LA QUANTITÉ DE CONNEXIONS ESTIMÉE).....	90

REMERCIEMENTS

Je remercie d'abord Dieu de m'avoir donné la capacité intellectuelle, physique et émotionnelle de relever le défi d'étudier, de travailler et de soutenir ma famille en même temps.

Un remerciement spécial à la compagnie Métal 7 Inc. de m'avoir donné la chance de poursuivre mes études par les soutiens financier, logistique et technique qu'elle m'a offerts durant cette étape de ma vie : spécialement l'équipe technique, soit Steve Beaudin, Michael Bacon, Marc-André Ringuet et Adam Truchon. Leurs conseils et leur expertise ont grandement contribué à la qualité de la recherche et à la réalisation de ce travail.

Un grand merci à mes directeur et codirecteur de recherche Patrick Faubert et Lukas Dion, respectivement, pour leur supervision durant cette période de la maîtrise et pour toujours avoir cru à mon potentiel. Leurs compétences, leur expertise et leur engagement ont été inestimables dans la réussite de mon mémoire. Un remerciement spécial à l'équipe du Groupe de recherche en ingénierie des procédés et systèmes (GRIPS) de l'UQAC pour l'aide dans la réalisation des essais de validation du concept développé. Je remercie entre autres Martin Truchon pour les essais effectués dans le laboratoire.

Finalement, je remercie ma famille de m'avoir aidé à garder le cap pendant mon parcours et de m'avoir soutenu émotionnellement dans les moments difficiles. Leurs encouragements et leur amour m'ont donné la force nécessaire pour atteindre mes objectifs et réaliser ce projet.

1. INTRODUCTION

La consommation énergétique mondiale est une préoccupation croissante au sein des entreprises et des gouvernements autour du monde. La lutte aux changements climatiques nécessite de la recherche pour faciliter l'accès à l'énergie de sources renouvelables, afin de réduire l'empreinte environnementale des entreprises et les émissions de gaz à effet de serre (GES). La valorisation de la chaleur générée par certains processus industriels se révèle être une source de capture d'énergie intéressante, particulièrement pour les entreprises qui utilisent des fours à haute température.

Pour représenter la préoccupation des organismes mondiaux aux enjeux environnementaux, 17 objectifs de développement durable (ODD) ont été adoptés par les Nations Unies en 2015 dans le cadre du Programme de développement durable à l'horizon 2030 Nations Unies (2015) (nommé ci-après « Programme 2030 »), visant entre autres la prospérité et la protection de la planète (Figure 1). Les 17 ODD sont composés de 169 cibles pour inciter la prise d'actions ambitieuses pour un changement réel du monde vers l'application d'un développement durable. La valorisation de chaleur provenant de processus industriels est une mesure de mise en œuvre du développement durable et s'intègre dans la réponse à ces 17 ODD.



CC-BY-SA-4.0

Figure 1. Les 17 objectifs de développement durable du Programme de développement durable à l'horizon 2030 (Nations Unies 2015).

Il est estimé que plus de 68 % de l'énergie primaire utilisée au monde est perdue sous forme de chaleur (Zaferani *et al.* 2021). Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (2023) estime que 20 à 50% de l'énergie ajoutée dans les processus industriels est perdue sous forme de gaz d'exhaustion, refroidissement de l'eau et de la chaleur perdue dans le réchauffement de surfaces d'équipements et produits. Si l'énergie perdue dans les processus industriels aux États-Unis était récupérée et utilisée de manière efficace, elle pourrait potentiellement contribuer à réduire de 20 % la production nationale d'énergie, sans le moindre impact sur l'environnement (Ladam *et al.* 2011). On estime qu'environ 50 % de l'énergie utilisée dans le processus de transformation d'alumine en aluminium est perdue sous forme de chaleur (Ladam *et al.* 2011). Dans les processus du bouletage de minerai de fer, il y a deux différentes sources de minerais utilisés, les minerais magnétites (Fe_3O_4) et les minerais hématites (Fe_2O_3). Seul le minerai magnétite (la forme oxydée du minerai) libère l'énergie dans le processus de cuisson, par un processus d'oxydation de la magnétite en hématite. Ce qui représente une consommation énergétique jusqu'à 60 % moins grande que le processus de cuisson de l'hématite. Néanmoins, la grande majorité des usines de bouletage de minerai de fer dans le monde utilisent du minerai hématite ou un mélange de magnétite et hématite. Ces usines utilisent une réaction endothermique, c'est à dire qui consomme l'énergie pour la transformation de l'hématite (Fe_2O_3 à Fe^{++}) et les réactions de décomposition des carbonates (CaCO_3 à CaO et/ou MgCO_3 à MgO). La consommation énergétique typique d'une usine de bouletage à hématite se situe entre 900 à 1110 MJ/tonne de boulettes (Nordgren 2010) alors que pour une usine de bouletage à magnétite cette consommation varie de 630 à 900 MJ/tonne de boulettes (Souza et Machado 1976). Il est estimé qu'environ 50 % de l'énergie apportée, soit sous la forme de combustible liquide ou gazeux, soit sous la forme de combustible solide à l'intérieur des boulettes, est perdue sous forme de chaleur dans les cheminées des fourneaux, information est basée sur les fours de modèle Kiln de ciment (Zaferani *et al.* 2021). Souza et Machado (1976) ont calculé des pertes thermiques de 29,18% dans un four de bouletage de minerai de fer hématite.

Ce travail vise à développer et à évaluer la performance d'un dispositif capable d'utiliser la chaleur perdue dans les processus industriels pour la convertir sous forme d'électricité, pouvant être utilisée dans un procédé industriel ou alimenter le réseau électrique locale.

Les chapitres d'introduction sont divisés de façon à faire une revue de littérature des sujets touchés par le projet : soit les technologies de génération d'électricité, les technologies utilisées dans les processus industriels pour la valorisation de la chaleur, le processus de projection thermique, les usines de bouletage de minerai de fer et le développement durable.

1.1 CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Pour mieux comprendre les enjeux liés à la génération et à la capture de l'énergie, il est d'abord nécessaire de connaître les différentes formes que ces concepts peuvent prendre, en soulignant les points positifs et les limites technologiques qui leur sont associés. Il existe plusieurs processus menant à la génération de l'électricité qui sont couramment utilisés à l'échelle commerciale : les processus nucléaire, thermoélectrique, hydroélectrique, solaire et éolien.

La production de l'énergie nucléaire est induite par l'impact des neutrons dans les noyaux des atomes des particules nucléaires. Par exemple, le minerai d'uranium-238, qui contient une quantité élevée d'énergie, est concentré sous la forme d'isotopes fissiles. Cette réaction est ce qu'on appelle une fission. Cette fission est convertie dans une réaction en chaîne qui libère des neutrons générant plus d'impact sur les atomes. La réaction se produit dans un bain d'eau ou un autre modérateur à une température d'environ 300 °C. Le modérateur fait chauffer une deuxième source d'eau et produit de la vapeur qui sera convertie en énergie mécanique à travers le mouvement de rotation d'une turbine, puis transformée en énergie électrique à travers un générateur électrique (Sami 2010; Ladam *et al.* 2011; Sustainable Development Commission 2016). L'efficacité de génération de l'énergie nucléaire de la source primaire est au mieux de 35 % (Roth 2004).

L'énergie thermoélectrique représente environ 38 % de la production globale d'énergie (Zierold et Odoh 2020). Cette source d'énergie repose sur le même principe de production de l'énergie nucléaire, mais sa source de chaleur est la combustion d'un carburant d'origine fossile solide ou gazeuse, comme le charbon, le mazout lourde ou léger ou le gaz naturel. Le carburant est brûlé dans des chaudières et la chaleur générée réchauffe de l'eau dans des tiges

à l'intérieur des chaudières. Les tiges contenant de l'eau chaude transfèrent une partie de la température à un bain d'eau et génèrent ainsi de la vapeur. Cette vapeur, à haute température et sous pression, fera tourner les turbines grâce à la conversion de la chaleur en énergie mécanique. Ainsi, l'électricité sera créée par des générateurs électriques (USGS 2018). L'efficacité de génération de l'énergie thermoélectrique varie de 45 % à 58 %, selon la source (Roth 2004). Zhang (2020) présente une efficacité de transformation de l'énergie thermoélectrique qui se situe entre 38 % et 44 %, tout dépendant de la méthode de production utilisée, soit le sous-critique, le supercritique ou l'ultra-supercritique, respectivement. Il existe également d'autres sources de génération d'électricité, telle que la biomasse.

L'énergie hydroélectrique est une source d'énergie propre et de source renouvelable, où l'énergie provient de l'eau provenant de rivières, lacs ou réservoirs dont les crues sont retenues par des barrages pour forcer le passage de l'eau en direction de turbines connectées à un générateur. Partant du principe d'induction électromagnétique, le mouvement des turbines génère de l'électricité à travers le générateur, composé d'un rotor magnétique (stator) et des conducteurs. Comparés aux coûts de l'énergie thermoélectrique ou nucléaire, les coûts liés à la production de l'énergie hydroélectrique sont les plus bas (Kaunda *et al.* 2012). L'efficacité de génération de l'énergie de cette technologie, qui se situe à 85 %, est aussi plus élevée que celle d'autres technologies (Roth 2004). Cependant, la génération de l'énergie est fortement dépendante du régime pluvial local, au grand dam des régions qui souffrent de sécheresse saisonnière.

Une autre technologie de génération d'électricité moins polluante est l'énergie solaire. Connue pour produire de l'énergie « écoresponsable », celle-ci met à profit la technologie photovoltaïque ou héliothermique (Alanne et Saari 2006). L'énergie solaire arrive à la surface du globe par le biais de la lumière. Une partie de cette énergie est dispersée, absorbée par des nuages et reflétée, ce qu'on appelle communément l'effet albedo. La lumière solaire qui traverse l'atmosphère terrestre peut être réutilisée par des générateurs photovoltaïques ou par des thermogénérateurs (Panwar *et al.* 2011). L'énergie photovoltaïque utilise les photons présents dans les rayons solaires afin de générer un champ électrique et de l'électricité sans une source de conversion de l'énergie. Les matériaux des panneaux solaires sont des semi-conducteurs, normalement faits à base de silice. Cette technologie atteint une efficacité de

conversion d'environ 90 % sur une période de 10 ans et de 80 % sur une période de 25 ans pour les systèmes domestiques (Kannan et Vakeesan 2016). L'énergie héliothermique utilise la lumière du soleil. Celle-ci est concentrée sur une surface parabolique dirigée vers le tuyau central où la lumière est convertie en chaleur. Quant à lui, le tuyau transporte le fluide thermique, qui sera réchauffée jusqu'à une température de 380 °C. Le fluide thermique est acheminé vers une turbine, qui est activée par la vapeur du fluide thermique (Kannan et Vakeesan 2016). La récupération directe de la lumière du soleil est aussi utilisée pour réchauffer de l'eau, des piscines et d'autres systèmes qui utilisent de la chaleur (Kumar *et al.* 2015).

La production de l'énergie éolienne se fait par la capture de l'énergie cinétique du vent qui est transférée aux turbines éoliennes. La forme des hélices des turbines facilite le mouvement circulaire. Ce mouvement fait tourner le rotor de la turbine et génère de l'électricité, qui pourra être utilisée directement comme produit final ou pour alimenter le réseau électrique local. La production de l'électricité éolienne est directement proportionnelle à la dimension des turbines et à l'impact des vents sur les hélices. Les petits parcs éoliens peuvent générer entre 0,1 et 9,5 mégawatts. Il existe deux types d'ingénierie en ce qui a trait aux turbines éoliennes, soit les turbines à axe horizontal (*Horizontal-axis wind turbines* – HAWT) ou les turbines à axe vertical (*Vertical-axis wind turbines* – VAWT), les plus communs étant les HAWT. Une façon d'améliorer l'efficacité de transformation de l'énergie éolienne consiste à utiliser une conversion des rotations des hélices de la turbine au rotor du générateur de l'énergie, avec le but d'augmenter sa vitesse de rotation (Twidell 2006). Point positif : il s'agit d'une source d'énergie renouvelable. Son temps de vie dépasse les 20 ans et on compte seulement des coûts d'installation et d'entretien. Par contre, il s'agit d'un système qui nécessite une sélection rigoureuse quant aux endroits qui permettent l'installation de la technologie. Les coûts d'installation sont très élevés. La pollution sonore est un grand problème, sans compter la mort d'individus de certaines populations d'oiseaux (Booster 2017).

Une comparaison de l'efficacité maximale de chaque technologie basée sur l'efficacité de conversion de l'énergie, l'impact environnemental, le pourcentage d'utilisation de la technologie dans le monde et ses limitations est présentée au Tableau 1.

Tableau 1. Comparaison entre les différentes technologies de génération d'électricité.

Paramètre	Énergie nucléaire	Énergie thermoélectrique	Énergie hydroélectrique	Énergie solaire	Énergie éolienne
Efficacité maximale*	35 %	38-44 %	85 %	80 – 90 %	20-40 %
Impact sur les émissions de GES	Faible	Élevé	Faible	Faible	Faible
Utilisation mondiale**	5 %	81.2 % (pétrole et dérivés, charbon, gaz naturel)	2,5 %	1,0 %	1,0 %
Limitation	Gestion de matière primaire, gestion de résidus	Gestion de matière primaire, gestion de résidus	Régime pluviométrique	Présence du soleil pendant toute l'année	Grande quantité de vents
Références	(Roth 2004; Sami 2010; Ladam <i>et al.</i> 2011; Sustainable Development Commission 2016)	(Roth 2004; USGS 2018; Zhang 2020; Zierold et Odoh 2020)	(Roth 2004; Kaunda <i>et al.</i> 2012)	(Alanne et Saari 2006; Panwar <i>et al.</i> 2011; Kumar <i>et al.</i> 2015; Kannan et Vakeesan 2016)	(EPA - United States Environmental Protection Agency 2013; Mishra 2017)
Référence sur l'utilisation mondiale	(statistics 2020)				

* Sur la base d'énergie primaire de production d'électricité

** 9,3 % représente la source d'énergie provenant de biomasse.

L'environnement et la population sont les plus affectés par la production et la consommation de l'électricité de source thermoélectrique, qui représente un impact important sur les émissions de GES et d'autres gaz par la combustion des combustibles fossiles (Halmann et Steinberg 1998). L'exploitation minière de combustibles fossiles et de sources nucléaires a des impacts environnementaux importants sur les écosystèmes (Schlamadinger *et al.* 1997). L'énergie hydroélectrique est fortement dépendante du régime pluvial de la région où se trouve la centrale. À cause du changement climatique, la gestion des réservoirs est plus difficile chaque année (Kaunda *et al.* 2012). Une centrale hydroélectrique génère aussi une quantité de GES durant son cycle de vie, d'environ 15 à 25 g CO₂-éq/kWh_{el}, ce qui demeure moins important que ce que produit une usine thermoélectrique, soit environ 600 à 1200 g CO₂-éq/kWh_{el} (Kaunda *et al.* 2012). L'énergie solaire semble être une bonne source de capture d'énergie, soit par les utilisateurs finaux ou

par les entreprises, mais pour une efficacité élevée, il faut que celle-ci soit installée dans des endroits où il y a un rayonnement solaire durant la majeure partie de l'année et une faible nébulosité, car cela impacte directement la surface de collecte des rayons et génère de l'intermittence, nécessitant un système couplé avec des batteries. Tout cela augmente les coûts d'investissement et l'empreinte environnementale (Kannan et Vakeesan 2016). L'énergie éolienne nécessite un régime éolien spécifique pour apporter des bénéfices (Mishra 2017). Ainsi, malgré les bénéfices des technologies n'utilisant pas de combustibles fossiles, tels que le nucléaire, l'hydroélectrique, le solaire et l'éolien, il existe des défis spécifiques liés à chacune d'entre elles. Il va de soi que ces contraintes nuisent à une transition d'une source d'énergie plus polluante vers une énergie moins polluante. Par conséquent, l'utilisation de la matrice électrique actuelle dominée par le thermique risque de demeurer la source la plus utilisée au monde pour longtemps (Zaferani *et al.* 2021). Enfin, les entreprises préoccupées par les enjeux environnementaux, qui cherchent des solutions pour réduire leurs résidus et les valoriser afin de réduire l'empreinte environnementale, pourraient le faire partiellement par la conversion de la chaleur fatale en énergie électrique par l'implantation de technologies visant cet objectif.

1.2 CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LES TECHNOLOGIES DE RÉCUPÉRATION DE LA CHALEUR DE PROCESSUS INDUSTRIELS

Ce chapitre couvrira les principales technologies utilisées pour la récupération de la chaleur dans les processus industriels. L'industrie la plus sophistiquée dans ce domaine est l'industrie de production primaire d'aluminium. C'est pourquoi le chapitre portera sur les aspects de cette industrie.

Le processus de production primaire d'aluminium utilise environ 18 MWh d'énergie pour produire 1 tonne d'aluminium dans une usine conventionnelle utilisant le processus Hall-Héroult. Dans des usines plus efficaces, la quantité d'énergie utilisée sera d'environ 13 MWh pour la même production de 1 tonne d'aluminium (Nowicki et Gosselin, 2012; World Aluminium Website of the International Aluminium Institute, 2020). Environ la moitié de l'énergie utilisée dans le processus de fabrication d'aluminium est perdue sous forme de chaleur dans les différentes étapes de production (Ladam, 2011).

Il est intéressant d'expliquer brièvement le processus de transformation d'alumine en l'aluminium via la technologie Hall-Héroult. L'alumine (Al_2O_3) est stockée dans des silos pour alimenter les cuves électrolytiques, qui sont composées par des anodes et des cathodes servant à faire l'électrolyse de l'alumine. Les cuves électrolytiques sont composées par des parois revêtues par du carbone (cathodes) et par des électrodes de carbones immergés dans le bain métallique (anodes). Cette configuration est soumise à un courant électrique où les molécules de Al_2O_3 seront dissociées par l'anode, responsable de l'oxydation des anions d'oxygène et de la formation du CO_2 , et la réduction des cations d'aluminium par la cathode au fond de la cuve électrolytique. Il est important de mentionner que ce processus est seulement possible grâce à l'introduction d'un fondant, la cryolite (Na_3AlF_6) dans l'alumine, qui est responsable de baisser la température de fusion de l'alumine de 2 000 °C à environ 1 000 °C. Ainsi, quand l'aluminium liquide est formé, il s'accumule au fond de la cuve électrolytique, car sa densité est plus élevée que la densité du mélange de cryolite et d'alumine. Ensuite, l'aluminium liquide est retiré par siphonage et acheminé au centre de coulée pour la conception de produits finaux, que ce soit des lingots purs pour fusion ultérieure, des alliages prêts pour une seconde transformation (extrusion, forgeage, etc.) ou des produits prêts directement pour l'utilisation tels que des fils d'aluminium (Kvande et Drablos 2014). La Figure 2 démontre de façon schématique le processus de la transformation finale d'aluminium.

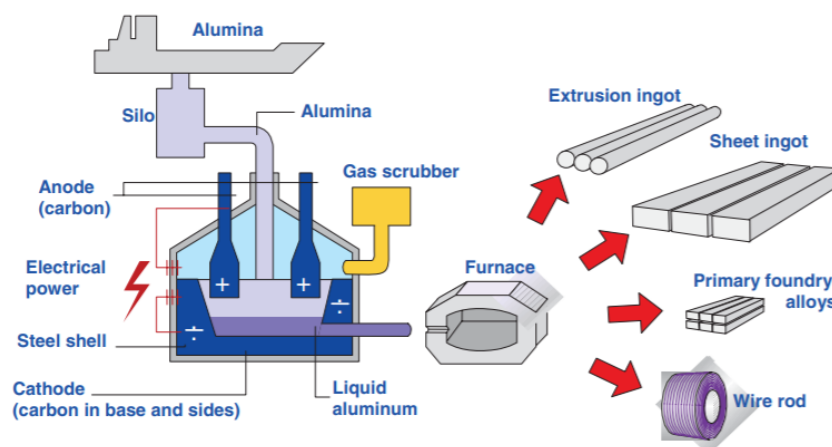


Figure 2. Processus Hall-Héroult de la transformation d'alumine en aluminium (Tirée de Kvande et Drablos 2014 avec autorisation).

L'étape de réduction électrolytique et de la cuisson anodique sont les étapes de la production de l'aluminium qui présentent les plus grandes pertes de chaleur (Nowicki et Gosselin 2012).

Certaines technologies sont appliquées pour favoriser la récupération de la chaleur dans différentes parties du processus de production de l'aluminium, mais ces sont des technologies en développement ou en phase pilote, mais qui démontrent le potentiel de réduire l'énergie perdue, ainsi que le cout total de production d'aluminium et les émissions de GES. Les technologies actuellement disponibles présentent des points positifs et des points négatifs. Selon les spécificités, chaque technologie devra être utilisée à des étapes spécifiques du processus pour récupérer la chaleur de la manière la plus efficace.

Dans l'étape de la réduction électrolytique, la technologie du mur échangeur de chaleur (*Sidewall Heat Exchanger* - SHE) est la technologie la plus efficace pour la récupération de la chaleur des murs des cuves électrolytiques. Brièvement, il s'agit d'une technologie appliquée sur la surface externe des cuves qui agit sur le passage de la chaleur, retirée d'autres étapes de la production de l'aluminium à des températures variant entre 60 °C et 120 °C. De l'air comprimé peut être utilisé pour faciliter l'échange de chaleur entre le SHE et la cuve électrolytique. De cette façon, la durée de vie des cuves électrolytiques est augmentée, entre autres bénéfices du procédé (Namboothiri *et al.* 2009).

Encore à l'étape de la réduction électrolytique, il y a des pertes de chaleur liées aux gaz d'exhaustion des cuves. La température varie entre 100 °C et 120 °C. Cette chaleur est normalement collectée dans les tuyaux et envoyée aux systèmes de traitement des polluants, puis déchargée dans l'atmosphère. Il est estimé que 3 MWh de chaleur sont perdus dans les gaz émis par l'exhaustion des cuves électrolytiques pour la production de 1 tonne d'aluminium. Dans ce cas, on récupère la chaleur en l'utilisant pour réchauffer d'autres parties de l'entreprise, comme les bureaux administratifs, par exemple, ou encore en envoyant la chaleur dans des secteurs proches de la compagnie (entreprise voisine ou secteurs gouvernementaux). De cette façon, le bénéfice est la réduction de la consommation électrique, autrement utilisée pour faire le chauffage de ces endroits (Nowicki et Gosselin 2012).

La technologie du cycle organique de Rankine (*Organic Rankine Cycle* - ORC) est une technologie utilisée dans des sources de vapeur avec des températures maximales de 350 °C. Parmi les exemples possibles d'application d'une telle technologie, on peut penser aux gaz d'exhaustion de cuves électrolytiques, qui nécessitent des températures moins élevées, dans le spectre de 100 °C à 120 °C (Yu *et al.* 2018). Cette technologie est aussi applicable avec les gaz des cuves électrolytiques affichant des températures plus élevées, autour de 180 °C, ainsi qu'avec les gaz de refroidissement des cuves électrolytiques dont les températures se situent autour de 250 °C (Castelli *et al.* 2019). Le cycle organique de Rankine utilise la source de chaleur pour réchauffer le fluide organique, qui est transformé en vapeur pour alimenter une turbine générant de l'électricité. En somme, la technologie nécessite une grande usine pour la récupération de la chaleur des processus industriels, rendant son utilisation difficile dans certains cas. La performance du système ORC dépendra fortement de la sélection du fluide de travail et des paramètres d'ingénierie de l'équipement (Yu *et al.* 2018).

À l'étape de cuisson d'anodes, les anodes qui seront utilisées dans les cuves électrolytiques sont produites par l'ajout de coke de pétrole et de brai (non représenté dans la Figure 2). L'anode verte est cuite à 1200 °C (Leisenberg *et al.* 2008). Des pertes de chaleur sont produites aussi dans le four de cuisson d'anodes. La température moyenne du gaz d'exhaustion du four se situe entre 230 °C et 250 °C avec une estimation de perte de 3 MWh de chaleur pour la production de 1 tonne d'aluminium (Nowicki et Gosselin 2012). Une technologie possible dans ce contexte concerne principalement les systèmes de traitement de fumées (*Fume treatment Centers* – FTC). Son but est d'enlever des polluants, tels les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), l'acide fluorhydrique (HF), le dioxyde de soufre (SO₂) et les particules de charbon (Sorhuus *et al.* 2013).

À l'étape de la coulée du métal liquide et de la conception du produit final, le four présente également des pertes de chaleur considérables. La température du four est configurée à 720 °C, mais normalement le métal liquide atteint à cette étape du processus une température plus élevée que la température requise pour la coulée. Le métal liquide entre en contact avec l'atmosphère, est refroidi et atteint la température de 720 °C. Cela représente une perte de chaleur d'environ 0,05 MWh par tonne d'aluminium. Dans le four de cuisson, les gaz de l'exhaustion pour la combustion des brûleurs utilisés pour maintenir la température

du four entraînent une perte de chaleur. Cette chaleur est perdue dans les cheminées du four. C'est pourquoi des systèmes de traitement des fumées, comme la FTC, peuvent être appliqués à cette étape de la production d'aluminium (Nowicki et Gosselin 2012).

Parmi les technologies utilisées dans d'autres industries, le thermogénérateur fait partie de celles qui récupèrent la chaleur fatale des processus. Il met à profit l'effet Seebeck qui consiste à transformer une source de chaleur en électricité par l'utilisation d'un appareil qui combine des matériaux avec différentes électronégativités. Par la différence de potentiel électrique entre les matériaux connectés, un courant électrique est généré (Nunes et Barbosa 2017). Cette technologie peut être installée à différentes étapes du processus et dans des cheminées de fours. Pourtant, la température maximale atteinte par cette technologie est limitée par la faible résistance à la température des fils électriques utilisés dans l'appareil, qui se situe à 250 °C maximum, mais typiquement à 150 °C. Cette technologie est fortement utilisée dans les industries aérospatiale et automobile. Le but est d'autogénérer de l'énergie pour réalimenter des équipements dans les domaines de l'exploration aérospatiale et des automobiles hybrides, à cause de sa portabilité et de sa flexibilité d'application (Jaziri *et al.* 2020). L'énergie générée par cette technologie dépendra du choix des matériaux à être utilisés dans les cellules du thermogénérateur, mais la production de l'énergie n'est pas élevée. Comme points positifs, on notera que la technologie n'utilise pas de parties mobiles pour la génération d'énergie. L'équipement demande peu de maintenance et a une durée de vie élevée. La facilité d'installation et l'absence de produits chimiques sont aussi des points forts, ainsi que l'absence de bruit et de vibration (Riffat et Ma 2003; Dai *et al.* 2011; Tie et Tan 2013; He *et al.* 2015; Siddique *et al.* 2017; Jaziri *et al.* 2020). Plus de détails sont présentés dans la section 1.3.

En général, qu'il s'agisse de l'industrie de transformation d'alumine ou d'autres industries, il existe quelques technologies qui permettent de réutiliser la chaleur de certains processus industriels, tels que ceux du centre de traitement des gaz (terme en anglais : *Fume treatment center - FTC*), du mur échangeur de chaleur (terme en anglais : *sidewall heat exchanger*), du cycle organique de Rankine (terme en anglais : *Organic Rankine cycle*), de l'utilisation directe de chaleur et du thermogénérateur. Ces technologies sont généralement

conçues pour des conditions d'utilisations spécifiques propres à certains milieux précis. Le Tableau 2 fait une comparaison entre ces différentes technologies.

Tableau 2. Comparaison entre les différentes technologies de récupération de la chaleur.

Paramètre	Centre de traitement des gaz – <i>Fume treatment center (FTC)</i>	Mûr échangeur de chaleur (<i>Sidewall heat exchanger</i>)	Cycle organique de Rankine - <i>Organic Rankine Cycles (ORC)</i>	Utilisation directe de la chaleur	Thermogénérateur
Efficacité de conversion de chaleur en électricité	60 %	20 %	10 – 20 %	80 %	5 – 15 %
Température de travail	Max. 250 °C	Max. 200 °C	Max. 350 °C	Dépend de l'application finale	Max. 250 °C
Type d'échange thermique	Fluide thermique	Fluide thermique	Fluide thermique	Chaleur	Chaleur
Limitation	Installation dans des cheminées	Utilisation spécifique pour des cuves électrolytiques	Installation dans des cheminées	Distance d'utilisation	Choix de matériel de fabrication
OPEX*	Élevé	Modeste	Élevé	Modeste	Modeste
Facilité et coûts d'installation**	Difficile	Difficile	Difficile	Moyennement difficile	Facile
Références	(Leisenberg <i>et al.</i> 2008; Nowicki et Gosselin 2012; Sorhuus <i>et al.</i> 2013)	(Namboothiri <i>et al.</i> 2009)	(Yu <i>et al.</i> 2018; Castelli <i>et al.</i> 2019)	(Nowicki et Gosselin 2012)	(Riffat et Ma 2003; Dai <i>et al.</i> 2011; Tie et Tan 2013; He <i>et al.</i> 2015; Nunes et Barbosa 2017; Siddique <i>et al.</i> 2017; Enescu 2019; Jaziri <i>et al.</i> 2020)

* OPEX = Dépenses opérationnelles (terme en Anglais : Operational expenditures)

** Sur une échelle basée sur la facilité d'installation de la technologie

Vu sa facilité d'installation, sa durée de vie, sa facilité d'entretien et ses coûts d'installation, il semble que la conception d'un thermogénérateur utilisant le processus de la projection thermique ou une autre configuration soit une alternative viable pour récupérer une partie de l'énergie de la chaleur fatale des processus industriels.

La projection thermique est un terme qui regroupe trois catégories de dépôt de revêtements métallique et non métallique, soit les *flame spray*, *electric arc spray* et *plasma arc spray*. Les matériaux utilisés pour le processus peuvent être des poudres, des fils ou des tiges, chauffés à haute température et projetés à haute vitesse par l'utilisation de gaz de procédés ou de jets d'atomisation. Le résultat final sera le dépôt de matériaux possédant une excellente adhésion mécanique. Tout dépendant du matériel utilisé dans le processus de projection thermique, le revêtement devient très résistant à température (plus grande que 250 C, ce qui est intéressant au sein de ce travail), à l'usure, à la corrosion, à l'attaque chimique, etc (Davis 2004). Plus de détails sont présentés dans la section 1.4.

Le développement d'un thermogénérateur applicable à une échelle industrielle pourra permettre la récupération de l'énergie issue de sources de chaleur actuellement perdues durant le processus. Ainsi, cette source d'électricité sera utilisée dans d'autres endroits de l'usine et réduira la consommation électrique. Ainsi, on observera une réduction d'émission de GES causée par la réduction de la consommation électrique. Les résultats seront plus marqués dans les pays qui utilisent l'énergie provenant de sources thermoélectriques (centrales thermiques alimentées par des combustibles fossiles).

Les champs d'application de cette technologie et les paramètres clés de décision pour une éventuelle implantation à l'échelle industrielle seront étudiés dans ce travail de recherche. L'identification des avantages financiers et environnementaux constituera un élément clé du succès de ce projet. Nous atteindrons cet objectif en calculant le potentiel de réduction des émissions de GES et en déterminant la réponse aux cibles visées par les 17 ODD du Programme 2030 des Nations Unies. Ce projet mettra en œuvre un des principes de l'écologie industrielle concernant l'optimisation des procédés dans le but de réduire les impacts environnementaux et les émissions de GES.

1.3 CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LES THERMOGÉNÉRATEURS

En 1821, Thomas Johann Seebeck a utilisé deux matériaux différents ayant une différence de température entre leurs extrémités pour générer un potentiel électrique et de l'énergie électrique (Siddique *et al.* 2017). Quelques années plus tard, Jean Peltier, avec les connaissances acquises par Seebeck, a refait les mêmes procédures en sens inverse. Il a

confirmé que le chauffage et le refroidissement des surfaces par l'application de différents matériaux étaient des sources d'électricité. C'est cela qu'on a appelé l'effet Peltier (Riffat et Ma 2003; Fernandes 2012).

Par la suite, le concept développé par Seebeck a inspiré nombre de développements. Grâce à sa portabilité et sa flexibilité d'application, le concept est utilisé dans les thermocouples, ainsi que dans les thermopiles qui sont constitués de plusieurs thermocouples connectés en série et en parallèle, mais la technologie est aussi explorée actuellement dans les industries aérospatiale et automobile dans le but d'autogénérer de l'énergie électrique pour alimenter des équipements dans le domaine de l'exploration aérospatiale et des automobiles hybrides (Jaziri *et al.* 2020). La génération d'électricité pour des gadgets, comme des montres, des ordinateurs portables, etc., est aussi explorée. Cette application est connue sous le terme de *wearable TEGs* (Siddique *et al.* 2017).

Le principe de fonctionnement du thermogénérateur se résume à l'utilisation d'une combinaison de matériaux semi-conducteurs avec des électronégativités différentes dans un environnement où l'une des extrémités est exposée à une température plus élevée et l'autre extrémité à une température inférieure, soit généralement la température ambiante plus froide. Cette configuration crée un potentiel électrique et provoque un transfert d'électrons. La puissance électrique ainsi générée est utilisée directement dans d'autres équipements ou peut être capturée et envoyée au réseau de distribution électrique. Le voltage généré est directement proportionnel au gradient de température et dépend aussi des matériaux utilisés et de la configuration du thermogénérateur (Siddique *et al.* 2017).

Parmi les bénéfices liés à l'utilisation de la technologie du thermogénérateur, on compte l'absence d'entretien, la facilité d'installation et l'absence de moteurs pour la conversion de l'énergie, qui n'entraîne aucun bruit ou vibration. (Riffat et Ma 2003; Dai *et al.* 2011; Tie et Tan 2013; He *et al.* 2015; Siddique *et al.* 2017; Jaziri *et al.* 2020). C'est une technologie écoresponsable et sans émission directe de GES. Seul point négatif, l'efficacité de capture et de conversion d'énergie est très basse, entre 5 % et 15 %, car le spectre de température de travail est limité par la résistance à la température des connexions électriques (Enescu 2019).

Les principaux composants d'un thermogénérateur sont des matériaux semi-conducteurs de type N et de type P, normalement en bismuth telluride ((Bi,Sb)₂(Te,Se)₃). Les panneaux en céramique servent de fondation et d'isolation électrique. Cette configuration est connue sous le nom de thermoélément. Tel que présenté dans la Figure 3.a, le mouvement des électrons se fait du semi-conducteur type P vers le semi-conducteur type N, lorsqu'une différence de température est établie. Un thermogénérateur est composé normalement par une collection de thermoéléments connectés électriquement en série, dans le but d'augmenter la tension générée (V). Il est connecté thermiquement en parallèle pour augmenter le courant électrique (A), comme représenté dans la Figure 3.b (Riffat et Ma 2003).

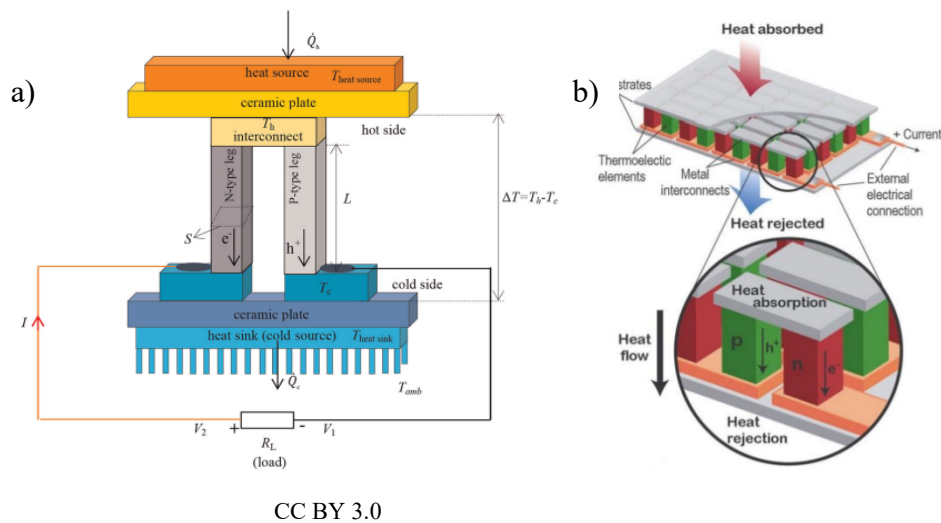


Figure 3. a) Schéma d'un thermogénérateur simple (Enescu 2019). b) Représentation d'un module de Peltier composé de divers thermoéléments (Tirée de Snyder et Toberer 2008 avec autorisation).

Différents matériaux et configurations sont applicables pour différents objectifs de thermogénérateurs, selon les nécessités requises de puissance et de courant électrique. Le

Tableau 3 est un extrait de Mamur et Ahiska (2014) et fait référence aux différentes sortes de thermogénérateurs selon la grandeur. Commercialement, il est possible de trouver des modèles capables de générer de l'énergie autour de 500 W et de 24V (Riffat et Ma 2003).

Tableau 3. Grandeur des thermogénérateurs selon l'application (Mamur et Ahiska 2014 - adapté).

Type de TEG	Spectre d'énergie générée	Application
Grand TEG	> W	Application industrielle
Petit TEG	= mW	GPS, systèmes de suivi, biosenseurs
Micro TEG	< mW à μ W	Appareils microélectromécaniques
Fine couche TEG	= μ W	Combinaison d'une surface flexible avec une micro génération d'énergie

Une des limitations de l'utilisation des thermogénérateurs à l'échelle industrielle est la faible quantité d'électricité que génèrent même les appareils les plus performants. L'idée de la présente étude est de créer un prototype industriel capable de générer plus d'électricité grâce à un nouveau concept de thermogénérateur, soit en utilisant la projection thermique ou le concept de thermopile conventionnel adapté à l'utilisation industrielle. La technologie de projection thermique permet la déposition des matériaux conducteurs et/ou semi-conducteurs afin de flexibiliser les formulations des composantes et à éliminer les restrictions de température de travail. Une surface plus grande de collecte de chaleur sera aussi considérée. Nous espérons ainsi atteindre une efficacité de conversion d'énergie plus élevée et un plus grand spectre de températures de travail.

Bien que toutes les surfaces conductrices soient capables de produire les effets Peltier et Seebeck, celles-ci sont normalement influencées par l'effet Joule dans les matériaux métalliques. C'est pourquoi les matériaux semi-conducteurs sont les plus appropriés pour cette application. L'effet Joule explique la génération de chaleur causée par la résistance interne du matériel au mouvement des électrons, ce qui réduit l'efficacité du thermogénérateur (Fernandes 2012).

La partie la plus importante est le choix des matériaux et des caractéristiques spécifiques pour l'application aux thermogénérateurs. Le coefficient de Seebeck (α), qui se réfère à la quantité de tension (V) par la différence de température appliquée, peut être utilisé.

$$\alpha = \frac{U}{\Delta T} \quad \text{Équation 1}$$

Où α = Coefficient de Seebeck (v/K), U = tension (v) et ΔT = Température 1 – Température 2 (K).

Outre le coefficient de Seebeck, il y a d'autres paramètres qui exercent une influence importante sur la sélection des matériaux thermoélectriques, comme la résistivité électrique (ρ) et la conductivité thermique (κ). Le terme figure de mérite (Z) a été conçu pour cadrer ces paramètres. De bons matériaux thermoélectriques se doivent d'obtenir une figure de mérite autour de 1 (Riffat et Ma 2003; Fernandes 2012; Siddique *et al.* 2017). La figure de mérite est mesuré en K^{-1} .

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho\kappa} \quad \text{Équation 2}$$

Où Z = Figure de mérite (K^{-1}), α = Coefficient de Seebeck (v/K), ρ = résistivité électrique ($\Omega.m$) et κ = conductivité thermique ($W/(m \cdot K)$).

À titre d'exemple, le semi-conducteur type N de Bi_2Te_3 présente une Figure de Mérite $Z \sim 0,8$ à température ambiante (Siddique *et al.* 2017).

La figure de mérite n'est pas constante avec la température, c'est pour cette raison qu'on la trouve dans la littérature par variation de température. Dans ce cas, ZT est adimensionnel (Fernandes 2012).

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho\kappa} T \quad \text{Équation 3}$$

Où ZT = Figure de mérite dépendant de la température (adimensionnel), α = Coefficient de Seebeck (v/K), ρ = résistivité électrique ($\Omega.m$), κ = conductivité thermique ($W/(m \cdot K)$) et T = température (K).

Fernandes (2012) a réuni divers matériaux avec $ZT > 1$ dans différents spectres de température, plus grande est la figure de mérite ZT , plus grande est la génération d'électricité par effet Seebeck. Les résultats sont présentés dans la Figure 4. Il est possible de conclure que les matériaux à base de tellure, de bismuth et d'antimoine présentent de bons résultats à basse température, tandis que les matériaux à base de silice, de silice-germanium, d'yttrium et de tellure sont les plus performants à haute température.

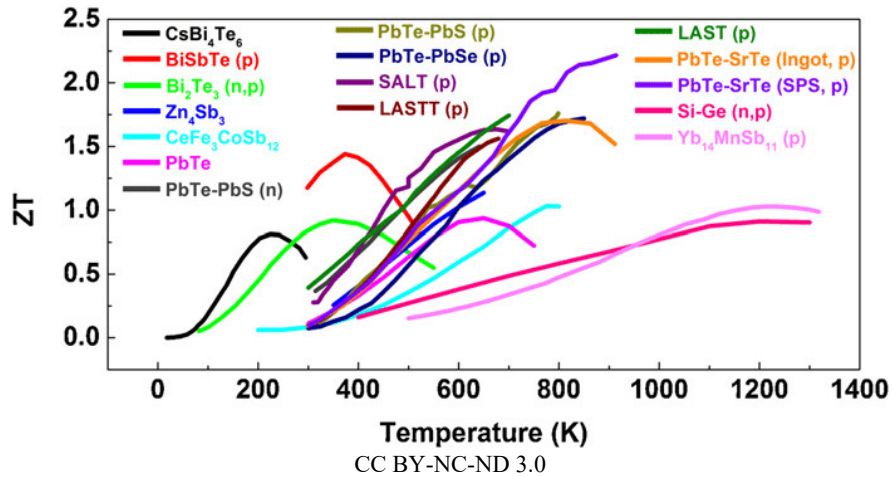


Figure 4. Figures de mérite (ZT) des semi-conducteurs à différentes températures (He *et al.* 2013).

1.3.1 THERMOPILES

Une thermopile est un appareil électronique qui fait la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique par l'utilisation de plusieurs thermocouples connectés en série et en parallèle, grâce à l'effet Seebeck, soit en utilisant deux matériaux avec différentes polarités connectés sur un différentiel de température (Muthukrishnan 2021). La Figure 5 présente le schéma typique d'une thermopile.

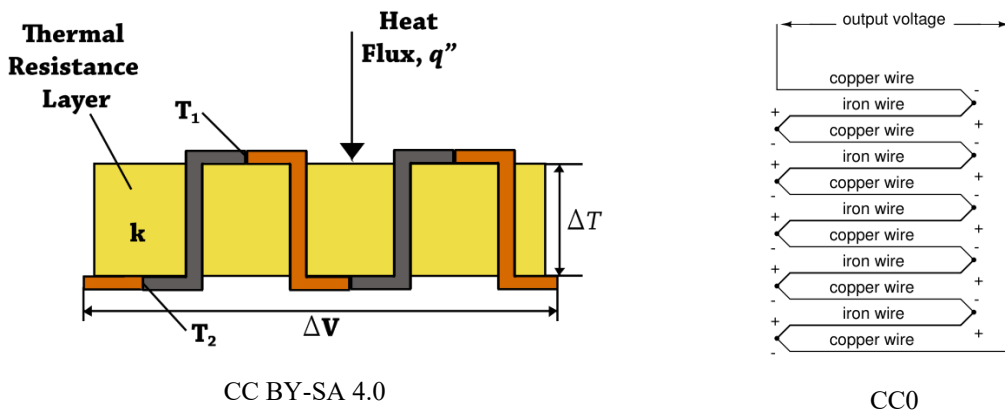


Figure 5. Schéma de fonctionnement d'une thermopile (Wikipedia 2022).

La thermopile requiert un différentiel de températures pour générer de l'électricité. La génération d'électricité d'une thermopile avec N connexions est N fois plus grande que la

génération d'électricité d'un thermocouple avec le même différentiel de températures. Le potentiel de génération d'électricité est donc directement proportionnel à la quantité de connexions, dans une thermopile (Muthukrishnan 2021).

Les thermopiles sont utilisées généralement pour mesurer la température sans contact, dans le senseur de présence, appareils détecteurs de feu, analyse de température de gaz d'exhaustion de processus industriel, etc. (Muthukrishnan 2021).

La génération d'électricité par les thermopiles est décrite dans l'équation suivante :

$$V_{out} = N \times S \times (T_x - T_{ref}) \quad \text{Équation 4}$$

Où V_{out} = voltage généré (V), N = quantité de connexions, S = Coefficient de Seebeck (v/K), T_x = température de travail (K) et T_{ref} = température de référence (K).

Le travail vise à utiliser le concept de thermopile, avec un choix de matériaux disponibles pour la projection thermique, afin de créer un prototype et d'en valider les bénéfices à l'échelle du laboratoire.

1.4 CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LA PROJECTION THERMIQUE

La projection thermique, ou *thermal spray processing*, est un terme générique pour grouper trois technologies de revêtement métallique ou non métallique sur un substrat, soit le *flame spray*, l'*electric arc spray* et le *plasma arc spray* (Davis 2004; Amin et Panchal 2016). Selon Pawlowski (2008), la projection thermique est un processus de dépôt des particules fondues, semi-fondues ou solides sur un substrat. La projection thermique génère un flux de particules sur le substrat. Une source de chaleur est utilisée pour réchauffer le matériau à être projeté, soit sous forme de poudre, de fils ou de tiges. Le matériau est fondu ou semi fondu et projeté à haute vitesse par des gaz ou des jets d'atomisation. Le revêtement adhère au substrat sous impact en créant une structure lamellaire (Davis 2004).

La technologie de projection thermique permet de créer des multicouches de matériaux sur pratiquement toutes les sortes de matériaux (avec un minimum de résistance à la température), de différentes formes et grandeurs. Ainsi, il est estimé que cette technologie permettrait de créer des modules de thermogénérateurs à l'échelle de température de travail

plus élevée que celles trouvées commercialement aujourd’hui. Une telle technologie permettrait également d’ajouter différents matériaux (conducteurs, semi-conducteurs et isolants) en créant un attachement microstructural, qui faciliterait la conception d’un thermogénérateur plus flexible.

La projection thermique donne la possibilité d’utiliser différents revêtements afin de reproduire des caractéristiques spécifiques à des pièces critiques sur différentes applications, soit la protection contre l’usure, contre l’attaque chimique et les hautes températures, etc. (Davis 2004). De plus, un thermogénérateur peut utiliser la technologie de projection thermique afin de former des couches de matériaux différentes sur un substrat typique. C’est cette dernière utilisation qui est visée dans la présente étude.

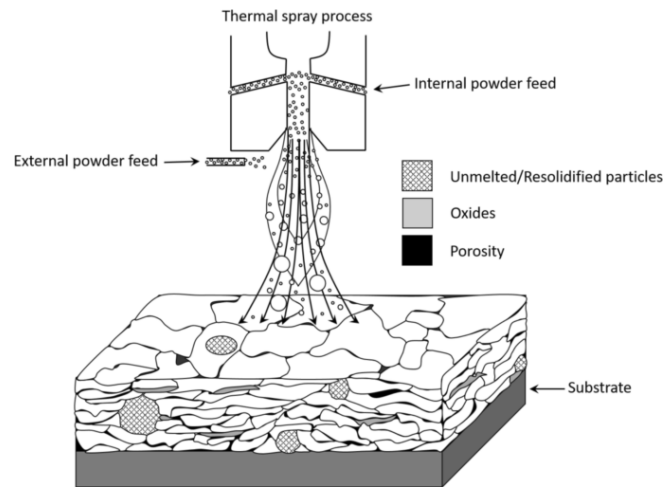
Il existe différentes méthodes de dépôt par projection thermique. Chaque technique a ses propres caractéristiques et la sélection de la meilleure méthode doit prendre en considération les aspects économiques, la taille des particules et la portabilité, du type de revêtement et de sa performance (Davis 2004). Le Tableau 4 présente les principaux types de technologies que l’on trouve à l’échelle commerciale. Il est important de mentionner qu’il existe d’autres groupements de techniques, comme celui de Pawlowski (2008).

Tableau 4. Types de techniques de projection thermique les plus utilisés dans l’industrie, selon Davis (2004).

<i>Flame spray</i>	<i>Electric arc spray</i>	<i>Plasma arc spray</i>
<i>Flame Powder</i>	<i>Electric arc</i>	<i>Atmospheric Plasma Spraying (APS)</i>
<i>Wire Flame</i>		<i>Vacuum Plasma Spraying (VPS)</i>
<i>Detonation Gun</i>		
<i>High-Velocity Oxy-fuel</i>		

Le revêtement créé par la projection thermique est généré sous forme de couches (*splats*) lamellaires métallurgiquement attachées au substrat, projetées à de hautes températures, vitesses et pressions. Les particules sont déposées sous forme de gouttelettes, dans des inclusions formées par des pores créées par des particules piégées non fondues,

partiellement fondues ou resolidifiées, des oxydes générés par la haute vitesse de solidification durant la projection et les espaces entre les couches (Davis 2004) (Figure 6).



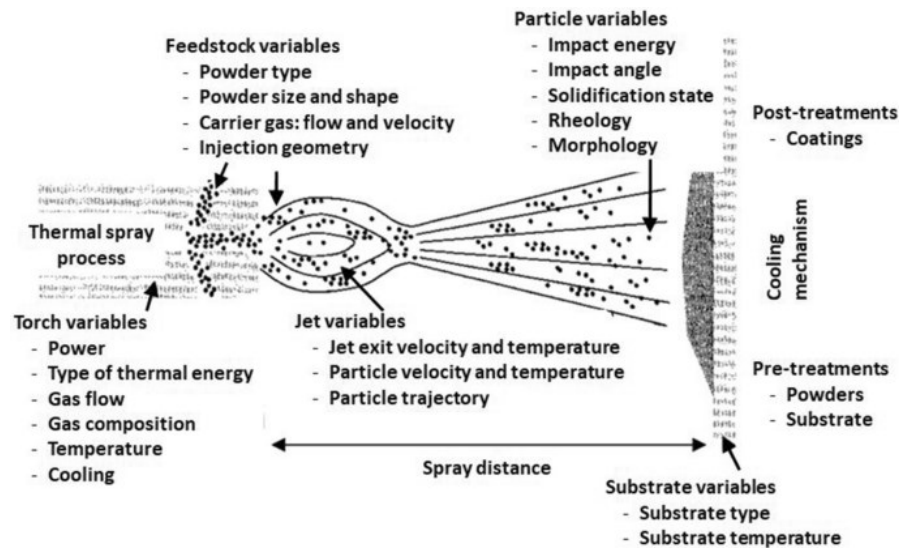
CC BY 4.0

Figure 6. Caractéristiques communes du revêtement par projection thermique. Tiré de Tejero-Martin *et al.* (2019).

Les inclusions démontrées dans le paragraphe précédent causent des fragilités sur le revêtement, comme des fissures, des détachements, ainsi qu'une mauvaise résistance à l'impact, à la corrosion et à l'usure. Pourtant, des ajustements sur les paramètres de projection réduisent la quantité d'inclusions. Les principaux paramètres du procédé de la projection thermique sont les suivants (Figure 7) :

- Sélection de la poudre ou fils/tiges : cela inclut la granulométrie de la poudre, la morphologie, la méthode de fabrication, la chimie, le point de fusion, le coefficient d'expansion thermique, la densité et le niveau d'humidité pour les poudres. Pour les fils, cela inclut le diamètre, la circularité, la finition de surface, la lubrification, la résistance à la traction et le stress résiduel. Pour les tiges, cela inclut le diamètre, la circularité, la rectitude et la porosité.
- Contrôle de l'alimentation de la poudre ou des fils ou de tiges : cela impacte le taux de dépôt et l'uniformité du revêtement.
- Contrôle du débit de gaz : toutes les technologies de projection thermique utilisent un type de gaz. Le contrôle du débit de gaz impacte la vitesse de projection et la capacité de fusionner les particules.

- Pureté du gaz : cette caractéristique a un impact sur le temps de vie de l'électrode utilisée dans le pistolet de projection. Les principaux contaminants sont l'oxygène, les impuretés de l'hydrocarbure et l'humidité.
- Distance entre le pistolet et le substrat : il faut utiliser la bonne distance pour réduire les problèmes d'oxydation et de solidification des particules.
- Angle de projection : normalement on utilise un angle de 90 degrés, mais cela varie selon la nécessité et les particularités de la pièce qui recevra le revêtement.
- Température de procédé : contrôle de l'ampérage et du voltage du système. Cela est important pour atteindre les températures de fusion des particules (Davis 2004).



CC BY 4.0

Figure 7. Paramètres et variables typiques de la projection thermique (Koivuluoto 2022).

Les prochaines sections expliqueront brièvement chaque groupe de technologie de projection thermique.

1.4.1 FLAME SPRAY

1.4.1.1 FLAME POWDER ET WIRE FLAME

Chronologiquement, le *Flame Spray* (FS) a été la première technique de projection. Développée il y a plus de 100 ans, elle a été conçue pour effectuer des réparations d'axes des rouleaux et du remplissage de surface (Davis 2004; Pawlowski 2008).

La technique consiste à ajouter un gaz de combustion, de l'oxyacétylène (oxygène + acétylène) comme source de chaleur, avec de la poudre ou un fil ou une tige dans la torche de projection. La fusion des particules projetées à haute vitesse sur le substrat se fait dans la flamme. Cette technologie peut projeter des métaux, des polymères, de la céramique et des métaux réfractaires.

Voici les caractéristiques de cette technologie (Pawlowski 2008; Amin et Panchal 2016):

- Température de la flamme : 3000 K à 3350 K
- Gaz de travail : normalement oxygène + acétylène
- Vitesse des particules : 80 à 100 m/s
- Granulométrie de particules de la poudre : 5 à 100 μm
- Taux d'alimentation de la poudre : 50 à 100 g/min
- Diamètre de fils ou tiges : 3 à 6 mm
- Taux d'alimentation du fil/tige : 40 à 650 g/min
- Distance de projection : 120 à 250 mm

Le revêtement généré par cette technologie présente une résistance d'adhésion entre 15 et 30 Mpa, entre 10 et 20 % de porosité et une épaisseur entre 100 et 2500 μm .

1.4.1.2 DETONATION-GUN SPRAYING (D-GUN™)

La technique de *flame spray* conventionnelle restreint la création de revêtements plus denses (<2 % de porosités) ayant une bonne adhérence au substrat. La technique de projection par D-gun™ a été développée en 1950 par Union Carbide, aujourd'hui Praxair Surface Technologies, inc. afin de créer des revêtements plus denses. Pour cette technique, un mélange de combustible, d'oxygène et de poudre est alimenté dans un tube de 21 à 25 mm de diamètre avec une ignition. Le tube est ensuite refroidi par l'eau. Cela entraîne un cycle d'explosions très chaudes, qui projettent les particules vers le substrat à très haute vitesse (800 m/s). Le cycle d'explosion/détonation varie entre 1 à 15 par seconde. L'azote est utilisé pour éviter le retour de la flamme à l'intérieur de la machine (Davis 2004; Pawlowski 2008).

Voici les caractéristiques de cette technologie (Davis 2004; Pawlowski 2008; Amin et Panchal 2016):

- Température de la flamme : 4500 K
- Gaz de travail : composé de gaz combustibles, soit l'hydrogène, l'acétylène, le propane ou le butane + l'oxygène. Azote comme gaz de protection contre le *backfiring*.
- Vitesse des particules : 750 à 800 m/s
- Type de poudre : normalement des composites et des carbures.
- Granulométrie de particules de la poudre : 5 à 60 μm
- Taux d'alimentation de la poudre : 16 à 40 g/min
- Distance de projection : 100 mm
- Il est nécessaire d'utiliser une chambre vu le haut niveau de bruit généré par la projection (>140 dB)

Le revêtement généré par cette technologie présente une résistance d'adhésion de 70 à 83 MPa, une densité > 95 % (porosité < 5 %) et une épaisseur de revêtement maximale de 300 μm .

1.4.1.3 HIGH VELOCITY OXY-FUEL (HVOF)

La technique de projection *High velocity oxy-fuel* (HVOF) a été inventée en 1958 par Union Carbide. Commercialisée seulement en 1980, elle est aujourd'hui la technologie la plus utilisée pour projeter des carbures et la plus utilisée dans le secteur aéronautique. La technologie est similaire à la technique *Detonation Gun*, mais dans ce cas la combustion est continue.

Les gaz ou liquides combustibles sont injectés avec de l'oxygène ou de l'air, et la poudre est ajoutée dans une tige avec haute pression en créant des vitesses de projection entre 1525 à 1825 m/s. Les pièces sont refroidies par l'eau.

Voici les caractéristiques de cette technologie (Pawlowski 2008; Amin et Panchal 2016).

- Température de la flamme : 5500 K
- Gaz de travail : composé par des gaz ou des liquides combustibles, soit l'hydrogène, l'éthylène, le propylène, le propane, le kérosène et le gaz naturel + oxygène.
- Vitesse des particules : 1600 m/s
- Type de poudre : normalement des composites avec carbures.
- Granulométrie de particules de la poudre : 5 à 45 μm
- Taux d'alimentation de la poudre : 20 à 120 g/min
- Distance de projection : 150 à 300 mm

Le revêtement généré par cette technologie présente une résistance d'adhésion de 90 MPa, une densité > 99 % (porosités < 1 %) et une épaisseur de revêtement de 100 à 300 μm .

1.4.2 ELECTRIC ARC SPRAY

1.4.2.1 ELECTRIC ARC

La technique *electric arc*, aussi connue sous les noms *twin-wire arc*, *arc spray* ou *wire arc spray*, a été inventée en 1910. Différente des autres techniques, cette technologie utilise l'arc électrique direct (DC) pour faire fondre deux fils d'électrodes et projeter des gouttelettes par des gaz d'atomisation vers le substrat. Des fils composés de différents matériaux peuvent être utilisés pour créer des pseudo-alliages. Avant d'être projetés, les matériaux sont fondus à l'intérieur du pistolet et se solidifient rapidement à la sortie du dispositif. Dans ce cas, les distances de projection doivent être réduites, afin de réduire la génération d'oxydes sur le revêtement. Il est important de mentionner que cette technique est celle qui transfère le moins de chaleur au substrat. C'est pourquoi il s'agit de la technique que l'on choisit pour des applications où le substrat est moins résistant à la chaleur, comme le polymère, la fibre de verre, les bois, les papiers, etc. (Davis 2004).

Voici les caractéristiques de cette technologie (Pawlowski 2008; Amin et Panchal 2016).

- Température de l'arc électrique : 6100 K
- Vitesse des particules : 150 m/s

- Type de fils : tous les types de fils conducteurs. Cette technologie est aussi utilisée avec des fils dont le centre est composé de carbures.
- Diamètre des fils : 1,6 à 5,0 mm
- Taux d'alimentation de la poudre : 50 à 1000 g/min
- Distance de projection : 50 à 170 mm

Le revêtement généré par cette technologie présente une résistance d'adhésion de 10 à 70 MPa, une porosité de 10 à 20 % et une épaisseur de revêtement de 100 à 2000 μm .

1.4.3 PLASMA ARC SPRAY

1.4.3.1 ATMOSPHERIC PLASMA SPRAYING (APS)

Breveté en 1960 par Giannini et Ducati, le *atmospheric plasma spraying* (APS) est composé d'une anode à base de cuivre et d'une cathode de tungstène thorié. Sa source d'énergie est le courant électrique continu. Celui-ci réchauffe les gaz de travail qui se dilatent en contact avec l'atmosphère et forment le *spray*. Les poudres sont ajoutées axialement ou radialement à la sortie du pistolet et sont fondues et projetées vers le substrat. Un système de refroidissement à l'eau est nécessaire pour la protection opérationnelle. Cette technique atteint des températures des gaz de 14 000 à 28 000 K. Pour la stabilisation de l'énergie fournie par le courant continu, un gaz inerte est requis, normalement l'argon. Cette technique est plus flexible en ce qui concerne le choix de matériaux des différents points de fusion et la vitesse de projection (Davis 2004; Pawlowski 2008).

Voici les caractéristiques de cette technologie (Pawlowski 2008; Amin et Panchal 2016).

- Température de la flamme : 15 000 K
- Gaz de travail : normalement l'argon et un mélange d'argon avec hydrogène, hélium et azote. Il est aussi possible d'utiliser un mélange de trois gaz.
- Vitesse des particules : 200 à 800 m/s.
- Type de poudre : normalement des oxydes céramiques.
- Granulométrie de particules de la poudre : 20 à 90 μm .

- Taux d'alimentation de la poudre : 50 à 100 g/min.
- Distance de projection : 60 à 130 mm.
- Dû à la haute température des particules projetées sur le substrat, il est important de maintenir une température de 373 à 473 K sur le substrat.

Le revêtement généré par cette technologie présente une résistance d'adhésion de >70 MPa pour les revêtements d'alliage métallique. Le niveau de porosité varie entre 1 à 7 % et l'épaisseur de revêtement de 300 à 1500 μm .

1.4.3.2 VACUUM PLASMA SPRAYING (VPS)

Cette technique est une variation du *atmospheric plasma spraying* (APS). On y compte quelques modifications dans le pistolet pour augmenter la pression et l'utilisation d'une chambre hermétiquement fermée. Le *vacuum plasma spraying* (VPS), aussi connu sous le terme de *low-pressure plasma spraying*, a été inventé en 1973 par Plasmadyne. Cette technologie se démarque par la haute qualité du revêtement et un faible niveau d'oxydes et de porosité.

Voici les caractéristiques de cette technologie (Davis 2004; Pawlowski 2008).

- Température de la flamme : 12 000 K.
- Gaz de travail : les mêmes que pour la technique *atmospheric plasma spraying* (APS).
- Vitesse des particules : 200 à 600 m/s.
- Granulométrie de particules de la poudre : 5 à 20 μm .
- Taux d'alimentation de la poudre : 50 à 100 g/min.
- Distance de projection : 300 à 400 mm.
- Le courant électrique du système est aussi utilisé pour réchauffer le substrat.

Le revêtement généré par cette technologie présente une résistance d'adhésion de >80 MPa pour les revêtements d'alliage métallique. Le niveau de porosité est moins grand que 1 et 2 % et l'épaisseur de revêtement se situe entre 150 à 500 μm .

La présente étude a pour but de récupérer la chaleur fatale des usines de bouletage de minerai de fer et de la convertir partiellement en électricité. Le thermogénérateur permet

d'utiliser la technologie de projection thermique afin de former des couches de matériaux différentes sur un substrat typique.

1.5 CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LE PROCESSUS DE BOULETAGE DE MINERAI DE FER

L'étude se concentre sur l'industrie de bouletage de minerai de fer et vise à faire face aux défis de décarbonation de la chaîne de production d'acier. Cette industrie est en général un grand émetteur de GES. En effet, on estime que son taux d'émission de GES est d'environ 0,03 à 0,11 tonne CO₂-éq./tonne de boulettes de minerai de fer. Cela est lié aux catégories d'émissions directes (catégorie 1) et indirectes causées par l'utilisation d'énergie (catégorie 2) d'une usine de bouletage de minerai de fer (selon la consommation et la source d'énergie utilisée). Cela n'inclut pas les étapes d'exploitation du minerai dans les mines, du concassage, du broyage et de la concentration du minerai, ni le transport en amont et en aval.

Les trois plus grands producteurs de minerai de fer au monde sont Vale SA, Rio Tinto/IOC et BHP, avec 315,6 Mt/année en 2021, 272,9 Mt/année en 2022 et 248 Mt/année en 2020, respectivement. Ils ont annoncé des objectifs de réduction de GES de la chaîne de production du minerai de fer, et cela, de l'exploitation minière jusqu'au transport de boulettes de minerai de fer au client final.

BHP a annoncé la réduction de 30 % d'émission de GES d'ici 2030 (base 2020) et a la volonté d'être carboneutre d'ici 2050 (BHP 2020; BHP 2021). Rio Tinto/IOC a aussi annoncé la volonté d'être carboneutre d'ici 2050 dans toutes ses opérations : du minerai de fer, à l'aluminium, au cuivre en passant par d'autres minerais. L'usine de bouletage de minerai de fer d'IOC à Labrador City s'est donné le défi de réduire de 50 % ses émissions de GES d'ici 2030. La stratégie pour le minerai de fer s'appuie sur 6 domaines : 1) L'optimisation des opérations de Haute Fournaise (Blast Furnace), soit en aidant les clients à améliorer leurs processus de fabrication d'acier, 2) Concentration du minerai Pilbara à partir de l'amélioration de la qualité finale du minerai, 3) Recherche et développement d'une chaîne de production d'acier « low-carbon - BioIronTM », soit la production de boulettes de minerai de fer par la technologie de microondes et l'utilisation de biomasse, 4) « Hydrogen Direct Reduction Iron (DRI) and melter », soit la production de DRI de grade moyen à l'aide de

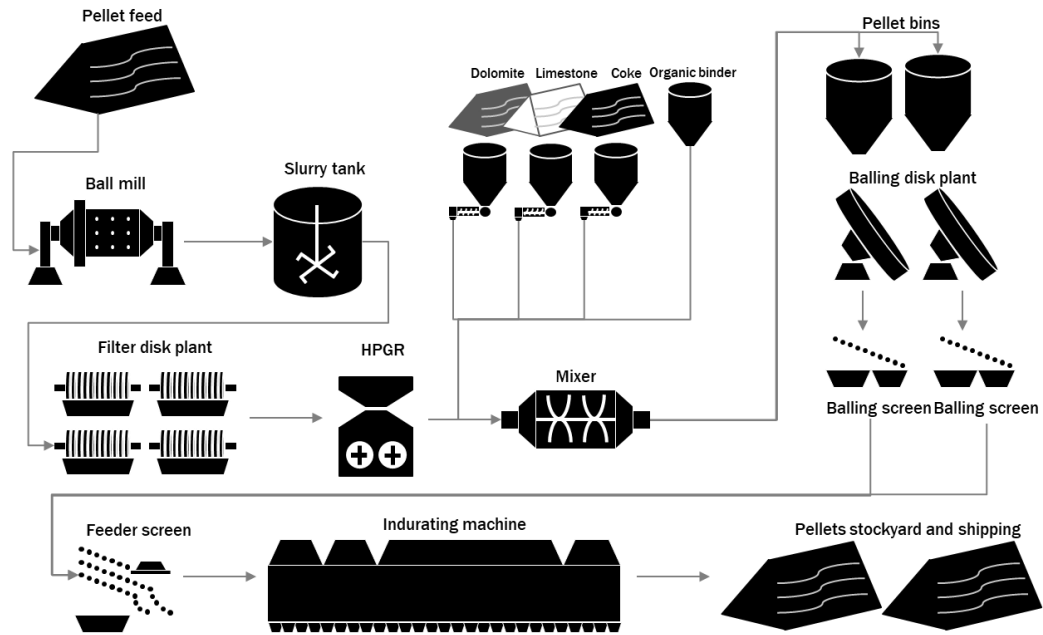
l'hydrogène avec une machine à fondre électrique intermédiaire afin de réduire les impuretés de l'acier et pour l'utilisation dans le processus de production de réduction directe (DRI/Electric Arc Furnace (EAF)), ce qui est moins polluant que le processus de Haute Fournaise, 5) Production du DRI avec haute pureté à l'aide de l'hydrogène au lieu du gaz naturel pour le processus de la réduction directe (DRI/EAF), 6) Améliorations de procédés de concentration de minerai de fer afin de les utiliser dans le processus de réduction directe (DRI/EAF) (Rio Tinto 2022). Le grand défi pour Rio Tinto se trouve dans les industries de transformation d'alumine, l'industrie de production d'aluminium et les opérations de bouletage de minerai de fer au Labrador, Canada (Rio Tinto 2022).

Vale a adopté une gouvernance robuste afin d'atteindre l'objectif de réduction des émissions de GES de 33 % d'ici 2030 (en référence aux émissions de 2015) et d'être carboneutre (catégories d'émission 1 et 2) d'ici 2050. La production des boulettes de minerai de fer représente 57 % des émissions de GES de la chaîne d'exploitation du minerai de fer (Vale 2021). Vale estime l'investissement entre 4 et 6 milliards de dollars (USD) pour le plan de réduction des émissions de GES de 33 % d'ici 2030. Le portefeuille d'actions de Vale pour la réduction des émissions de GES est divisé en initiatives à court, moyen et long terme. Celles-ci portent sur la réduction des émissions de catégories 1 et 2 premièrement et sur la catégorie 3 à long terme. Les principales initiatives de réduction des émissions de GES de catégories 1 et 2 sont les suivantes : utilisation de 100 % du réseau électrique renouvelable, augmentation de l'utilisation de bioénergie, utilisation des brûleurs à plasma au lieu du gaz naturel, utilisation de biomasse et de biochar, amélioration des procédés, électrification de la flotte de camions hors-route et de locomotives, entre autres.

1.5.1 LE PROCESSUS DE BOULETAGE DE MINERAI DE FER

Les usines de bouletage de minerai de fer autour du monde n'appliquent généralement pas des technologies spécifiques de récupération de la chaleur perdue dans le processus de production, par contre les fours de bouletage sont dessinés avec le concept de réutilisation de la chaleur dans ces différentes étapes, plus de détails seront abordés dans cette section. Selon Kordzadeh *et al.* (2017), le processus de production des boulettes de minerai de fer est divisé en trois grandes étapes, soit :

1. Préparation des matériaux, constitués par le broyage du minerai pour l'ajustement de la finesse du concentré.
2. Formation des boulettes dans des disques ou tambours de bouletage.
3. Traitement thermique des boulettes afin d'atteindre les caractéristiques physico-chimiques requises à la fabrication d'acier. Le processus commence par l'extraction du minerai dans les mines à ciel ouvert ou souterraines, qui passera par les étapes du broyage. À l'étape du broyage, le but est de réduire le diamètre des particules. S'en suit une étape de concentration du minerai à travers la concentration magnétique ou le processus de flottation. Puis, une autre étape de broyage est requise, afin de réduire davantage la granulométrie du minerai de fer. Ensuite, la boue de minerai de fer doit passer par l'étape de filtration. Durant cette étape, un gâteau-filtre dont l'humidité finale se situe entre 8,0 et 10,0 % est ciblé pour alimenter les disques ou tambours de bouletage (Meyer 1980). Puis, une nouvelle étape de réduction des particules peut être applicable, connue sous l'acronyme HPGR (*High Pressure Grinding Rolls*). Ensuite, les composés chimiques sont ajoutés au concentré de minerai de fer, comme la pierre à chaux, le charbon, les liants organiques ou la bentonite. Le minerai de fer et les composés chimiques sont finalement mélangés et envoyés aux équipements de bouletage. À l'étape du bouletage, des boulettes sont produites dans les unités d'agglomération, soit les disques ou tambours de bouletage. Puis, les boulettes de bonnes dimensions, soit entre 8,0 e 16,0 mm, sont sélectionnées par les tamis à rouleaux et sont envoyées au four de cuisson des boulettes, dans le but d'augmenter la résistance mécanique des boulettes pour les rendre capables de supporter le transport jusqu'aux compagnies de production d'acier. Cela vise aussi à ajuster la chimie pour l'utilisation dans des fours de production d'acier (Aichinger *et al.* 2013). À l'étape de cuisson des boulettes de minerai de fer, la cuisson est faite dans les fours de durcissement (Nunes 2007). La Figure 8 représente un schéma typique du processus de bouletage de minerai de fer, par des fours de type *traveling grate*.

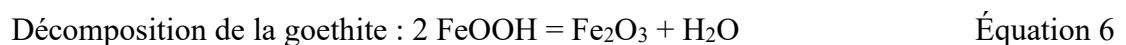
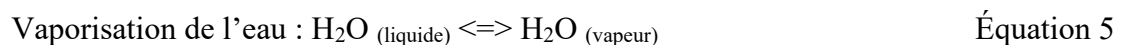


© Alexandre Gonçalves Andrade, 2022

Figure 8. Schéma du processus de bouletage de minerai de fer – *Traveling grate*.

Dans l'étape de cuisson des boulettes de minerai de fer dans un four *traveling grate*, des températures élevées sont utilisées pour améliorer les caractéristiques physiques des boulettes de minerai de fer. À l'étape de séchage des boulettes (première partie du processus), des températures d'environ 320 à 400 °C sont utilisées. À l'étape de précuisson, les températures varient entre 400 à 900 °C. À l'étape de cuisson, la température de 1350 °C est atteinte. Durant l'étape de post-cuisson et de refroidissement, la température est baissée de 1350 °C à 150 °C (Meyer 1980; Cotta *et al.* 2014; Moraes *et al.* 2018).

À l'étape du séchage, lorsque les boulettes atteignent des températures de 320 à 400 °C, les boulettes, avec un taux d'humidité de 8,5 à 11,0 %, sont séchées par la vaporisation d'eau (entre 60 à 200 °C). Mais il y a aussi la réaction de décomposition de la goethite (une portion du minerai de fer chimiquement attachée à des molécules d'eau) par vaporisation de l'eau à des températures allant de 200 à 500 °C (Fonseca 2004). Les réactions sont présentées ci-bas :



Durant l'étape de précuisson des boulettes, lorsque les températures se situent entre 400 et 900 °C, on observe le réchauffement graduel des boulettes pour atteindre les hautes températures de la zone de cuisson du four.

Pour atteindre des températures élevées, des brûleurs sont utilisés dans l'étape de précuisson et cuisson, ainsi que le charbon ou coke de pétrole à l'intérieur des boulettes.

À l'étape de cuisson, des températures autour de 1350 °C sont atteintes par les brûleurs à l'huile lourde ou au gaz naturel. Le charbon ou le coke de pétrole est ajouté à l'intérieur des boulettes et le débit d'air descendant du four produit par les ventilateurs de procédés est réchauffé par les brûleurs. Le débit d'air passe à travers le lit de boulettes placé sous le chariot de grille qui se déplace à l'intérieur du four. La chaleur de l'air réchauffé est transférée aux boulettes et l'ignition du charbon ou du coke de pétrole complète la sintérisation des boulettes. La sintérisation est le processus de jonction des particules par de hautes températures. Ce processus se produit à une échelle microstructurale quand les connexions des particules se prolongent dans les points de contact, en changeant les propriétés des particules (Fonseca 2004).

Une partie de la chaleur de la zone de cuisson est utilisée pour la réaction chimique de la pierre à chaux et de la bentonite. Celle-ci est responsable du durcissement des boulettes, qui atteignent des résistances mécaniques autour de 250 à 350 kg par boulette. Durant cette étape, quelques réactions chimiques déclenchent d'autres réactions. Voici les principales réactions chimiques observées à l'étape de cuisson des boulettes (Fonseca 2003) :

Combustion du charbon (500 – 800 °C) :

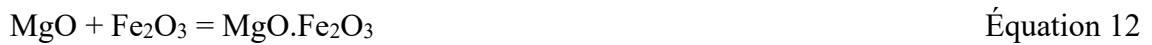
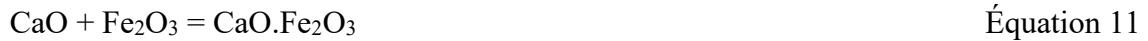


Décomposition de carbonates (550 – 800 °C) :



Réactions de scorification (900 – 1400 °C), divisées en formation de ferrites, silicates et fayalites :

- Formation de ferrites



- Formation de silicates



- Formation de fayalites



Durant cette étape se produit également le phénomène de recristallisation et de croissance des grains, autour de 1100 °C. Ce phénomène est important pour l'homogénéité chimique et la résistance des boulettes (Fonseca 2003).

Après, les boulettes sont transportées dans la zone de refroidissement, qui utilise la température atmosphérique et un débit d'air ascendant pour préparer les boulettes au transport par des tapis roulants et au stockage à l'extérieur des usines (Fonseca 2004).

La majorité de l'énergie est réutilisée à travers des débits d'air à l'intérieur du four, mais une partie de l'énergie est perdue sous forme de chaleur dans les cheminées des usines. Le débit d'air à l'intérieur des fours de cuisson dépend du modèle de four utilisé. La Figure 9 présente un schéma typique de débit d'air à l'intérieur d'un four de boulettes de minerai de fer. Le numéro 1 représente l'étape de séchage des boulettes humides. Le 2 représente l'étape de précuisson, le 3 représente la cuisson, le 4 représente l'étape de post-cuisson et le 5, l'étape de refroidissement (Thomazini 2021).

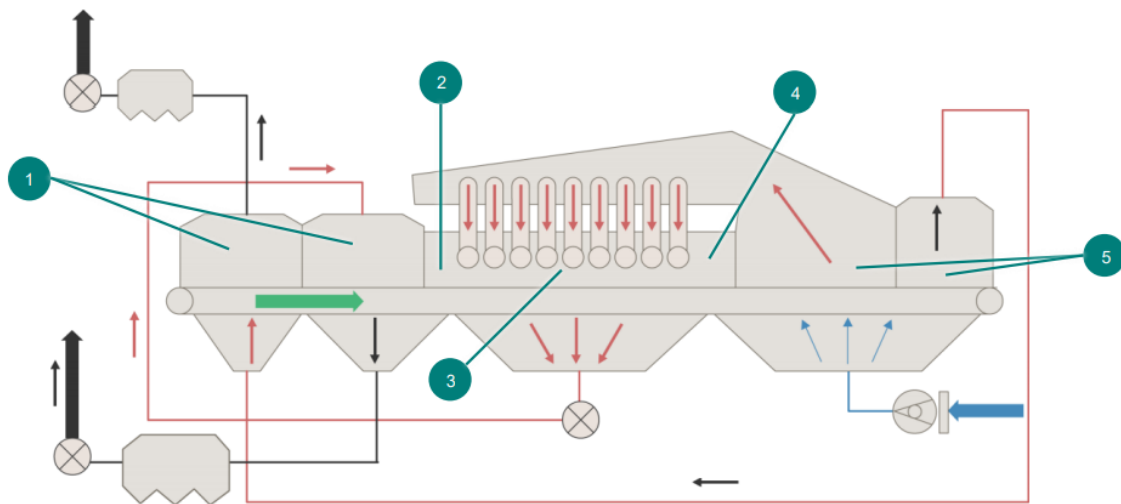


Figure 9. Flux des gaz à l'intérieur du four de bouletage de minerai de fer (Tirée de Thomazini 2021 avec autorisation).

Les gaz, après l'utilisation à l'intérieur du four de cuisson de boulettes de minerai de fer, sont orientés vers les cheminées, mais ils passent avant par une étape de traitement environnemental, afin de retenir la poussière. Ce traitement utilise normalement des précipitateurs électrostatiques. Un des avantages de l'utilisation de cette technologie est la possibilité de traiter des gaz à des températures plus élevées. La température optimale du gaz pour l'utilisation dans le précipitateur électrostatique est de 150 °C, mais cela dépendra du niveau d'humidité du gaz, ainsi que du type de poussière traité (Ozawa 2003).

Le projet vise à développer un thermogénérateur pour utiliser dans l'industrie de bouletage de minerai de fer, dans les zones du four où il y a de la chaleur fatale. On pourrait l'installer dans les cheminées des fours, vu que la température des gaz est proche de la limite

de la technologie, soit 150 °C. Ou encore, à d'autres endroits à l'intérieur de l'appareil de cuisson des boulettes, dans le but d'augmenter la puissance électrique générée. Il faudrait toutefois développer un équipement et des connexions électriques plus résistants aux hautes températures. L'énergie générée pourrait être utilisée pour remplacer la source d'énergie externe dans des bureaux ou pour des machines de l'usine, voire même pour fournir l'énergie au réseau électrique local.

1.5.2 LES ÉMISSIONS DE GES DANS L'INDUSTRIE DU BOULETAGE DE MINERAI DE FER

Des émissions de GES peuvent être générées à plusieurs étapes du bouletage de minerai de fer. La production des boulettes de minerai de fer est faite par l'agglomération du minerai de fer avec des additifs. À l'étape de cuisson des boulettes, les additifs apportent des caractéristiques mécaniques nécessaires pour le transport transocéanique et permettent d'ajuster des propriétés chimiques aux boulettes dans les aciéries. L'objectif ainsi visé est d'augmenter la performance et la qualité de l'acier produit.

Les principaux additifs utilisés avec le minerai de fer pour la production des boulettes sont la pierre à chaux, le charbon, ou le coke de pétrole, et la bentonite, ou le liant organique (Moraes *et al.* 2018).

La pierre à chaux, minerai qui fournit la source de CaO, ou la dolomite, minerai que fournit la source de MgO, est utilisée pour favoriser les réactions physico-chimiques dans le four de cuisson des boulettes. Cet additif est utilisé pour renforcer la liaison des agglomérés à des températures plus basses. En d'autres mots, la pierre à chaux permet une cuisson des boulettes à une température plus basse, en garantissant une résistance mécanique plus élevée (Fonseca 2004).

Le charbon, ou coke de pétrole, est utilisé pour fournir une source de chaleur à l'intérieur des boulettes, afin de garantir une cuisson uniforme. La cuisson de la surface externe des boulettes est faite à partir de l'énergie fournie par les brûleurs à l'étape de la cuisson des boulettes. La cuisson interne est garantie par cet additif, qui procure aux boulettes une résistance mécanique plus élevée (Fonseca 2004).

La bentonite, ou le liant organique, contribue à favoriser l'agglomération des particules de minerai de fer. Ces additifs entraînent la formation de ponts céramiques entre les particules de minerai de fer, ce qui réduit les événements de dégradation par effondrement des boulettes à hautes températures (Moraes *et al.* 2018). La bentonite, d'origine inorganique, fournit une concentration élevée de SiO₂, ce qui augmente la formation de gangue acide dans les boulettes. Cela augmente la formation de *slag* dans les aciéries. Le liant organique est une source qui apporte moins de SiO₂ dans le produit final. Il est normalement constitué par un mélange de cellulose, connu commercialement sous le nom de carboxyméthylcellulose (CMC). Cette solution visqueuse est ajoutée sous forme liquide et se comporte comme un film liquide dilué. Celle-ci fournit les caractéristiques mécaniques nécessaires pour supporter les hautes températures de cuisson sans dégrader les boulettes (Fonseca 2004).

En plus, les usines de bouletage de minerai de fer utilisent de l'énergie électrique pour le fonctionnement de divers équipements, comme les courroies de transport de boulettes, les unités d'agglomération, les mélangeurs, les ventilateurs de procédé, les grilles à l'intérieur du four de durcissement de boulettes, etc. La consommation électrique d'un four modèle *traveling grate* varie entre 25 et 35 kWh/tonne de boulettes (Metso:Outotec 2023).

Finalement, l'huile lourde ou le gaz naturel est utilisé à l'étape de cuisson des boulettes dans les brûleurs. L'utilisation du gaz naturel dépend de la disponibilité de cette source dans les régions où les usines sont situées. Par exemple, au Canada, seule l'huile lourde est utilisée pour fournir l'énergie aux brûleurs, vu qu'il n'existe pas de système de distribution du gaz naturel dans les usines de bouletage de minerai de fer sur la Côte Nord.

Les émissions de GES de l'industrie de bouletage de minerai de fer dépendent fortement du type de minerai utilisé, l'hématite ou la magnétite, des additifs utilisés comme l'huile lourde, le gaz naturel ou l'huile pyrolytique, le coke breeze (de cokéfaction) ou le charbon. Braga *et al.* (2023) a fait une collecte d'informations de procédé des usines de bouletage au monde et leurs facteurs d'émission de GES. Les plus basses valeurs d'émission de GES/tonne de boulettes sont calculées en fonction des conversions d'usines à une possible utilisation de l'huile pyrolytique ou du biochar (à l'heure actuelle) (Tableau 5).

Tableau 5. Émission de GES par caractéristique de procédés (Braga *et al.* 2023 - modifié)

Type de four	Type de minerai	Additifs	kg CO ₂ - éq/tonne	Références
Grate-Kiln	Magnétite	L'huile lourde	25	(Larsson <i>et al.</i> 2006)
Grate-Kiln	Hématite	Biochar + coke pétrole	30	(Braga <i>et al.</i> 2022)
Straight grate	Hématite	Gaz naturel/l'huile lourde + biochar	50	(Vale 2023)
Grate-Kiln	Hématite	Gaz naturel + coke pétrole	70	(Braga <i>et al.</i> 2022)
Straight grate	Hématite	L'huile lourde/l'huile pyrolytique + coke breeze	80	(ArcellorMittal 2022; Magazine 2022)
Straight grate	Hématite	Gaz naturel/L'huile lourde + coke breeze	100	(ArcellorMittal 2022; Magazine 2022; Vale 2022; Vale 2023)

On voit clairement l'impact du type de minerai sur les émissions de GES, vu que le minerai magnétite libère de l'énergie lorsqu'il est chauffé, ce qui réduit fortement l'ajout d'énergie par l'huile combustible ou par le gaz naturel ou le biochar, le charbon, le coke breeze ou l'huile pyrolytique. De son côté, le type de minerai hématite présente une réaction chimique endothermique avec les molécules de charbon à l'intérieur du four de durcissement, ce qui ne libère pas d'énergie lors de son réchauffement. Cependant, le type de minerai de fer utilisé pour la production des boulettes a un impact important sur l'empreinte carbone des industries de bouletage de minerai de fer. Certaines solutions pour la réduction des émissions de GES sont étudiées par des compagnies minières, soit l'utilisation à 100 % de l'huile pyrolytique en remplacement de l'huile lourde ou du gaz naturel présente une solution pour la réduction des émissions de GES par tonne de boulettes produites. L'utilisation du biochar en remplacement au charbon ou du coke breeze est aussi une solution dans la réduction des émissions de GES de l'industrie. Cependant, la disponibilité de cette ressource n'est pas actuellement suffisante pour un remplacement à 100 % du charbon et du coke breeze.

1.6 CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

En 2015, l'assemblée générale des Nations Unies a adopté le Programme 2030 pour le développement durable, qui considère 17 ODD avec 169 cibles (Nations Unies 2015). Les ODD sont un appel à l'action qui visent à éliminer la pauvreté, protéger la planète et améliorer la vie de toutes les personnes au monde. Le plan d'action est basé sur 5 domaines critiques, aussi connu comme les 5 piliers ou 5P, soit : Personnes, Planète, Prospérité, Paix et Partenariat (Nations Unies 2015). Les objectifs et cibles sont présentés dans l'Annexe A.

Deux mois après l'assemblée générale des Nations Unies en 2015, la 21^e conférence des parties (CdP 21) a eu lieu à Paris, où les pays participants ont signé un accord historique pour limiter le réchauffement climatique à 2 °C, voire à 1,5 °C, par rapport à l'ère préindustrielle, d'ici l'année 2100. On voit ici qu'il y a des ODD qui touchent précisément à ce sujet (Villeneuve 2016).

Produisant 33 % des émissions, le secteur de la production d'électricité émet la plus grande quantité de GES. Il est la principale cause du réchauffement planétaire, suivi par le secteur industriel avec 24 % des émissions. Vient ensuite le groupement AFOLU (agriculture, foresterie, changement d'affectation des terres) avec 22 %, le secteur du transport suit avec 15 % et les bâtiments avec 5,6 % (IPCC *et al.* 2022).

Tremblay *et al.* (2020) ont développé un système de classification des 169 cibles et des 5 piliers, afin d'établir les liens entre les 5P et les ODD. Cela a pour but de donner une vue holistique du Programme 2030 et de soutenir les gouvernements dans leur mise en œuvre d'actions en lien avec le développement durable.

Cette section vise à expliquer de façon résumée les ODD, en plus de donner l'état d'avancement de ces objectifs selon le rapport des Nations Unies (2022).

L'ODD 1 (Pas de pauvreté) définit des actions pour éliminer la pauvreté sur la planète, avec des cibles portant sur l'élimination de la pauvreté extrême, l'accès à des ressources économiques et à des services pour toutes les personnes, la réduction de l'impact des phénomènes climatiques, l'impact des crises économiques ou sociales sur la vie des

personnes vulnérables et la coopération internationale avec les pays en développement, tout cela, en visant à mettre fin à la pauvreté sous toutes ses formes (Nations Unies 2015). Villeneuve (2016) fait le lien entre l'ODD 1 et d'autres cibles. Parmi celles-ci, on compte l'amélioration de l'accès à l'eau potable (ODD 6), à l'éducation (ODD 4), sans compter les cibles visant à assurer une alimentation suffisante (ODD 2), à prendre soin de la santé (ODD 3) et à donner l'accès à l'énergie (ODD 7). Le constat fait par les Nations Unies (2022) démontre qu'il y avait de 657 à 676 millions de personnes (9,2 % de la population) en situation d'extrême pauvreté en 2022. Cela représente la première hausse du taux depuis des décennies, principalement en raison de la pandémie COVID-19 et de la guerre en Ukraine. Selon ce rapport, 4 millions de personnes n'auraient aucune protection sociale en 2016. C'est dire que l'objectif est encore loin d'être atteint.

L'ODD 2 (Faim « zéro ») définit les directives pour éliminer la faim, en assurant la sécurité alimentaire et en améliorant la nutrition des gens, en plus de promouvoir l'agriculture durable. Les cibles visent à garantir une alimentation saine, nutritive et suffisante pour toutes les personnes. Elles ont pour buts aussi l'élimination de la malnutrition, l'augmentation de la production agricole des petits producteurs alimentaires, le développement de pratiques agricoles résilientes qui permettront d'accroître la productivité et de préserver les écosystèmes. Il y est aussi question de la préservation de la diversité génétique des semences, des cultures et des animaux d'élevage, ainsi que la prévention des distorsions en ce qui a trait à la nourriture à l'échelle commerciale, l'accent étant mis sur la production locale et la réduction des exportations (Nations Unies 2015). Villeneuve (2016) évoque l'importance de la protection de la biodiversité par la réduction de l'utilisation de pesticides et d'engrais minéraux. Les Nations Unies (2022) estiment qu'une personne sur dix souffre de la faim et qu'une sur trois souffre d'insécurité alimentaire modérée ou grave en 2021 (ce qui représente 2,3 milliards de personnes au monde). Cette situation est grandement impactée par la variabilité du climat, les phénomènes climatiques extrêmes, les conflits, entre autres la guerre en Ukraine et les chocs économiques. La crise en Ukraine représente une menace à la sécurité alimentaire, vu que la Fédération de Russie et l'Ukraine sont de grands producteurs et exportateurs de produits alimentaires de base, représentant entre 20 % et 30 % des exportations mondiales de blé et de maïs et 80 % des exportations de produits à base de graines de tournesol. Le retard de croissance des enfants de moins de 5 ans est passé de 23 %

en 2015 à 22 % en 2020, ce qui est positif mais qui représente environ 149,2 millions d'enfants, concentrés dans les régions de l'Asie du Sud et de l'Afrique subsaharienne.

L'ODD 3 (Bonne santé et bien-être) définit les directives à suivre pour favoriser une vie en santé et le bien-être de tous. Il existe des cibles spécifiques pour la réduction des taux de mortalité maternelle, néonatale et chez les enfants de moins de 5 ans. Il y a des cibles spécifiques pour l'éradication des épidémies et maladies, comme le sida, la tuberculose, le paludisme, l'hépatite, etc. Des cibles portent aussi sur la prévention et le traitement des dépendances aux substances psychoactives et à l'alcool. Il y est aussi question de réduction des accidents routiers par des mesures de prévention. À cette fin, les Nations Unies prônent une structure sanitaire universelle et l'accès à des services de santé essentiels à des coûts abordables (Nations Unies 2015). Malgré les progrès dans différents domaines de la santé, la pandémie de la COVID-19 a impacté les efforts mis en place par les Nations Unies (2022). La pandémie de COVID-19 a directement causé la mort de près de 15 millions de personnes et a fortement perturbé les services de santé, notamment la vaccination des enfants, le traitement de la tuberculose, le paludisme, l'hépatite et le VIH. La pandémie a mis en évidence la pénurie de personnel de la santé, faisant en sorte que les services de santé ont été impactés et ont causé des problèmes d'anxiété et de dépression chez les jeunes.

L'ODD 4 (Éducation de qualité) veut garantir une éducation de qualité en plus de promouvoir les possibilités d'apprentissage tout au long de la vie, de la petite enfance, à l'éducation préscolaire, en passant par les études primaires, le secondaire, les techniques, l'éducation professionnelle ou tertiaire, à des coûts abordables à tous, incluant pour les personnes vulnérables. L'objectif vise aussi à éliminer l'analphabétisme et à accélérer les compétences afin de favoriser l'obtention d'emplois décents et à faire un appel aux pays développés visant à aider les pays en développement dans le domaine de l'éducation, à travers des bourses d'études et la formation de professeurs (Nations Unies 2015). Le système éducatif mondial a été fortement impacté par la COVID-19, car une grande partie des écoles ont dû fermer. Ces mesures de contention de la maladie ont fait en sorte que nombre d'élèves ont perdu des jours d'école (près de 24 millions d'élèves). Or, la pandémie de COVID-19 a seulement mis en évidence une crise déjà existante : les jeunes ayant des compétences en lecture et en calcul à la fin du premier cycle du secondaire représentent entre 70 et 90 % des

jeunes dans les pays à revenu élevé et seulement 60 % dans les pays à faible revenu (Nations Unies 2022).

L'ODD 5 (Égalité entre les sexes) met en évidence les actions pour réduire les inégalités entre les hommes et les femmes. Il se concentre sur la réduction de toutes les formes de discrimination envers les femmes et les filles, sur l'élimination de toutes les formes de violence et de pratiques préjudiciables contre les femmes et filles. Cela inclut les exploitations sexuelles, le mariage des enfants, les mutilations, etc. Cet objectif fait appel aussi à la participation des femmes dans les rôles décisionnels liés à la vie politique, économique et publique. Il vise à garantir l'accès aux soins de santé sexuelle et procréative (Nations Unies 2015). Le rapport sur les ODD 2022 réitère l'idée selon laquelle, au rythme actuel, il faudra encore 40 ans pour que la parité soit atteinte dans les milieux politiques. En effet, seulement 26,2 % des femmes occupent des sièges dans les parlements nationaux ou au niveau mondial. Le rapport atteste aussi qu'une femme ou fille sur quatre aurait subi des violences physiques ou sexuelles (641 millions) au moins une fois dans leur vie. Le monde n'est pas en voie d'attendre l'égalité entre les sexes d'ici 2030 (Nations Unies 2022).

L'ODD 6 (Eau propre et assainissement) vise à garantir des services d'eau potable et d'assainissement de façon durable. Cela inclut l'accès à des coûts abordables, l'amélioration de la qualité de l'eau en éliminant l'immersion des déchets, des produits chimiques et dangereux, ainsi que l'utilisation rationnelle de ressources en eau dans tous les secteurs. Cet objectif renvoie aussi à une gestion transfrontalière des ressources en eau et à la protection/restauration des écosystèmes liés à l'eau (Nations Unies 2015). Villeneuve (2016) insiste également sur l'importance de la protection des écosystèmes de l'eau, notamment le couvert forestier, pour la protection des espèces. Les Nations Unies (2022) attirent l'attention sur le caractère alarmant du rythme actuel de dégradation des écosystèmes de l'eau. En effet, 85 % des zones humides de la planète ont déjà disparu depuis les 300 dernières années. Pour atteindre les cibles de l'eau potable, d'assainissement et d'hygiène d'ici 2030, le rythme de progression doit quadrupler. Il s'agit d'un grand défi, car la demande en eau potable et en assainissement est croissante, vu la croissance démographique mondiale, l'urbanisation, l'activité industrielle et la consommation d'aliments (agriculture). Au rythme actuel, la

couverture d'approvisionnement en eau potable atteindra les 81 % et l'assainissement, les 67 %, en 2030.

L'ODD 7 (Énergie propre et à un coût abordable) vise à garantir l'accès à des services énergétiques fiables, durables, modernes et à des coûts abordables. Cela inclut l'augmentation de l'énergie renouvelable dans le bouquet énergétique mondial et l'objectif qui consiste à doubler l'efficacité énergétique. L'objectif fait appel à la nécessité d'investir en recherche pour améliorer les technologies et infrastructures liées à l'énergie propre, renouvelable, l'efficacité énergétique et le remplacement des combustibles fossiles (Nations Unies 2015). Selon les Nations Unies (2022), le monde progresse vers cet objectif, mais il importe d'accélérer l'amélioration de l'efficacité énergétique afin de réduire le niveau d'émission de GES, tout en garantissant l'accès à l'électricité pour tous (733 millions de personnes n'y ont pas accès). Au rythme actuel, seulement 92 % de la population aura accès à l'électricité en 2030. L'énergie renouvelable représente 17,2 % du bouquet énergétique mondial en 2020. Les investissements dans le développement de l'énergie propre dans les pays en développement ont diminué pour la deuxième année consécutive. Villeneuve (2016) explique qu'il faut faire attention à l'impact de cet objectif sur la biodiversité, car 80 % du bouquet énergétique mondial primaire provient de l'énergie fossile et que quelques technologies d'énergie de source renouvelable peuvent avoir un impact important sur l'écosystème.

L'ODD 8 (Travail décent et croissance économique) vise à promouvoir une croissance économique soutenue, partagée et durable. Ses cibles visent l'augmentation du produit intérieur brut des pays moins avancés, la diversification de secteurs économiques, la modernisation technologique et l'innovation, la création de politiques axées sur la croissance de l'entrepreneuriat, des microentreprises et des petites et moyennes entreprises. L'objectif vise aussi l'égalité entre les hommes et les femmes sur le marché du travail et la garantie d'un emploi productif pour tous, la réduction du pourcentage de jeunes non scolarisés, sans emploi ou formation, sans compter l'élimination des travaux forcés et de l'esclavage moderne. Le développement du tourisme durable fait partie de cet objectif également (Nations Unies 2015). Le rapport sur les ODD cite que la pandémie de COVID-19, l'inflation croissante, les problèmes liés aux chaînes d'approvisionnement, les incertitudes politiques et

la guerre en Ukraine sont des facteurs clés qui expliquent le ralentissement de la croissance économique (Nations Unies 2022). Qui plus est, l'impact de cette crise affecte davantage les personnes à faible revenu, augmentant par conséquent les inégalités sociales. L'économie mondiale a commencé à s'améliorer lentement en 2021, mais non suffisamment pour atteindre les cibles de 2030 (Nations Unies 2022).

L'ODD 9 (Industrie, innovation et infrastructures) vise la promotion d'infrastructures de qualité, fiables, durables et résilientes, qui favorisent l'économie à des coûts abordables. Cet objectif vise à promouvoir l'industrialisation durable, l'emploi et le produit intérieur brut, en plus d'encourager l'innovation, l'emploi des technologies et des procédés industriels propres et respectueux de l'environnement. L'innovation devra être soutenue par les gouvernements à travers le renforcement de la recherche scientifique, notamment en ce qui concerne les performances industrielles et l'augmentation de la quantité de personnes travaillant dans le secteur de la recherche et développement (Nations Unies 2015). Le rapport d'avancement sur les ODD en 2022 a démontré que les industries ayant une haute technologie se sont remis plus rapidement de la pandémie de COVID-19 (Nations Unies 2022), démontrant ainsi l'importance de l'innovation dans les industries. Les pays moins avancés (surtout basés sur la production primaire, soit l'agriculture, l'exploitation minière, etc.) ont été les plus impactés par la pandémie. Pourtant, l'industrie aérienne, qui est très technologique, a été très impactée par la pandémie de COVID-19, en raison des mesures de confinement adoptées par les gouvernements (Nations Unies 2022).

L'ODD 10 (Inégalités réduites) vise à mettre en œuvre des actions pour réduire les inégalités dans les pays et d'un pays à l'autre. Cet objectif veut voir advenir une augmentation plus rapide des revenus pour les pauvres, une plus grande autonomie des gens et leur intégration sociale, politique et économique, sans tenir compte des différences. À cette fin, une révision et une analyse des lois, politiques et pratiques visant à assurer l'égalité des personnes doivent être faites sur les plans budgétaire, salarial et social. Cet objectif vise aussi à réglementer les institutions et marchés financiers du monde, en passant notamment par une réduction des coûts liés aux transactions financières (Nations Unies 2015). Le rapport d'avancement sur les ODD démontre que la pandémie de COVID-19 et la guerre en Ukraine ont fortement impacté les avancements de cet objectif (avancements positifs avant la

pandémie), car les inégalités des revenus entre pays ont augmenté de 1,2 %, sans compter que le nombre de réfugiés dans le monde a atteint un record (311 sur 100 000 habitants) (Nations Unies 2022). Finalement, l'année 2019 a été l'une des plus mortelles pour les migrants, qui quittent leur pays par des voies illégales et parfois dangereuses. La discrimination structurelle et systémique est toujours présente, touchant plus fortement les femmes (Nations Unies 2022).

L'ODD 11 (Villes et communautés durables) se concentre sur la garantie d'espaces humains sûrs, accessibles à tous, viables, abordables, résilients et durables. Cela inclut les logements, le transport public, des espaces verts et des espaces publics sûrs. Cet objectif souhaite aussi une réduction des personnes tuées ou touchées par des catastrophes. Il porte aussi une attention spéciale à la qualité de l'air et à la gestion des déchets par les municipalités (Nations Unies 2015). Le rapport d'avancement des ODD 2022 renforce l'idée selon laquelle la pandémie de COVID-19 a mis en évidence une crise de logement, ainsi qu'une infrastructure insuffisante pour ce qui est des transports publics et des services de base (Nations Unies 2022). La planification urbaine devient difficile avec l'augmentation de la population dans les zones urbaines, le nombre d'habitants vivant dans des taudis, l'accès difficile aux logements abordables et les risques de catastrophes climatiques. L'urbanisation accélérée cause une augmentation rapide des particules fines $PM_{2,5}$ dans l'air, ce qui augmente les problèmes respiratoires de la population, ainsi que les risques d'accidents vasculaires cérébraux, de maladies cardiaques et de cancers du poumon. Un autre point d'attention concerne la collecte et le traitement des déchets municipaux. En 2022, il est estimé que 82 % des déchets solides sont collectés et que 55 % sont gérés dans des installations contrôlées. Or, la croissance de la population urbaine accroît ce problème et ses conséquences sur la santé des populations (Nations Unies 2022).

L'ODD 12 (Consommation et production durables) donne les directives pour les modes de consommation et de production durables. On vise à découpler la croissance économique de la dégradation de l'environnement par l'optimisation de l'utilisation des ressources et par des modes de vie durables. De surcroît, il prône la réduction des pertes dans la production d'aliments, la réduction des déchets alimentaires, l'utilisation rationnelle des produits chimiques et une destination finale adéquate. En général, il s'agit de réduire la production

des déchets par la prévention, la réduction, le recyclage et la récupération. On compte aussi des cibles visant l'éducation sur les sujets du développement durable et des modes de vie en harmonie avec la nature, cela visant à aider les pays en développement à se doter de moyens technologiques et scientifiques sur les modes de production et consommation durables (Nations Unies 2015). Selon le rapport d'avancement des ODD, 13,3 % de toute la production d'aliments est perdue après la récolte et n'arrive pas aux consommateurs finaux. De plus, 17 % des aliments sont gaspillés par les consommateurs finaux. Il est important de mentionner que les pertes alimentaires et le gaspillage représentent de 8 à 10 % des émissions de GES de la planète. Et le taux moyen de collecte des déchets électroniques est de 22 %, seulement à l'échelle mondiale. Le rapport mentionne aussi que la dépendance humaine aux ressources naturelles est en forte croissance, ce qui augmente la pression sur les écosystèmes (Nations Unies 2022).

L'ODD 13 (Lutte contre les changements climatiques) fait appel aux mesures d'urgence nécessaires à la lutte contre les changements climatiques et leurs conséquences, ce qui inclut des cibles de renforcement de la résilience et d'adaptation aux conséquences et catastrophes naturelles provenant des changements climatiques. De plus, il veut mettre en œuvre des mesures spécifiques dans les politiques, stratégies et planifications nationales, des mesures concernant la mobilisation de la population face aux changements climatiques, soit par l'éducation ou la sensibilisation, afin d'atténuer leurs effets. Or, cela nécessite l'engagement financier des pays développés (versement annuel de 100 milliards de dollars) qui doivent soutenir les pays les moins avancés dans la mise en œuvre de mesures concrètes d'atténuation des effets des changements climatiques (Nations Unies 2015). Le rapport d'avancement des ODD (Nations Unies 2022) lance une alerte sur les changements climatiques causés par le réchauffement du climat, dont les conséquences seront graves sur l'environnement et les écosystèmes, en plus d'engendrer des catastrophes naturelles. Il y a des risques de voir des récifs coralliens disparaître si le seuil de 2 °C est dépassé, le niveau de la mer pourra augmenter de 30 à 60 cm d'ici 2100 si l'on se fie au niveau actuel d'avancement du réchauffement climatique. Cela entraînera de graves conséquences, comme des sécheresses et une augmentation des catastrophes naturelles causées par les changements climatiques (inondations, feux de forêt, tornades, etc.). Le rapport démontre aussi que les émissions de CO₂ liées à l'énergie continuent d'augmenter, atteignant un taux record, et que

la température globale continue d'augmenter année après année (Nations Unies 2022). Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) alerte quant au niveau actuel d'émission de GES et fait appel à une réduction drastique de 43 % des GES d'ici 2030 pour atteindre la carboneutralité en 2050 (Nations Unies 2022). Or, les engagements nationaux actuels ne sont pas suffisants. Au lieu de réduire les émissions de GES, une augmentation de 14 % est prévue au cours de la prochaine décennie (Nations Unies 2022). Les pays développés n'ont pas non plus versé le montant annuel convenu de 100 milliards de dollars aux pays moins développés (Nations Unies 2022).

L'ODD 14 (Vie aquatique) fait appel à la conservation et à l'exploitation durable des ressources de l'eau dans les océans, les mers et les ressources marines. Les cibles de cet objectif se concentrent sur la réglementation de la pêche (avec réduction de la surpêche, de la pêche illicite, non déclarée et non réglementée), la réduction de la pollution marine, la protection des écosystèmes marins et côtiers, ainsi que la réduction de l'acidification des océans qui passe fortement par la réduction des émissions de GES (Nations Unies 2015). Le rapport d'avancement des ODD est catégorique : les océans sont en danger. Si rien ne change, la pollution par des plastiques et autres déchets demeurera élevée et continuera à augmenter. L'acidification croissante des océans menace la vie marine et limite la capacité des océans d'absorber le CO₂ atmosphérique (Nations Unies 2022).

L'ODD 15 (Vie terrestre) traite d'un sujet très important pour maintenir la vie sur la planète, soit la préservation et la restauration des écosystèmes terrestres par la gestion durable des forêts, la mise en place d'actions pour inverser la dégradation des sols, la fin de l'appauvrissement de la biodiversité et la lutte contre la désertification. Il y a des cibles urgentes sur la préservation, la restauration et l'exploitation durable des écosystèmes terrestres, de l'eau douce, des forêts, des montagnes, des zones arides et humides. Cela vise spécifiquement à mettre fin à la déforestation, à restaurer les forêts dégradés et à accroître le boisement au niveau mondial d'ici 2020, ce qui n'a pas été fait. Cet objectif table également sur la lutte contre la désertification et la restauration des terres, des sols dégradés et la préservation des écosystèmes montagneux, afin de protéger leur biodiversité. Cet objectif cible aussi le partage équitable des ressources génétiques naturelles et vise à mettre fin au braconnage et au trafic d'espèces végétales et animales. Il fait appel également à des mesures

visant à restreindre l'introduction d'espèces exotiques envahissantes et à atténuer leurs effets sur les écosystèmes. À cette fin, il importe d'intégrer la protection des écosystèmes et de la biodiversité dans la planification nationale (Nations Unies 2015). Le rapport d'avancement sur les ODD affirme que 10 millions d'hectares de forêts sont détruits chaque année, quoique à un rythme plus lent que lors des décennies précédentes, principalement en raison de l'expansion agricole (Nations Unies 2022). Le point positif est que le sujet de la déforestation est de plus en plus présent dans les discussions et les politiques nationales. C'est donc dire que les pays prennent des mesures plus sévères contre la déforestation et des actions pour le reboisement. Les pays adoptent de plus en plus le protocole de Nagoya sur le partage équitable, juste et durable des ressources génétiques, ce qui favorise le partage d'information, la recherche et la sélection de matériaux pour la protection des espèces (Nations Unies 2022). Les zones essentielles pour la protection de la biodiversité ont augmenté, passant d'un quart en 2000 à près de la moitié en 2022. Cependant, le rythme d'extinction des espèces a atteint son plus haut niveau dans l'histoire de la planète (Nations Unies 2022).

L'ODD 16 (Paix, justice et institutions efficaces) fait appel à des sociétés pacifiques et inclusives, en assurant l'accès de tous à la justice et à des institutions efficaces, responsables et ouvertes à tous. Des cibles portent sur la réduction de toutes les formes de violence : des taux de mortalité, à la violence et à la maltraitance des enfants, en passant par l'accès à la justice pour tous de façon égalitaire. La réduction des flux financiers illicites liés au trafic d'armes à feu et le combat contre le crime organisé, ainsi que la réduction de la corruption. On souhaite aussi garantir à tous une identité juridique et aider les pays en développement dans la lutte contre la criminalité, le terrorisme et la corruption (Nations Unies 2015). Le rapport d'avancement des ODD démontre que le monde connaît le plus grand nombre de conflits violents depuis 1946 (Nations Unies 2022). Un quart de la population vit dans des pays touchés par des conflits. Le niveau de corruption est très élevé. La guerre en Ukraine a fortement impacté les chiffres sur la violence et le taux record de 100 millions de personnes déplacées de force en 2022. Le taux d'homicides a diminué entre 2015 et 2020, en passant de 5,6 à 5,2 homicides par 100 000 habitants, mais la tendance actuelle n'est pas suffisante pour arriver à la cible de 2030 (Nations Unies 2022).

L'ODD 17 (Partenariats pour la réalisation des objectifs) réitère la nécessité de bâtir des partenariats au niveau mondial pour le développement durable. Cet objectif mise sur l'aide internationale, notamment entre les pays développés vers les pays en développement pour les aider dans tous les aspects du développement durable. Qu'il s'agisse de les aider à réduire leurs dettes, de les aider dans leur développement en partageant des technologies, des sciences, en prônant l'innovation, une accélération des exportations et en leur donnant accès au commerce international. Le but principal de cet objectif est d'améliorer les conditions de vie de tous les habitants du monde, en réduisant les inégalités, la pauvreté, la protection de l'environnement, la croissance économique, etc. Pour ce faire, les pays développés sont appelés à aider les pays moins avancés et en développement (Nations Unies 2015). Le rapport d'avancement des ODD mentionne que la pandémie de COVID-19 a accentué les disparités sociales dans le monde (Nations Unies 2022). Les pays moins développés ont subi une hausse du taux d'inflation, des problèmes de distribution des vaccins, un haut taux d'intérêt et l'augmentation de dettes internationales. L'aide publique au développement (APD) a été bonifiée en 2020 et en 2021, principalement grâce aux mesures contre la pandémie de COVID-19, mais nous sommes encore loin de la cible de 2030 (Nations Unies 2022).

Ce travail vise à répondre à des cibles des ODD 7 (Énergie propre et à un coût abordable), 8 (Travail décent et croissance économique), 9 (Industrie, innovation et infrastructures), 12 (Consommation et production durables) et 13 (Lutte contre les changements climatiques).

1.7 OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

Cette étude vise à développer un prototype de thermogénérateur d'électricité qui pourrait être utilisé pour la récupération de la chaleur dissipée des processus industriels. Ce thermogénérateur permettrait la conversion d'énergie de la chaleur fatale en électricité dans l'industrie du bouletage du minerai de fer. L'étude vise également à comparer les impacts économiques et environnementaux de ce processus en comparaison au scénario de référence dont la chaleur fatale n'est pas récupérée.

Les objectifs spécifiques de l'étude sont les suivants :

1. Développer deux prototypes de thermogénérateurs : le premier utilisant le processus de dépôt de matériaux via la projection thermique, et un second à partir du concept de la thermopile classique en utilisant des câbles de thermocouples. Ce développement se fera en atteignant les sous-objectifs suivants :

- Caractériser les principes de fonctionnement du thermogénérateur et les principaux matériaux à utiliser pour concevoir efficacement les prototypes de projection thermique et de la thermopile classique.
- Spécifiquement pour la projection thermique : développer un revêtement via la projection thermique capable de reproduire le concept de thermopile pour générer de l'électricité à partir de la différence de température équivalente aux conditions industrielles.
- Spécifiquement pour la thermopile classique : développer un prototype en laboratoire qui permettra la réalisation d'une conception réaliste pour l'échelle industrielle.
- Définir l'étendue des températures de travail d'utilisation recommandée pour les prototypes et cibler les endroits possibles d'installation de la technologie dans une entreprise de bouletage de minerai de fer.

2. Déterminer comment les technologies développées dans cette étude pourraient répondre à des cibles des 17 ODD du Programme 2030 des Nations Unies dans une perspective d'opérationnalisation du développement durable et de l'application de l'écologie industrielle. Les objectifs spécifiques sont :

- Faire un bilan énergétique du processus de bouletage de minerai de fer, afin de présenter les opportunités de récupération de la chaleur à différentes étapes du procédé.
- Identifier des bénéfices économiques potentiels de l'application de cette technologie à une échelle industrielle.
- Quantifier le potentiel de réduction d'émissions de GES de l'utilisation de cette technologie en comparaison au scénario de référence.
- Identifier des cibles des ODD susceptibles d'être atteintes par les concepts de thermogénérateur développés dans l'objectif 1.

Hypothèses

Les hypothèses de ce projet de recherche sont listées ci-dessous:

- Comparer les deux types de thermogénérateur, soit celui qui est conçu à partir de la projection thermique et celui qui l'est à partir du principe de la thermopile classique, en considérant les aspects suivants :
 - La conception d'un thermogénérateur à partir du processus de projection thermique permettra de convertir suffisamment de chaleur fatale en électricité en termes de tension (V), de courant (A) et de puissance (W) pour une utilisation à l'échelle industrielle.
 - L'utilisation d'un thermogénérateur pourrait réduire les émissions de GES, en comparaison au scénario de référence qui représente la pratique courante sans thermogénérateur.
 - L'utilisation d'un thermogénérateur pourrait contribuer à l'atteinte de certaines cibles des 17 ODD du Programme 2030 des Nations Unies.
- L'utilisation de différents matériaux disponibles pour la projection thermique pour la génération d'électricité offrira différents rendements énergétiques et affectera l'efficacité de conversion d'énergie durant la thermogénération.

Les chapitres 2 et 3 présentent les travaux visant à répondre à l'objectif 1. Ceux-ci portent respectivement sur les concepts de la projection thermique et de la thermopile classique. Chacun des chapitres comporte des sections matériel et méthodes, résultats et discussion. Quant à lui, le chapitre 4 présente les travaux pertinents à l'objectif 2. Le chapitre 5 conclut l'étude.

2. CONCEPT D'UTILISATION DE LA PROJECTION THERMIQUE POUR LA RÉCUPÉRATION DE CHALEUR : MATÉRIEL, MÉTHODES, RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1 MATÉRIEL ET MÉTHODES

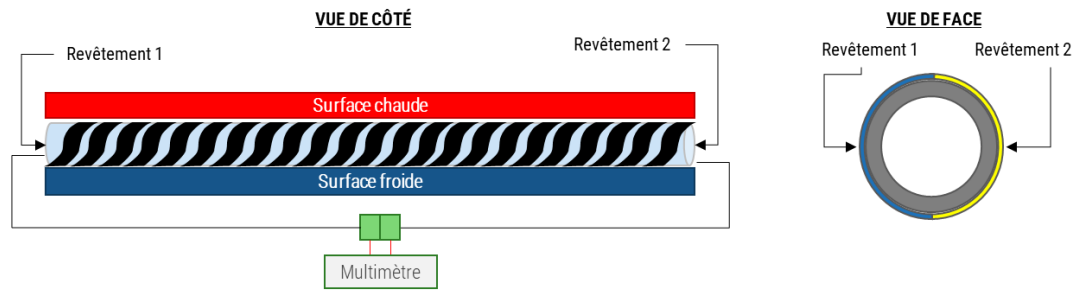
2.1.1 SITE D'ÉTUDE

La fabrication du prototype et les essais en laboratoire ont été réalisés à la compagnie Métal 7 Inc., à Sept-Îles, Québec, Canada. La compagnie Métal 7 Inc. est une compagnie spécialisée en développement de solutions industrielles dans le traitement du minerai de fer et aussi dans l'application de revêtements à partir de la projection thermique. Le but de cette technologie est d'améliorer la performance des équipements et des pièces contre l'usure, la corrosion, les cycles thermiques, etc. Dans sa gamme d'équipements, on trouve des tamis à rouleaux, des filtres de disques à vide, des brûleurs, des rouleaux avec revêtement et diverses autres pièces pour les fours de cuisson des boulettes de minerai de fer.

2.1.2 MATÉRIEL

Pour la fabrication du prototype, une tige de 25,4 mm (1 pouce) d'acier carbone a été utilisée, sur laquelle la projection thermique a été appliquée.

Un ruban résistant à haute température a été utilisé afin d'acheminer les électrons entre les parties chaude et froide du prototype. La Figure 10 représente le concept du thermogénérateur basé sur l'utilisation de la technologie de projection thermique pour créer l'effet Seebeck.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2022

Figure 10. Concept du thermogénérateur à partir de la projection thermique.

Les matériaux de projection thermique utilisés sont détaillés dans la section 2.1.4.

2.1.3 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le dispositif expérimental a été divisé en deux étapes de fabrication et essais. La première étape consistait à assembler différents fils de projection de la technologie Twin-Arc Spray. Il s'agissait de sélectionner les meilleures combinaisons des fils de la projection thermique pour la récupération de l'énergie. La deuxième étape visait à reproduire la meilleure combinaison trouvée lors de la première étape (ou ce qui s'en approchait le plus, dans le cas d'un changement de la technologie de projection thermique) à une échelle plus grande (quantité de connexions en parallèle et en série pour augmenter le courant électrique et la tension). Le but était d'identifier les corrélations entre ces variables, en y comparant la température et l'efficacité du système. Le prototype créé à l'étape 2 a également été utilisé pour évaluer les performances d'un dispositif industriel et pour déterminer le niveau d'incertitude du projet. Finalement, la troisième étape avait pour but d'évaluer si la surface de connexion impactait la génération d'électricité par effet Seebeck.

2.1.4 PROCESSUS DE SÉLECTION DES MATÉRIAUX

Une sélection initiale des matériaux pour les essais en laboratoire est effectuée sur des poudres et fils. Une consultation avec les principaux fournisseurs de poudres pour la projection thermique a été réalisée, afin de sélectionner les meilleures options. Le projet visait à utiliser seulement les matériaux disponibles commercialement (s'il n'y a pas de semi-

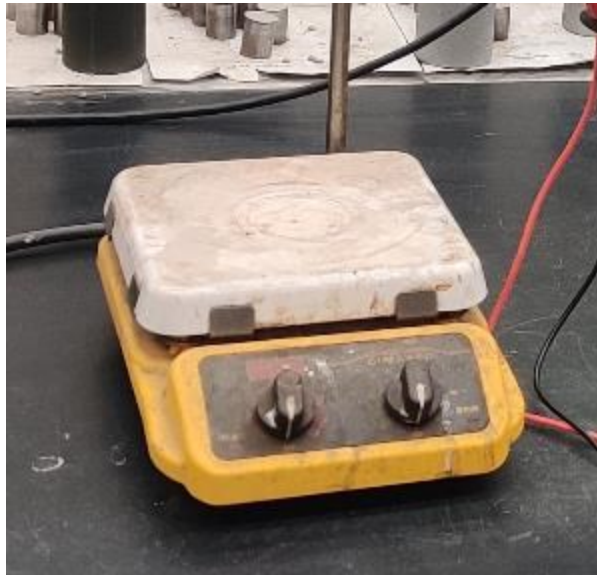
conducteurs disponibles, aucun essai ne sera réalisé avec ce type de matériel). Pour les groupes de métaux, les éléments les plus loin dans la série galvanique ont été considérés.

- Étape 1 :
 - Utilisation de fils de la technologie de projection thermique Twin-Arc Spray.
 - Matériel basé en NiCrSi, NiAl, NiCrAl, FeCrSiB, Zn pur – 10 combinaisons comparées à 10 spectres de températures. Le total : 100 résultats.
 - Spectre des températures d'essai : 50 °C à 500 °C.
 - Le gradient de différence des températures testées débutait à 50 °C et augmentait par tranche de 50 °C jusqu'au maximum de 500 °C.
- Étape 2 :
 - Produire un prototype fonctionnel pour les validations en laboratoire, à travers différentes techniques de projection thermique, à partir de la meilleure combinaison de l'étape 1.
 - Si le prototype est fonctionnel, réaliser différentes combinaisons en série et en parallèle (3 combinaisons différentes) comparée à 10 spectres de températures comparés à 3 répétitions. Le total : 90 essais.
 - Spectre des températures d'essai : 50 °C à 275 °C. Le gradient de différence des températures testées débutait à 50 °C et augmentait par tranche de 25 °C jusqu'au maximum de 275 °C.
- Étape 3 :
 - Utilisation de la technologie de projection thermique Twin-Arc Spray.
 - Sélection de la meilleure combinaison de l'étape 1. Création d'un prototype dont la surface de connexion est plus grande. Valider si la surface de connexion a un impact sur la génération d'électricité par effet Seebeck.
 - Spectre des températures d'essai : 50 °C à 500 °C.
 - Le gradient de différence des températures testées débutait à 50 °C et augmentait par tranche de 50 °C jusqu'au maximum de 500 °C.

2.1.5 MESURES DES VARIABLES DE PERFORMANCE DU THERMOGÉNÉRATEUR

La collecte des données est faite afin d'évaluer l'énergie capturée, par la tension (Volt - V), le courant électrique (Ampère - A) et la puissance (Watt - W), selon la variation de température. La tension (V) multipliée par le courant (A) donne la puissance électrique (W). L'étendue des températures est divisée afin d'évaluer la performance du thermogénérateur à 1) un faible différentiel de température (maximum de 100 °C) et 2) un différentiel de température conventionnelle pour une application dans la cheminée d'un four de boulettes de minerai de fer (entre 100 °C et 275 °C, ce qui est suffisant pour simuler des températures de cette étape du processus de production de boulettes).

Une plaque chauffante agitatrice Cimarec™ Basic Stirring Hotplates chauffe le thermogénérateur et permet une variation contrôlée de la température entre 100 °C et 600 °C (Figure 11).



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2022

Figure 11. Plaque chauffante agitatrice Cimarec™ Basic Stirring Hotplates.

Les mesures de tension électrique (voltage) sont prises avec des multimètres modèle Fluke 289. Les mesures de température de la plaque chauffante et de l'environnement ont été prises par un thermomètre/thermocouple digital modèle Fluke 1587 FC (Figure 12).



Figure 12. a) Multimètre modèle Fluke 289, b) multimètre modèle Fluke 1587 FC.

2.1.6 PLAN DE TRAVAIL ET DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE

Les essais ont été effectués afin de qualifier le processus de projection thermique pour la fabrication d'un thermogénérateur par l'effet Seebeck. Pour ce faire, plusieurs étapes d'essais ont été nécessaires. Plusieurs défis se sont présentés lors des essais, car il n'existe pas de recette de production de thermogénérateur par la projection thermique.

Les étapes d'essai avaient le but de transformer une base métallique en une base isolante et d'y ajouter des revêtements métalliques, soit conducteurs ou semi-conducteurs sous la base créée. La base isolante est importante, car elle réduit les pertes de chaleur par effet Joule, ce qui réduirait autrement la génération d'électricité globale par l'effet Seebeck.

L'équipe multidisciplinaire de Métal 7 a été consultée afin de définir les concepts pour les étapes 1, 2 et 3 décrites dans la section 2.1.4.

Les essais ont été divisés de la façon suivante :

Étape 1 :

- Créer des courbes de corrélation entre les différents fils métalliques de projection thermique par la technologie *Twin-arc*, afin de déterminer les meilleurs couplages de métaux à utiliser dans le prototype.

Étape 2 :

- Faire la projection par *Twin-arc* sur le bois pour valider la possibilité de l'utiliser comme base isolante.
- Si la projection thermique sur le bois ne fonctionne pas, créer un revêtement multicouche grâce à la technologie *Twin-arc*, en utilisant une base métallique (sous-couche en alumine + couche en NiCrAl).
- Si l'étape précédente ne fonctionne pas, créer un revêtement multicouche à l'aide de la technologie de projection via *Plasma spray*, en utilisant une base métallique (sous-couche en alumine + couche en NiCrAl).
- Si l'étape précédente ne fonctionne pas, créer un revêtement multicouche à l'aide de la technologie de projection via *Plasma spray*, en utilisant une base métallique (sous-couche NiCrAl + Alumine + Alumine et NiAl + NiCrAl)
- Assembler le prototype développé en expérimentant avec différentes configurations en série et en parallèle afin de tester et de valider la génération d'électricité par l'effet Seebeck.

Étape 3 :

- Valider si la surface de connexion joue un rôle dans la génération de tension, de puissance et de courant.

2.1.7 ANALYSES STATISTIQUES

Les analyses statistiques utilisées dans cette étude visent à faire une évaluation des données recueillies lors des essais en laboratoire, telles que des analyses de régression linéaire entre la tension (V) générée en comparaison avec la température (°C) de chaque prototype essayé. Une analyse de variance (ANOVA) comportant des facteurs fixes (surface

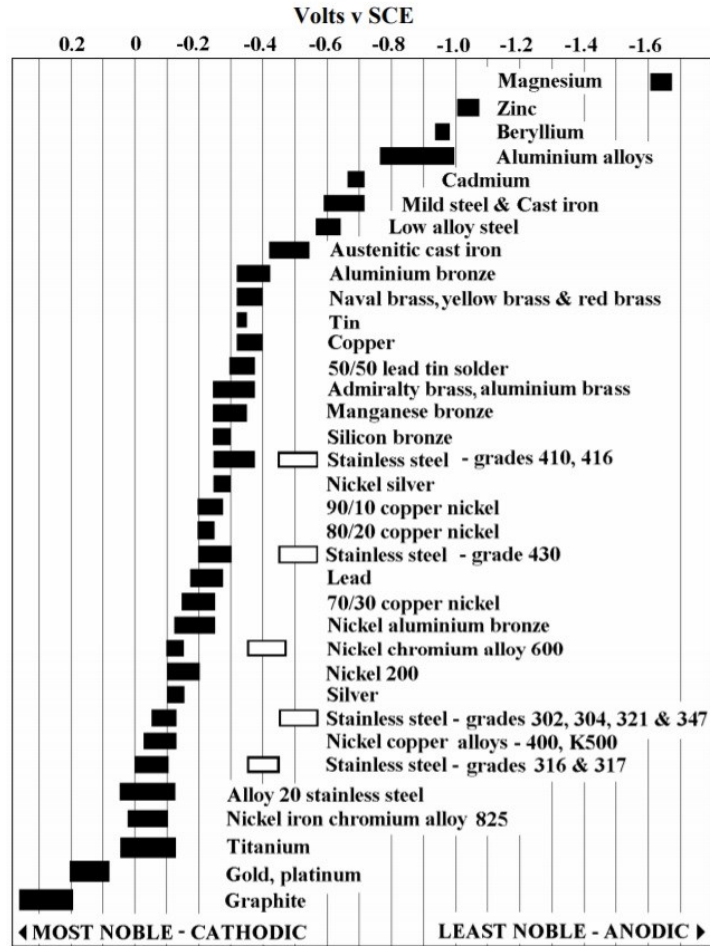
de connexion et gradient de températures) est aussi réalisée afin de valider si la surface des connexions a un impact sur la génération d'électricité.

2.2 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE

Les résultats présentés dans ce chapitre suivront l'ordre des essais détaillés dans la section 2.1.6 et seront présentés dans les sous-sections subséquentes. Les calculs des bénéfices environnementaux et économiques seront présentés dans le chapitre 4.

2.2.1 DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE - ÉTAPE 1

L'étape 1 avait l'objectif de sélectionner les meilleures combinaisons de matériaux conducteurs pour la génération d'énergie par rapport à différentes échelles de température. Pour ce faire, différents matériaux ont été sélectionnés, basés sur la composition chimique des matériaux et sur la série galvanique des métaux (Figure 13). La série galvanique explique le potentiel de corrosion de 2 matériaux différents entrant en contact, à travers le transfert d'électrons entre eux, où un matériau a un potentiel de corrosion plus élevé que l'autre. Ce dernier est normalement utilisé comme matériau de sacrifice (Gouvernement du Canada 2021). Lorsque les matériaux sont plus distants dans la série galvanique, on obtient un transfert d'électrons plus élevé et donc un potentiel de génération d'électricité également plus élevé. L'idéal serait d'utiliser des matériaux semi-conducteurs, afin de réduire les pertes de chaleur par l'effet Joule. Or, après avoir contacté plusieurs fournisseurs de poudres et fils de projection thermique, nous avons constaté qu'il n'existe pas de matériaux semi-conducteurs pour cette application disponibles commercialement.



CC BY-SA 4.0

Figure 13. Série galvanique (Tugsataydin 2020).

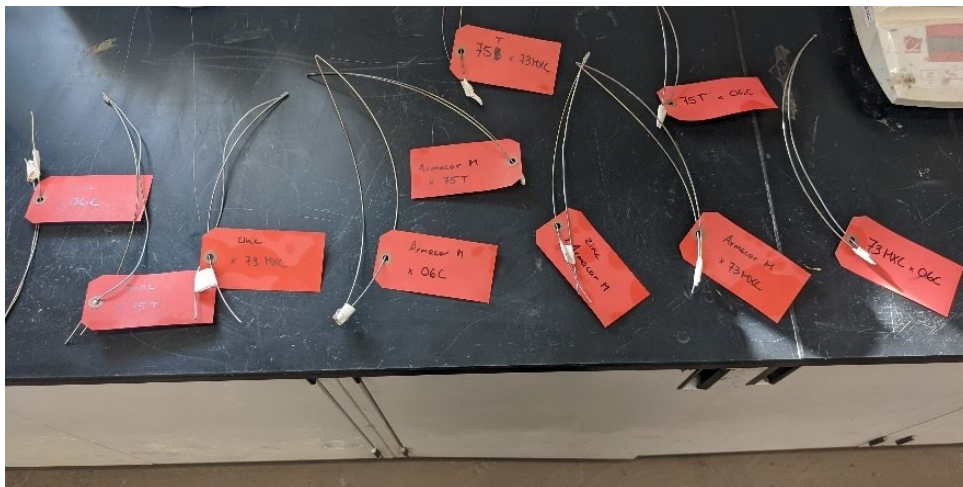
Malgré la non-disponibilité des semi-conducteurs visés initialement une solution alternative a été trouvée et les matériaux utilisés dans ces essais sont décrits ci-dessous :

- Fil 1, composé de 20 % Ni, 2,5 % Cr, 1 % Mn et 76,5 % Si.
- Fil 2, zinc pur avec pureté de 99,9 %.
- Fil 3, composé de 21 % Ni, 7 % Cr, 70 % Al.
- Fil 4, nommé 75T, composé par 95 % Ni et 5 % Al.
- Fil 5, composé par 27-29 % Cr, 1,5-2 % Mn, 1-2 % Si, 3-4 % B, 63-67,5 % Fe.

La combinaison des matériaux a été définie dans le but d'essayer toutes les combinaisons de fil, d'où le schéma d'essais suivant (Figure 14 et Tableau 6).

Tableau 6. Comparaison entre les différentes technologies de récupération de la chaleur.

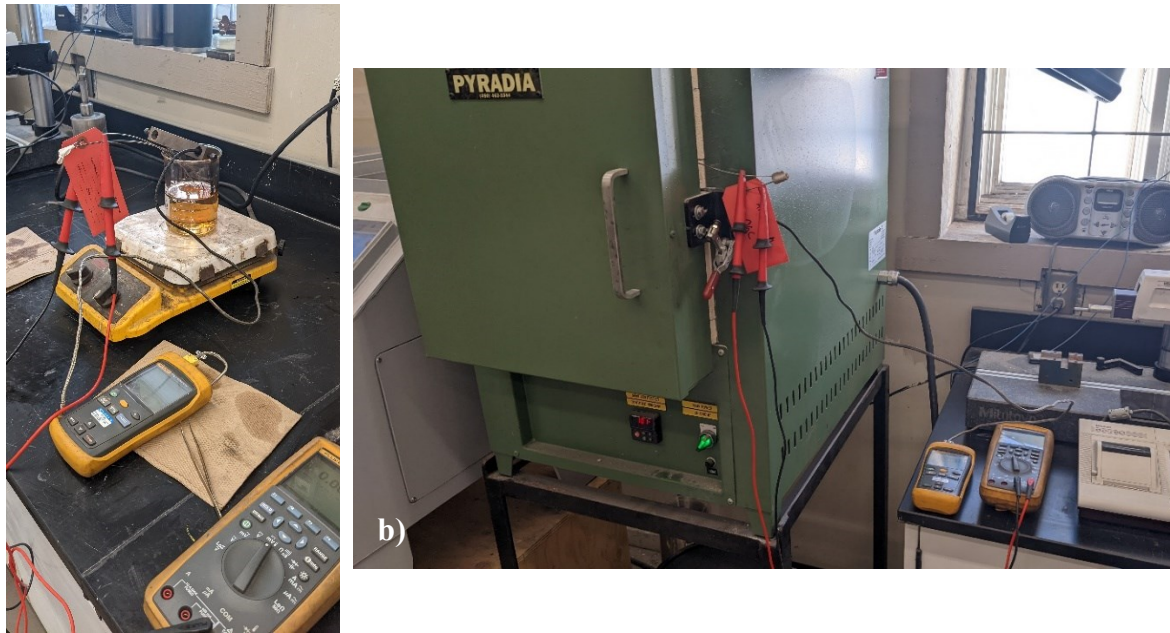
Matériaux	Fil 5	Fil 4	Fil 3	Fil 2	Fil 1
Fil 5					
Fil 4	X				
Fil 3	X	X			
Fil 2	X	X	X		
Fil 1	X	X	X	X	



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2022

Figure 14. Démonstration de combinaisons de matériaux pour l’essai de sélection des meilleurs couplages.

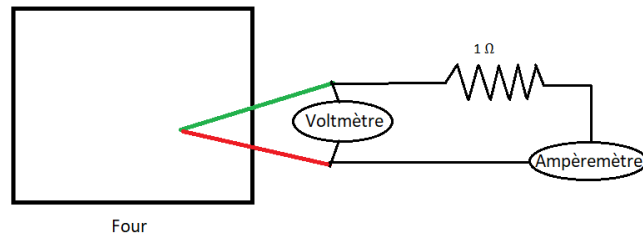
Pour le spectre de températures de 50 à 300 °C, la configuration d’essai a nécessité un bécier avec l’huile et la plaque chauffante. Ainsi, le couple de matériaux soudés a été submergé dans le bécier avec l’huile et la température a été contrôlée par le panneau chauffant. Pour les températures plus élevées que 300 °C, une fournaise de laboratoire a été utilisée. Un thermocouple digital modèle Fluke 51-2 a été utilisé pour garantir que la prise de courant et le voltage soient faits suivant dans les échelles de température prédéfinies. La Figure 15 démontre le schéma utilisé pour l’essai. La prise des résultats de voltage et de courant a été prise à l’aide d’un multimètre modèle Fluke 289.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2022

Figure 15. a) Schéma d'essais jusqu'à 300 °C. b) Schéma d'essais avec des températures plus élevés que 300 °C.

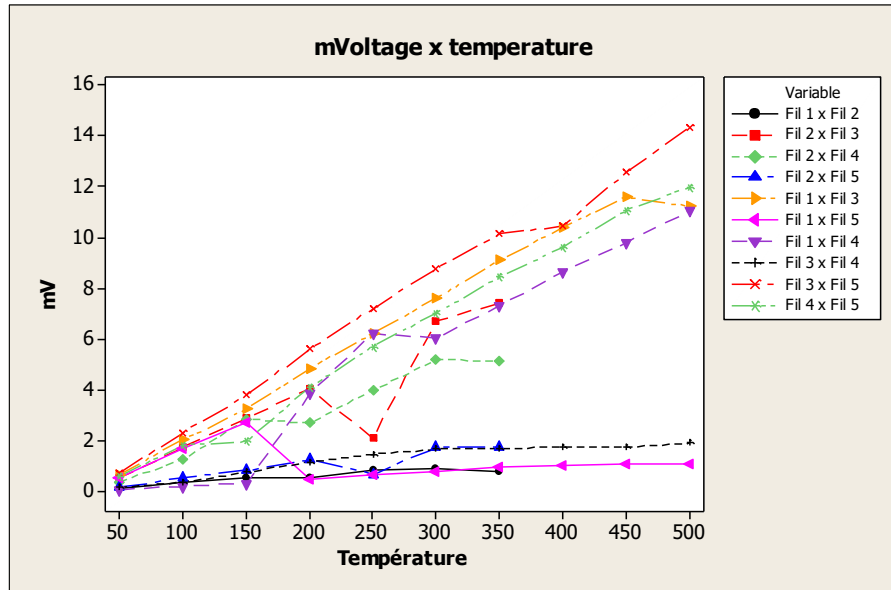
Pour la prise de courant des essais, une résistance externe de 1 ohm a été utilisée. Le schéma présenté à la Figure 16 démontre le circuit reproduit lors de l'essai.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

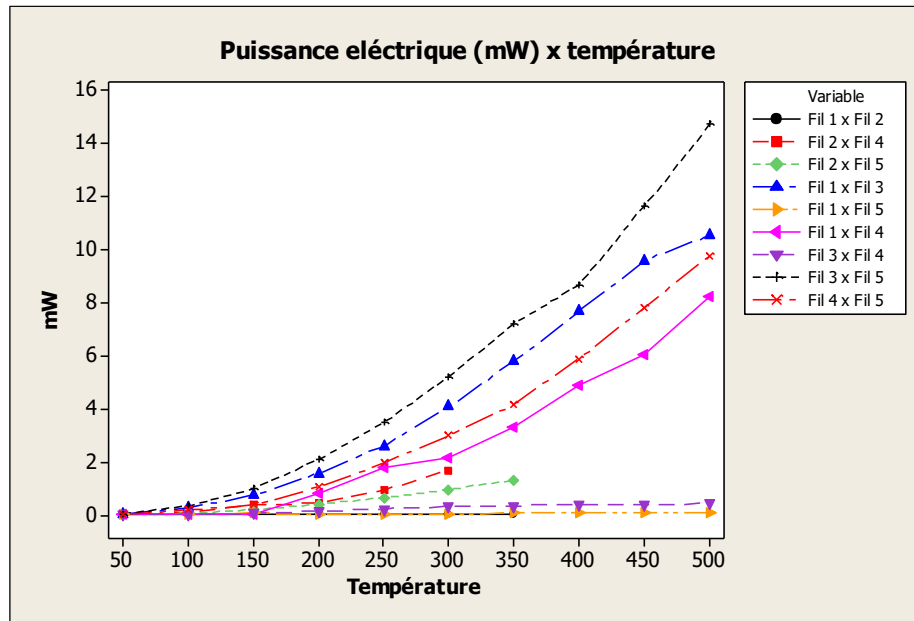
Figure 16. Schéma d'essai pour l'évaluation de courant généré par couplage des matériaux.

Les résultats de voltage et de puissance des connexions des fils sont présentés dans les Figure 17 et Figure 18. Il est à noter que les essais avec le fil de zinc n'ont pas dépassé la température de 350 °C, vu que le point de fusion du fil est de 419,5 °C. Dépasser cette température pourrait donc causer des risques mécaniques pour le fil.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 17. Courbe de tension électrique (mV) par température des combinaisons des fils de *Twin-Arc Spray* pour l'étape 1 des essais.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 18. Courbe de puissance électrique (mW) par température des combinaisons des fils de *Twin-Arc Spray* pour l'étape 1 des essais.

Comme constaté dans les figures, le couple de matériaux ayant eu la meilleure performance de génération d'électricité en termes de voltage et de puissance a été la combinaison des Fil 3 x Fil 5, soit des matériaux à base de NiCrAl et FeCrBSi.

2.2.2 DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE - ÉTAPE 2

Les prochains essais présentés ici ont été faits afin de tester la projection thermique sur une base isolante. Le premier essai a été fait sur une base de bois. Le bois a été brûlé et le revêtement n'a pas collé sur sa surface. Ce résultat s'explique par la concentration ponctuelle d'énergie de la projection thermique sur une surface qui ne disperse pas l'énergie, alors que la projection conventionnelle sur une base métallique disperse la température plus facilement. De ce fait, la température de la projection a été concentrée sur de petites surfaces, réduisant par le fait même la capacité de collage du revêtement sur la surface du matériel de base. Les paramètres de projection de cet essai sont confidentiels pour la compagnie Métal 7 Inc. et sont enregistrés dans le document PDP Thermogénérateur décrit dans la Carte de Travail 28921. La Figure 19 montre les résultats visuels de cet essai.

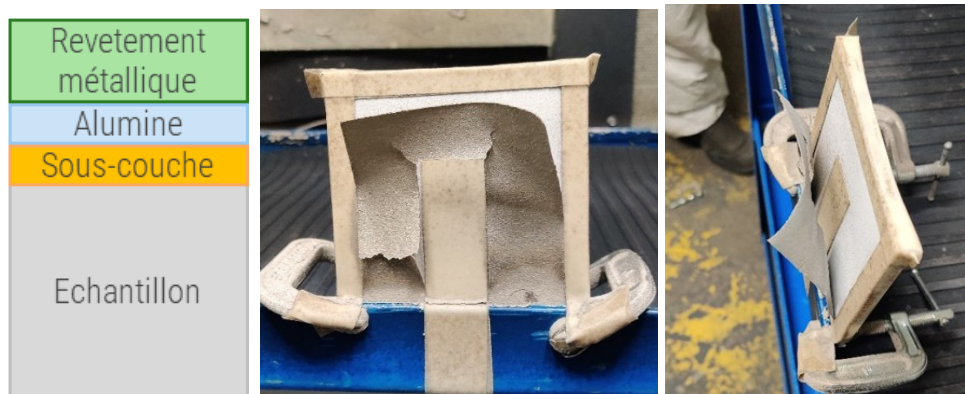


© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 19. Effets de la projection thermique par la technologie *Twin Arc* sur le bois.

Le prochain essai a été effectué afin de créer une sous-couche de revêtement en alumine (Al_2O_3) sous un substrat métallique. Celle-ci devait être utilisée comme isolant avant la couche finale du revêtement. De cette façon, il serait possible d'utiliser une base métallique et de l'isoler à travers la couche isolante. La technologie utilisée lors de l'essai a été la projection via *Twin-Arc*.

Comme on le voit dans la Figure 20, la couche finale n'a pas collé sur la sous-couche en alumine. La sous-couche métallique avait pour seul but d'augmenter l'adhérence de la couche intermédiaire sur le substrat métallique. Le problème présenté ici est peut-être expliqué par la taille des gouttelettes de la couche finale qui ont été projetées sur un substrat isolant, vu que la technologie de projection via *Twin-Arc* nécessite des fils de revêtement métalliques et des températures de fusion moins élevées. Ainsi, les gouttelettes métalliques présentent de plus grands diamètres que d'autres technologies de projection thermique et cela réduit l'efficacité de collage du revêtement sur le substrat. Les paramètres de projection de cet essai sont confidentiels pour la compagnie Métal 7 Inc. et sont enregistrés dans le document PDP Thermogénérateur décrit dans la Carte de Travail 28921.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 20. Effets de la projection thermique par la technologie *Twin-Arc* sur une base métallique.

Vu que la technologie de projection *Twin-Arc* n'est pas capable de créer un système multicouche, le prochain essai a été fait en utilisant la technologie de Projection *Plasma Spray*. Cette technologie permet de créer un effet de collage plus efficace, étant donné que cette technologie utilise des poudres de matériaux de revêtement et des températures de

fusion des particules plus élevées, autour de 3500 °C. La projection est aussi faite à haute vitesse, soit environ 100-350 m/s. Cette combinaison des paramètres facilite le collage du revêtement sur le substrat. Le schéma de projection est le même qui est présenté dans l'essai précédent.

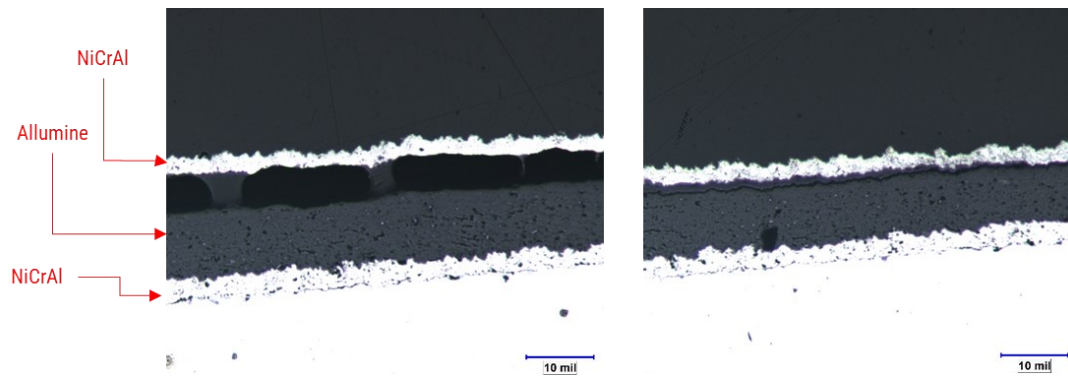
La couche de revêtement finale n'a pas collé sur la sous-couche en alumine. Ce même comportement s'est produit durant les essais avec la technologie *Twin-Arc* (Figure 21). La surface du revêtement générée par la projection d'alumine présente une rugosité très faible, ce qui rend difficile l'adhérence du revêtement métallique sur la couche de revêtement en alumine. Les paramètres de projection de cet essai sont confidentiels pour la compagnie Métal 7 Inc. et sont enregistrés dans le document PDP Thermogénérateur décrit dans la Carte de Travail 28921.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 21. Effets de la projection thermique par la technologie *Plasma Spray* sur une base métallique.

Pour bien visualiser le profil des revêtements, une analyse microscopique a été faite, afin de valider le point de décollage entre les couches de revêtement (Figure 22). Il est possible de vérifier que le revêtement a décollé entre la couche intermédiaire en alumine et la couche finale en NiCrAl. Cela s'explique par la faible rugosité superficielle générée par le revêtement en alumine, ce qui rend difficile l'adhérence de la poudre métallique utilisée pour la couche de finition.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

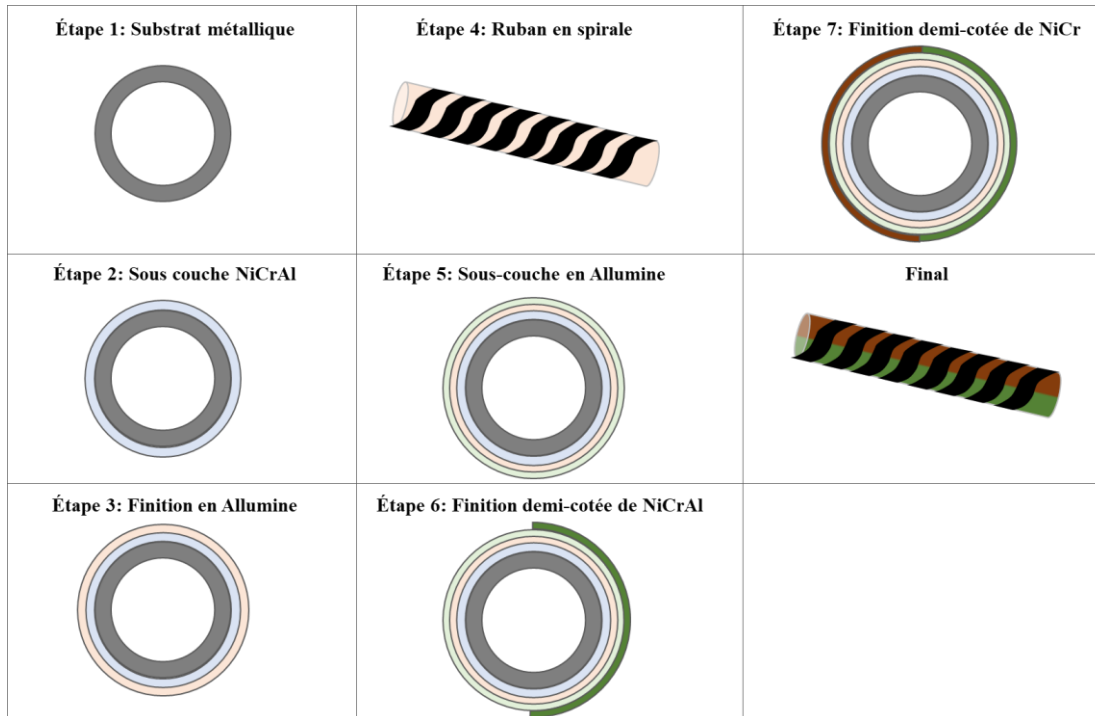
Figure 22. Analyse microscopique de la projection thermique par la technologie *Plasma Spray* sur une base métallique. Amplification : 10 mil (millième de pouce). Microscope : Nikon Ophthipot-100. Logiciel : Clemex Vision.

En dernier recours, le développement du prototype a été réalisé avec un schéma de dépôt de revêtement multicouche sur un tuyau métallique de 25,4 mm (1 pouce). La technologie utilisée pour cette projection est le *Plasma Spray*, en raison des contraintes de la technologie *Twin-Arc*. Le schéma développé est défini ici et représenté à la Figure 23:

- Sous-couche NiCrAl (21 %/7 %/70 %) – Couche de revêtement utilisée pour préparer le substrat métallique pour les prochains revêtements, afin de faciliter l’adhérence des couches de finition.
- Finition en Alumine (99,5 % Al_2O_3) – Couche isolante, vu que le substrat utilisé est métallique, il faut le transformer en isolant. Autrement, il y aurait trop de dissipation de chaleur et de pertes par effet Joule.
- Ruban en spirale – Utilisé pour définir le chemin de transport des électrons de la partie chaude vers la partie froide du prototype.
- Sous-couche en alumine (99,5 % Al_2O_3) et NiAl (95 %/5 %) – Sous-couche nécessaire pour augmenter l’adhérence des deux prochaines couches de finition. Nous avons essayé d’appliquer le revêtement de finition directement sur la couche de Al_2O_3 , sans succès. Cette étape a été ajoutée afin de garantir une bonne adhérence de la finition avec les autres couches de revêtement.
- Finition demi-cotée de NiCrAl (21 %/7 %/70 %) – Revêtement final sur un côté du tuyau, représentant une jambe de la cellule de Peltier. Ce matériau a été sélectionné

pour représenter un matériau moins noble de la série galvanique (anode). Voir la série galvanique dans la Figure 13.

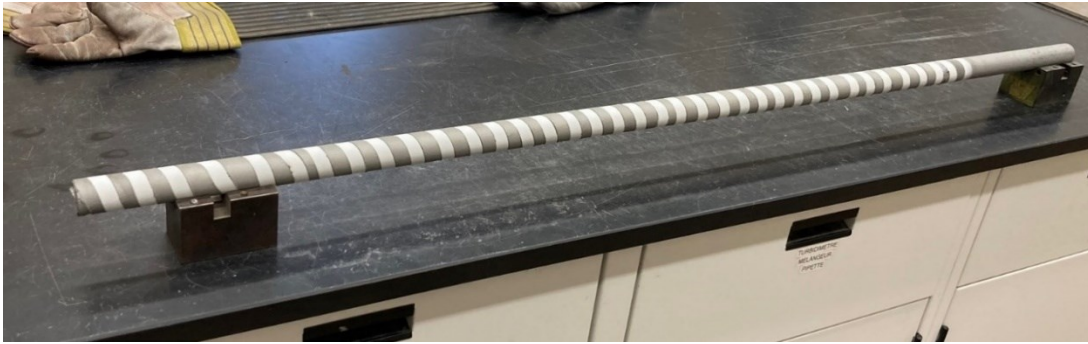
- Finition demi-cotée de NiCr (80/20 %) - Revêtement final sur l'autre côté du tuyau, représentant l'autre jambe de la cellule de Peltier. Ce matériau a été sélectionné pour représenter un matériau plus noble de la série galvanique (cathode). Voir la série galvanique dans la Figure 13.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 23. Étapes de fabrication du prototype avec la projection thermique.

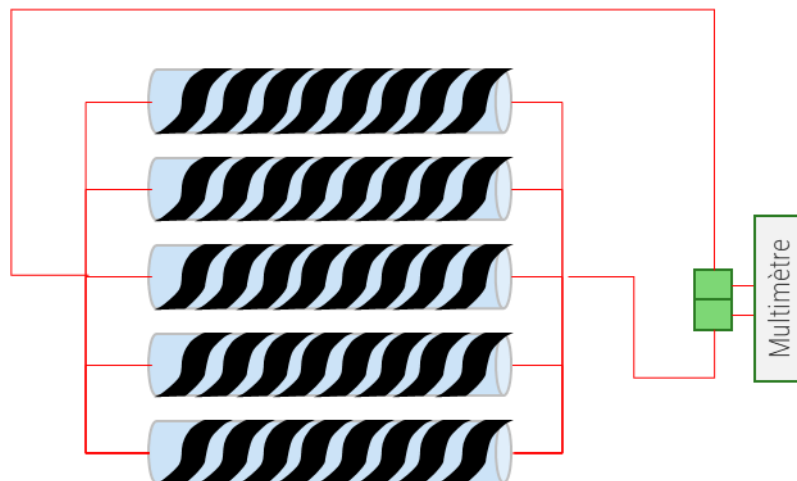
Après ces étapes de fabrication, le prototype a été créé avec une bonne adhérence entre toutes les couches de revêtement. La Figure 24 présente le prototype construit. Le prototype a été coupé en morceaux de 7 à 8 spirales. Les spirales représentent autant les connexions en série du module de Peltier, que les connexions en parallèle, qui sont faites entre les tuyaux.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 24. Prototype fait à partir de la projection thermique.

Le schéma de la Figure 25 représente la configuration finale du prototype pour les essais, avec les connexions en série et en parallèle.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

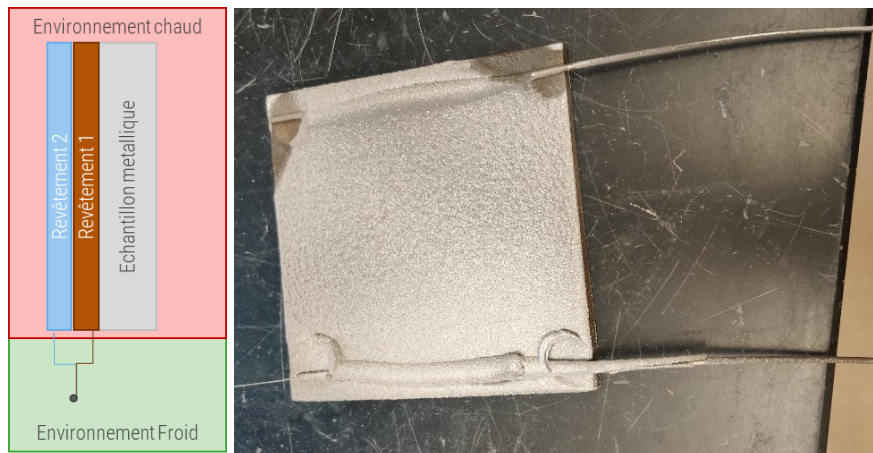
Figure 25. Configuration du prototype par projection thermique pour les essais.

Au final, il n'a pas été possible de générer un gradient de différence de températures pour effectuer les essais dans le spectre de 50 à 275 °C. Le problème est discuté dans la section 2.3.

2.2.3 DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE - ÉTAPE 3

L'essai subséquent a été effectué afin d'évaluer si les surfaces métalliques, beaucoup plus grandes que les surfaces de câbles, étaient en mesure de générer une quantité plus élevée d'électricité (Figure 26). Pour ce faire, nous avons utilisé une surface de 250 cm² comportant

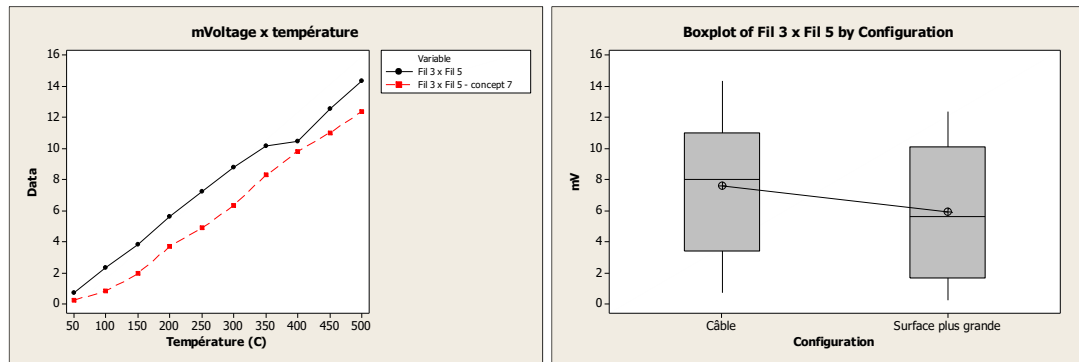
les mêmes revêtements représentés par les fils 3 x 5 de la technologie *Twin-Arc*, lesquels ont obtenu une meilleure performance que les autres couples essayés.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 26. Schéma d'essai et photo de l'utilisation d'une plus grande surface de projection de 250 cm².

Les résultats comparatifs sont présentés dans la Figure 27, ainsi qu'une ANOVA à facteurs fixes, soit la surface de connexion et les gradients de température. On remarque les mêmes niveaux de génération d'électricité, en mV, en la comparant à une seule connexion de 2 câbles. Les 2 prototypes ne présentent pas de différence significative ($p = 0,412$). Ainsi, il est possible de conclure que la surface de connexion ne génère pas plus d'électricité. La génération d'électricité par l'effet Seebeck est propulsée plutôt pour la quantité de connexions du module. Les paramètres de projection de cet essai sont confidentiels pour la compagnie Métal 7 Inc. et sont enregistrés dans le document PDP Thermogénérateur décrit dans la Carte de Travail 28921.



One-way ANOVA: Fil 3 x Fil 5 versus Configuration

Source	DF	SS	MS	F	P
Configuration	1	13,7	13,7	0,70	0,412
Error	18	350,1	19,5		
Total	19	363,9			

S = 4,410 R-Sq = 3,77% R-Sq(adj) = 0,00%

© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 27. Performance de génération d'électricité de la combinaison des Fil 3 x Fil 5 par rapport au concept d'utilisation d'une plus grande surface (utilisation des mêmes matériaux).

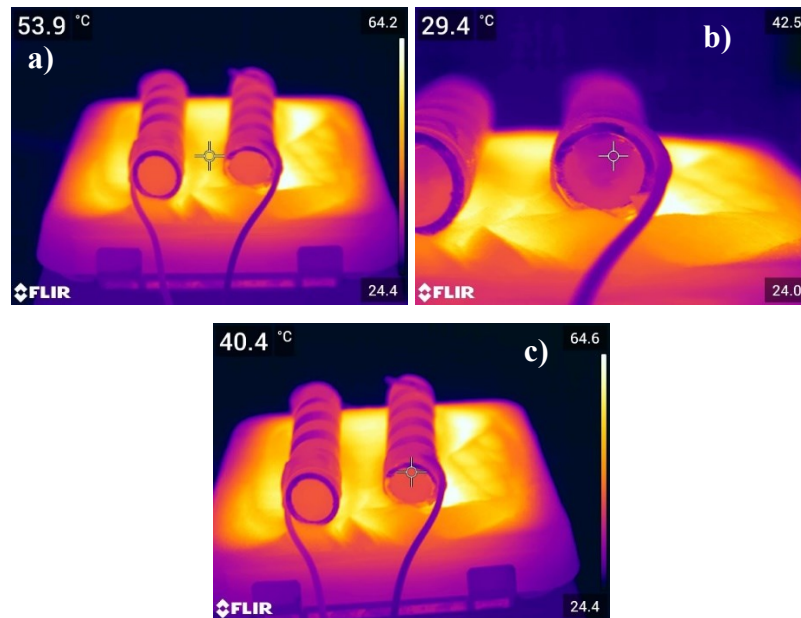
2.3 RÉSULTATS ET DISCUSSION : ESSAIS DU PROTOTYPE

Les essais faits avec le prototype développé à l'étape 2 ont débuté avec deux tuyaux de 25,4 mm (1 pouce) connectés en parallèle disposés sur le panneau chauffant. Ceux-ci étaient ensuite exposés à différentes températures de travail. Afin de permettre une bonne dispersion de la chaleur sur la surface du prototype, le sable était déposé sur la surface du panneau chauffant.

Dû au substrat métallique du tuyau, le transport de chaleur entre la partie chaude et la partie froide du prototype s'est fait, en dépit de la couche de revêtement isolante. Ainsi, la différence de température minimale requise pour le fonctionnement du concept n'a pas été acquise.

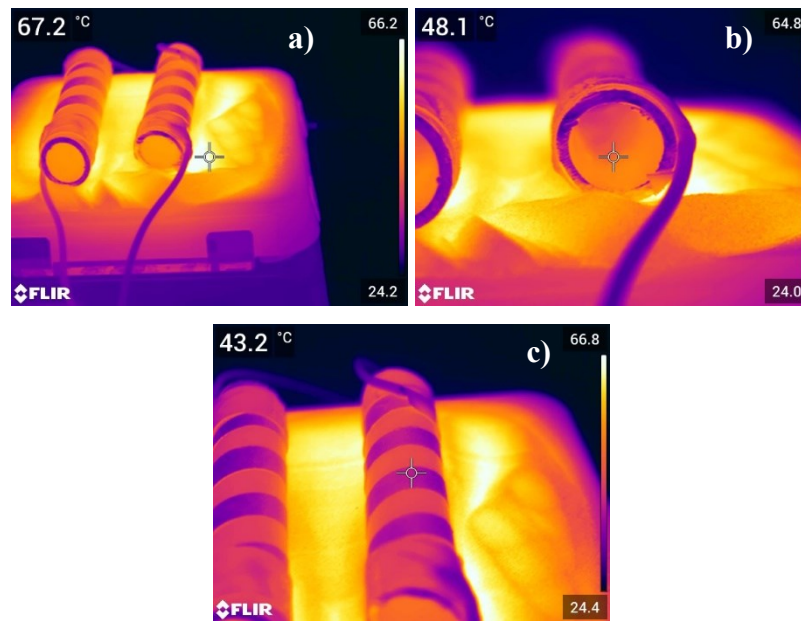
Les Figure 28 et Figure 29 ont été prises avec une caméra thermique afin d'identifier les différences de températures sur la surface du panneau chauffant, à l'intérieur du tube et sur la surface froide du tuyau. Il est possible de noter que la différence de températures entre

la partie chaude du prototype et la partie froide est très faible, maximum de 10 °C, pour permettre la génération d'électricité par l'effet Seebeck.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 28. Température du a) panneau chauffant + sable, b) Intérieur du tuyau, c) surface froide du tuyau. Essais à température de 50 °C.

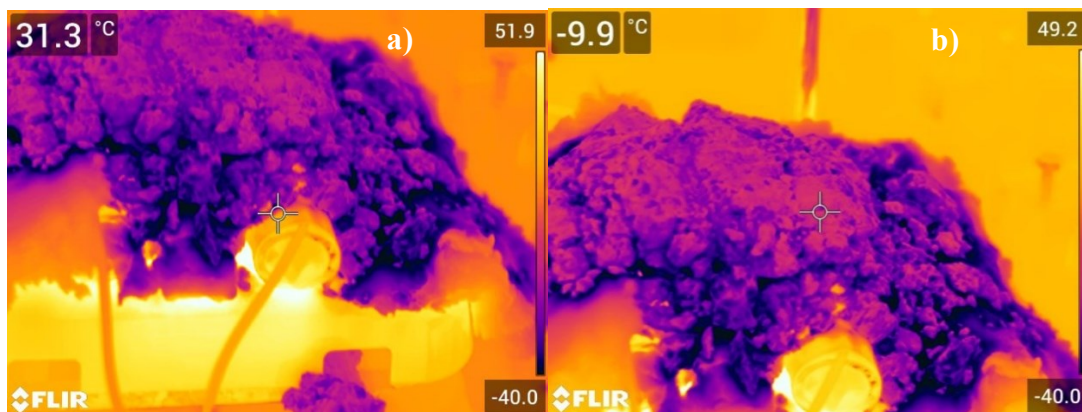


© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 29. Température du a) panneau chauffant + sable, b) Intérieur du tuyau, c) surface froide du tuyau. Essais à température de 70 °C.

Ensuite, afin de garantir une plus grosse différence de température entre la partie chaude et la partie froide du prototype, la glace carbonique a été ajoutée à l'intérieur et à l'extérieur du tuyau pour créer une couche isolante et empêcher le passage de chaleur du panneau chauffant vers la partie froide du prototype. Cette fois, une différence de température plus notable a été obtenue, soit d'environ 40 °C. Voir Figure 30 à cet effet. Cependant, le prototype n'a pas été en mesure de générer de l'électricité à partir de l'effet Seebeck. De ce fait, les hypothèses suivantes sont possibles :

1. La différence de température atteinte s'égalise rapidement (transfert de chaleur important et rapide), en raison du matériau du tuyau utilisé et de sa base métallique. Voir prochains essais et résultats.
2. L'épaisseur du revêtement est très mince et n'est pas suffisante pour garantir le transport d'électrons sur toute la longueur de la spirale. Voir Figure 32 et conclusions.
3. Les porosités présentes dans les revêtements ont rompu le chemin de transport des électrons. Il ne suffit que d'une seule porosité traversant l'épaisseur du revêtement pour bloquer le transport d'électrons (c'est comme un fil électrique brisé). Les revêtements générés par projection thermique présentent un certain niveau de porosité, comme démontré dans le chapitre 1.4. Voir Figure 32 et conclusions.

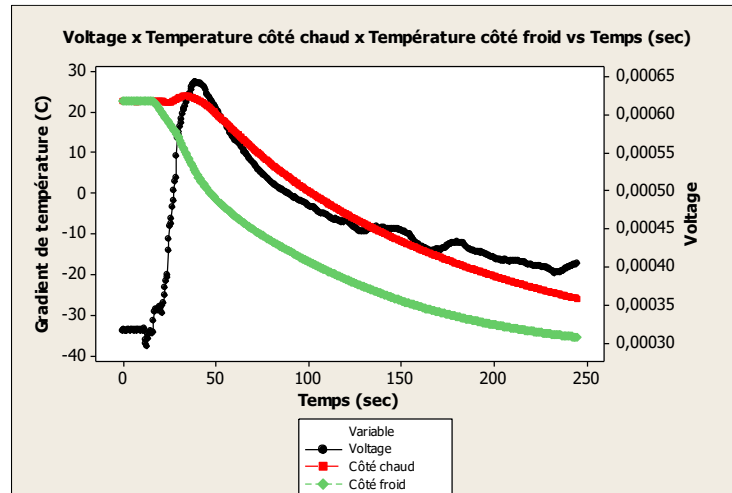


© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 30. Température de a) la partie externe du tube avec la glace carbonique, b) la glace carbonique. Température de 50 °C.

Pour tester l'hypothèse 1, des essais ont été réalisés avec une chambre instrumentée. Les mesures prises lors de l'essai sont : les températures internes et externes du tuyau et le

voltage généré par le prototype. Les prises d'informations sont faites automatiquement à chaque 0,5 seconde (Figure 31).



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

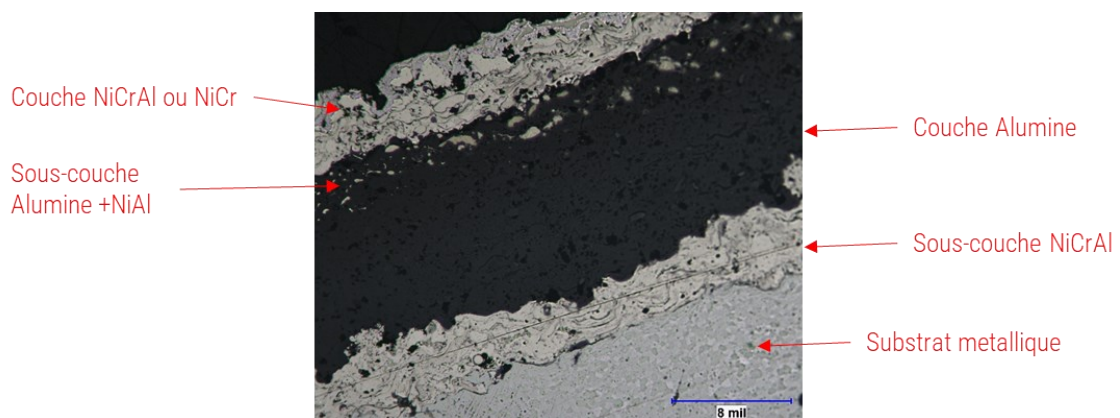
Figure 31. Essais avec une chambre instrumentée. Tension (voltage) générée par seconde, prototype utilisant la projection thermique.

On conclut que le substrat métallique utilisé dans la production du prototype, même avec une couche de revêtement isolante, permet un transfert de chaleur très rapide entre la surface chaude connectée à l'environnement et celle qui est froide. Cela réduit la génération d'électricité par effet Seebeck et empêche la prise de données lors d'essais avec le panneau chauffant dû à la lenteur du processus. Cependant, les essais avec la chambre instrumentée ont permis d'évaluer le potentiel du prototype en termes de génération d'électricité à une différence d'environ 20 °C, variant entre 0,35 et 0,6 mV.

Dans une situation hypothétique où le prototype est capable de garder la différence de température, via l'utilisation d'un substrat isolant par exemple, on estime que le potentiel de génération serait de 2,18 à 3,75 mV par tube pour une différence de températures de 125 °C. Considérant que le tube en essai comporte 6 paires de connexions au total. Chaque paire de connexions est capable de générer de 0,36 mV à 0,62 mV à une différence de température de 125 °C.

Afin d'évaluer les hypothèses 2 et 3, une analyse microscopique a été réalisée avec une coupe transversale du tuyau. De cette façon, il est possible de voir le niveau de porosité ainsi que l'épaisseur du revêtement.

La Figure 32 démontre les différentes couches de la projection thermique projetées sur le substrat métallique du tuyau. On remarque un grand niveau de porosité sur la couche de finition, soit les couches de NiCrAl ou de NiCr, responsables de la génération d'électricité. Pareillement, la couche de finition n'est pas si épaisse, faisant en sorte qu'il y a la possibilité d'avoir un mélange de porosité et d'épaisseur mince à certains endroits du prototype, ce qui peut interrompre le passage d'électrons dans le chemin des connexions en série. L'épaisseur de la couche de finition est d'environ 4 à 5 mil (millième de pouce). Cependant, comme l'hypothèse 1 est confirmée, en autres mots une courant électrique est créé momentanément, ensuite les hypothèses 2 et 3 sont écartées.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2022

Figure 32. Analyse microscopique de la projection thermique des couches du prototype en tube. Amplification : 8 mil (millième de pouce). Microscope : Nikon Ophipot-100.

Logiciel : Clemex Vision.

Une nouvelle projection a été réalisée, cette fois-ci en utilisant un tube de 76,2 mm (3 pouces) au lieu de 25,4 mm (1 pouce), dans le but d'obtenir une différence de températures plus considérable. Aussi, la nouvelle projection devait créer une couche de finition plus dense (avec moins de porosité) et plus épaisse, afin de garantir que le niveau de porosité et l'épaisseur du revêtement n'impactent pas négativement le transport des électrons.

La Figure 33 démontre la projection sur le tube de 3 pouces avec une couche de finition plus épaisse. On voit que la couche de finition n'a pas adhéré sur la sous-couche d'Alumine + NiAl. Cela est expliqué par le fait que la charge thermique sur la sous-couche est trop élevée. La sous-couche n'est pas capable de disperser la charge thermique et de permettre une liaison microstructurale entre la couche de finition et la sous-couche. Voilà pourquoi il n'a pas été possible de produire le nouveau prototype.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2022

Figure 33. Projection thermique par *Plasma Spray* avec couche de finition plus épaisse.

En raison de l'impossibilité de produire un prototype fonctionnel du concept en utilisant la projection thermique, les résultats de ce concept ne seront pas utilisés pour les calculs de bénéfices dans le chapitre 4. Néanmoins, des pistes d'amélioration du prototype sont présentées à la section 4.

3. CONCEPT DE THERMOPILE POUR LA RÉCUPÉRATION DE CHALEUR : MATÉRIEL, MÉTHODES, RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1.1 SITE D'ÉTUDE

La fabrication du prototype et les essais en laboratoire sont réalisés à la compagnie Métal 7 Inc., à Sept-Îles (décrit à la section 2.1.1).

3.1.2 MATÉRIEL

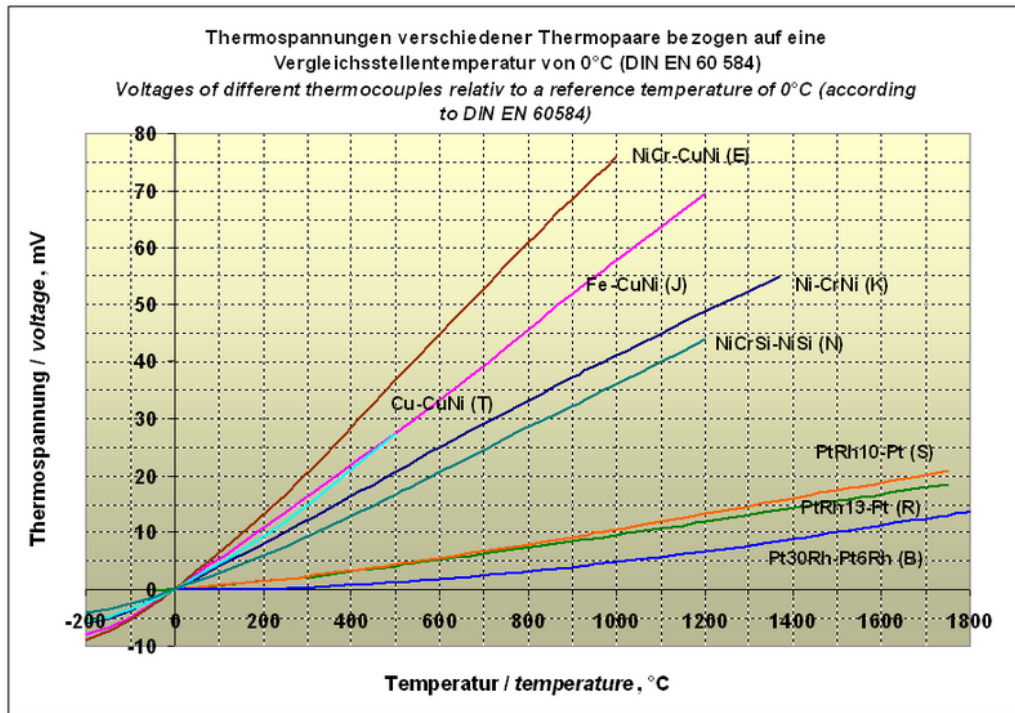
Pour la fabrication du prototype, les matériaux suivants ont été utilisés:

- Câble de thermocouple type E.
 - Marque : Omega
 - Modèle : Duplex Insulated CHROMEGA™-Constantan Duplex ANSI Type E
 - Numéro du modèle : GG-E-30 (insulé avec fibre de verre)
 - Température maximale de travail : 320 °C
- Férule mécanique des fils 20 AWG (0,50 mm²) et outil pour les connecter (*Wire Rope Crimping Tool*).
- Pâte thermique.
- Plaque chauffante agitatrice Cimarec™ Basic Stirring Hotplates.
- Multimètre modèle Fluke 289 pour les mesures de voltage.
- Thermomètre/thermocouple digital modèle Fluke 1587 FC pour les mesures de température.

3.1.3 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le concept est basé sur un assemblage multiple de fils de thermocouples, aussi connu sous le nom de thermopile. Celui-ci pourrait être installé à l'intérieur des blocs réfractaires de la fournaise de durcissement de boulettes de minerai de fer et/ou dans les briques utilisées dans les cheminées des fours afin de valoriser la chaleur envoyée dans l'atmosphère.

Parmi les thermocouples disponibles commercialement, le thermocouple de type E est celui qui génère le plus d'électricité pour une différence de température équivalente (Cambridge 2009). C'est donc lui qui sera utilisé pour le développement du prototype et les essais (Figure 34).



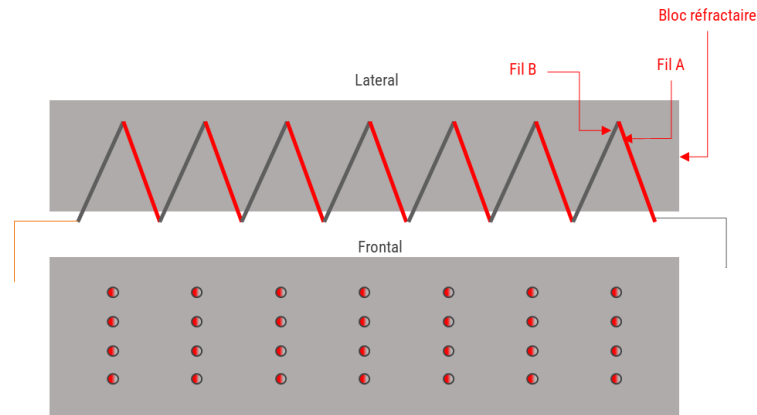
CC-BY-SA-3.0,2.5,2.0,1.0

Figure 34. Tension de différents thermocouples par rapport à une température de référence de 0 °C selon DIN EN 60 584 (Cambridge 2009). Photo : (Wikipedia 2023).

Le concept se résume à un couplage en série et en parallèle des câbles de thermocouple mis en contact avec la source de chaleur et avec une source de chaleur moins élevée. Cela vise à créer un différentiel de température qui produira du courant et de la puissance électrique, par effet Seebeck. La brique est utilisée comme isolant thermique entre la connexion de la partie chaude et la connexion de la partie froide.

Le concept est intéressant en termes d'application industrielle. En effet, les thermogénérateurs existants ne sont pas utiles dans un four ou dans des surfaces à hautes températures, en raison de leur faible résistance thermique. De plus, leur configuration ne permet pas d'utilisation qui soit en contact direct avec la source de chaleur, dû à leur faible

épaisseur, qui ne permet pas de séparation et d'isolation de connexions entre les parties chaude et froide. Le concept est présenté dans la Figure 35 où un milieu isolant est utilisé afin de séparer les fils des surfaces chaude et froide. Cela est fait pour obtenir un delta de température plus élevé et ainsi permettre une génération d'électricité plus élevée. Le développement du dispositif expérimental est détaillé dans la section 3.2.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 35. Développement du prototype basé sur les fils de thermocouples.

3.1.4 MESURES DES VARIABLES DE PERFORMANCE DU THERMOGÉNÉRATEUR

La collecte des données a été faite afin d'évaluer l'énergie capturée, par la tension (Volt - V), le courant électrique (Ampère - A) et la puissance (Watt - W), selon les variations de température.

Le chauffage du thermogénérateur a été fait par une plaque chauffante agitatrice Cimarec™ Basic Stirring Hotplates, permettant une variation contrôlée de la température entre 100 °C et 600 °C.

Les mesures de tension électrique (voltage) sont faites avec un multimètre modèle Fluke 289. Les mesures de température de la plaque chauffante et de l'environnement ont été réalisées par un thermomètre/thermocouple digital modèle Fluke 1587 FC.

Omega (2021) explique comment on peut mesurer la génération d'électricité par la température en utilisant différents thermocouples et en comparant la performance des thermocouples utilisés commercialement.

3.1.5 PLAN DE TRAVAIL ET DÉVELOPPEMENT DU PROTOTYPE

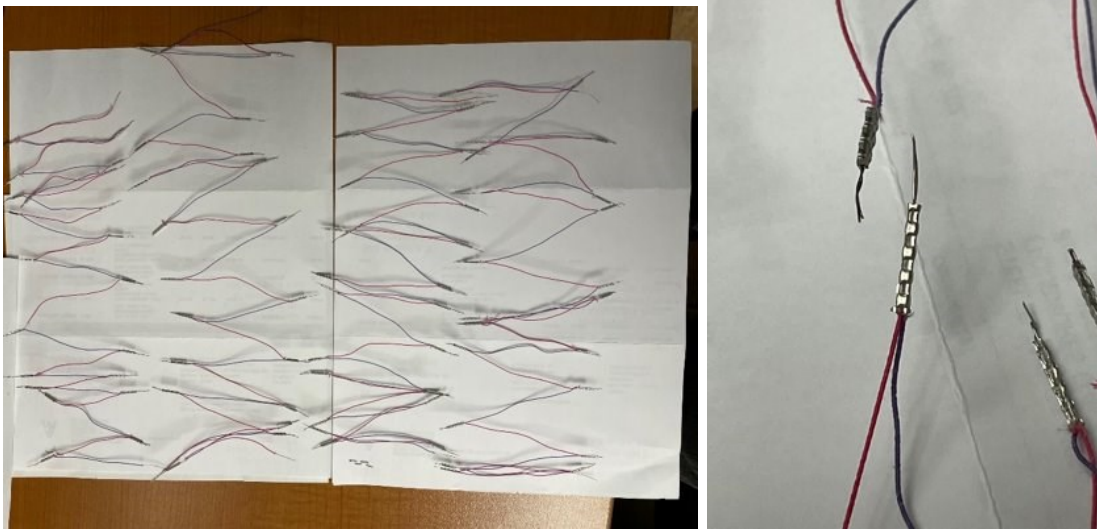
Les essais sont définis dans le but de créer d'abord le prototype et ensuite de réaliser les essais en laboratoire.

Les essais sont divisés de la façon suivante :

- Couper les fils de thermocouple en 10 cm de longueur chaque.
- Séparer les deux fils de thermocouples et les décaper.
- Assembler les fils de façon à créer des rangées de 10 connexions en série (format thermopile classique).
- Préparer la plaque chauffante, les thermocouples et multimètres pour les essais.
- Assembler le prototype et réaliser les essais :
 - 6 essais avec des connexions en série soumis à 9 températures différentes (entre 75 et 275 °C, avec une échelle de 25 °C) en 3 répliques. Le total : 180 résultats. La limitation de quantité d'essais vient de la surface de la plaque chauffante, ce qui empêche l'utilisation de plus de 6 rangées de 10 connexions de fil.
 - 6 essais en utilisant des résistances externes (22, 33, 47, 120, 150 et 300 Ω) avec 6 rangées de 10 connexions de fils en série contre 9 températures (50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225 et 250 °C), afin d'évaluer la résistance interne des connexions. Le total : 54 résultats.

Les fils ont été découpés et connectés selon le schéma présenté dans la Figure 35. La connexion entre les fils a été faite grâce à une fêrule pressionnée contre les fils. La Figure 36 présente l'assemblage des câbles de thermocouple de type E et la connexion des câbles par la fêrule mécanique pressionnée.

Les câbles de thermocouple de type E sont constitués d'un fil de nickel-chrome et d'un fil de constantan, s'agissant d'un matériau composé de cuivre, nickel, manganèse et fer. Pour les essais, les fils ont été placés en format accordéon.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2022

Figure 36. Assemblage des câbles du prototype basé sur le concept de thermopile.

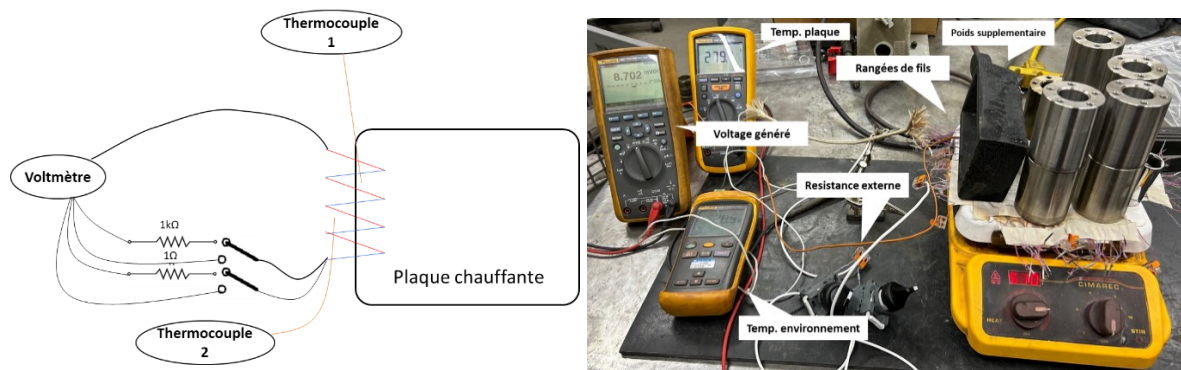
La Figure 37 démontre l'assemblage pour les essais de validation du concept basé sur les fils de thermocouples. Le prototype a été placé sur un panneau chauffant. Différentes configurations de connexions en parallèle et en série ont été faites, afin de comprendre l'impact de chaque type de configuration et aussi de générer des données pour l'analyse statistique pour la validation du concept.

Les essais ont été faits avec la configuration suivante :

- Essais avec connexions en série : de 1 branche de connexion à 10 connexions en série jusqu'à 6 branches (Figure 37).
- Prise de données avec un circuit sans résistance électrique et avec une résistance électrique de $1\text{ K}\Omega$ et 1Ω .
- Le gradient des températures d'essai a varié de $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $275\text{ }^{\circ}\text{C}$ et était contrôlé par le panneau chauffant. La température de la partie froide du prototype a été toujours la température ambiante. La prise de température a été réalisée par des thermocouples

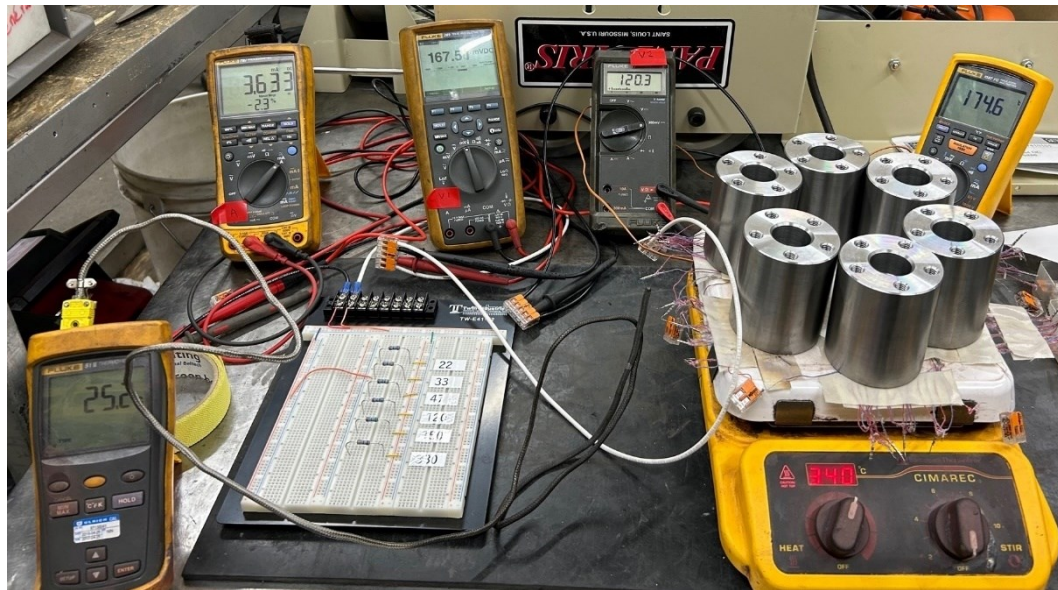
attachés au panneau chauffant et proches des connexions de la partie froide (température ambiante).

- Essai pour estimer la résistance interne des connexions. Pour cet essai, la configuration à 6 spectres de connexion en série et différentes résistances externes ont été utilisées (22, 33, 47, 120, 150 et 330 Ω). La prise de données a été réalisée pour les températures de 50 °C à 275 °C et les valeurs de courant électrique du circuit. La tension du circuit et la tension autour de la résistance externe ont été évaluées (Figure 38).



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 37. Essais avec le prototype basé sur le concept de thermopile.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 38. Essais pour l'évaluation de la résistance interne du circuit.

3.1.6 ANALYSES STATISTIQUES

Les analyses statistiques utilisées dans cette étude visent à évaluer les données recueillies lors des essais à l'échelle du laboratoire, par le biais d'analyses de régression linéaire entre les résultats de tension (V) des essais, comparé aux résultats de la littérature (thermocouple de type E), entre la tension (V) générée et la température (°C) pour chaque type de connexion essayé. L'analyse de régression linéaire est utilisée pour estimer le potentiel de génération d'électricité à des températures plus élevés qu'à l'échelle des essais, ainsi que pour évaluer la résistance interne du circuit. Des calculs électriques ont été utilisés afin de définir la résistance interne de chaque connexion du circuit à différents gradients de température et la quantité de connexions. Des analyses graphiques (courbes 2D et 3D) et des boîtes à moustaches seront utilisées de façon supplémentaire lors de l'analyse statistique.

3.2 RÉSULTATS ET DISCUSSION : ESSAIS DU PROTOTYPE

Les résultats des essais sont présentés dans ce chapitre. Le plus grand delta de température entre la partie chaude et la partie froide a permis de générer plus d'électricité, comme prévu dans la revue de littérature sur les thermogénérateurs (section 1.3). La génération de voltage (tension) est directement proportionnelle à la quantité de connexions en série, tout comme le courant (ampérage) augmente selon la quantité de connexions en parallèle (Muthukrishnan 2021). Les résultats des essais sont présentés dans la Figure 39 et ressemblent à la courbe de génération de voltage du thermocouple de type E retrouvé dans la littérature (Cambridge 2009).

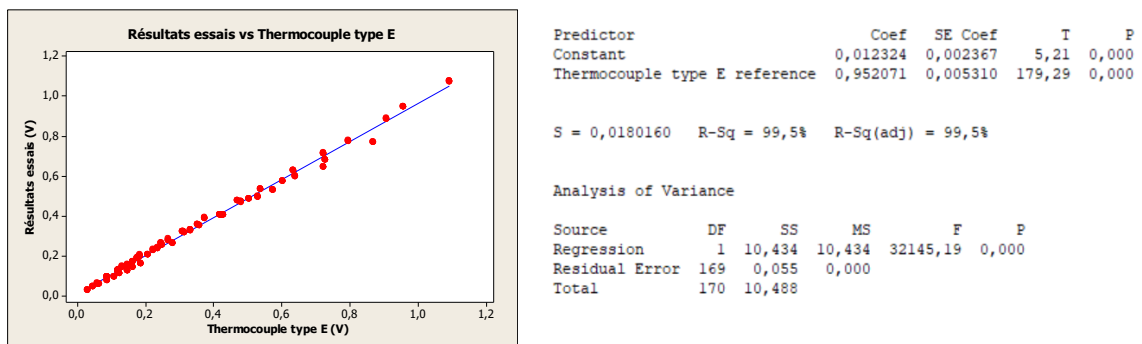
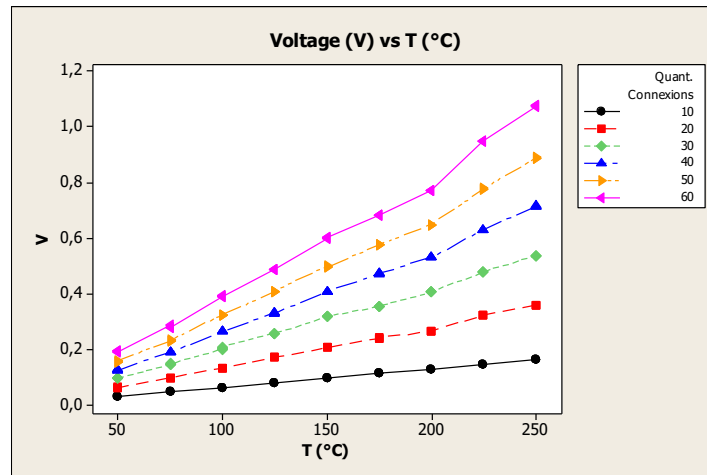


Figure 39. Analyse de régression des résultats de tension (voltage) d'essais comparée à la courbe de voltage du thermocouple de type E selon la littérature.

La Figure 40 montre l'impact de la quantité de connexions en série sur la génération de tension (voltage) du prototype essayé. Les résultats ont été obtenus avec un circuit sans résistance externe, afin de les comparer avec la courbe de génération de voltage du thermocouple de type E décrite dans la littérature (Cambridge 2009).



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

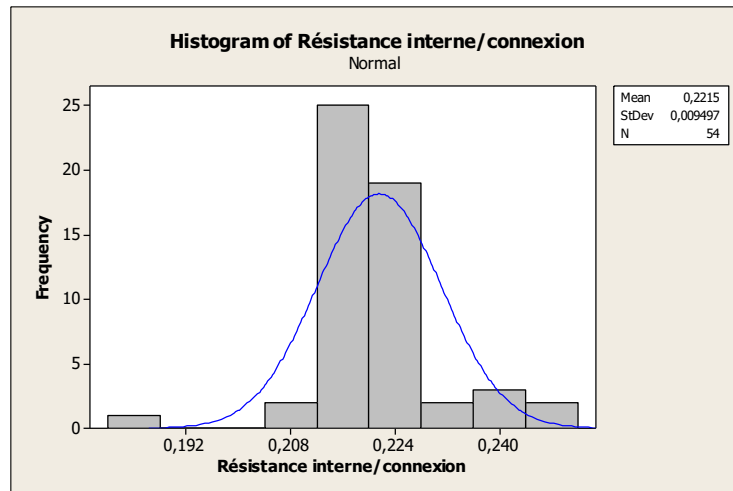
Figure 40. Impact de la quantité de connexions en série sur le voltage généré en fonction de la différence de températures.

Les calculs de résistance interne du circuit ont été réalisés en utilisant les valeurs de tension (voltage) du multimètre connecté au circuit (sans résistance), moins les valeurs de tension (voltage) du multimètre connecté au circuit (avec une résistance de 1 Ω et de 1 $K\Omega$), divisé par le courant électrique :

$$\text{Résistance interne} = \frac{U_1 - U_2}{i} \quad \text{Équation 16}$$

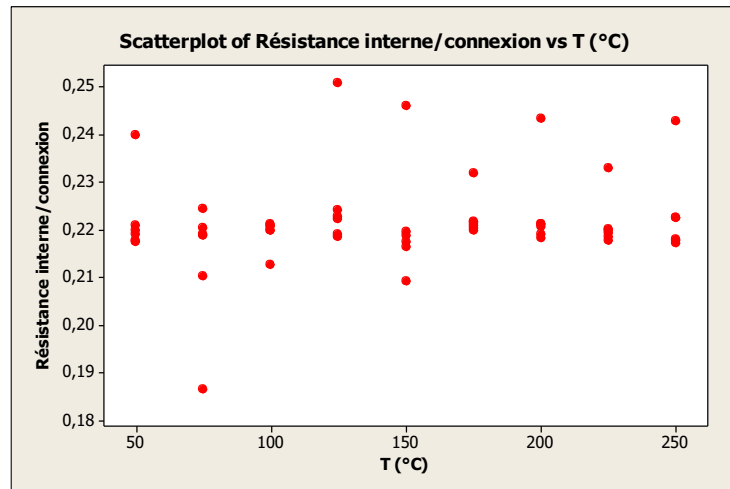
Où la Résistance interne en Ohm (Ω), U_1 = tension (V) du circuit sans résistance externe, U_2 = tension (V) du circuit avec résistance externe et i = courant électrique (A).

Les résultats obtenus nous ont permis de faire une analyse de la résistance interne du circuit par connexion. La résistance interne du système est de 0,22 Ω /connexion avec un écart type de +/- 4,28 % de cette valeur (Figure 41). On voit que la température de travail n'impacte pas la résistance interne du système (Figure 42).



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 41. Histogramme de la résistance interne du circuit par la quantité de connexions.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 42. Graphique de dispersion de la résistance interne du circuit/quantité de connexions par gradient de température.

La résistance équivalente du système, s'agissant de la résistance de toutes les connexions des fils, a été évaluée par calcul, en utilisant les équations suivantes.

- Résistance équivalente (R_{eq}) de circuits en série :

$$R_{eq} = R1 + R2 + R3 + \dots + Rn \quad \text{Équation 17}$$

- Résistance équivalente de circuits en parallèle :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \dots + \frac{1}{Rn} \quad \text{Équation 18}$$

La résistance interne de chaque connexion a été évaluée selon l'équation suivante, considérant la résistance externe de 1Ω utilisée pour la prise de données.

$$R = \frac{U}{i} - 1 \quad \text{Équation 19}$$

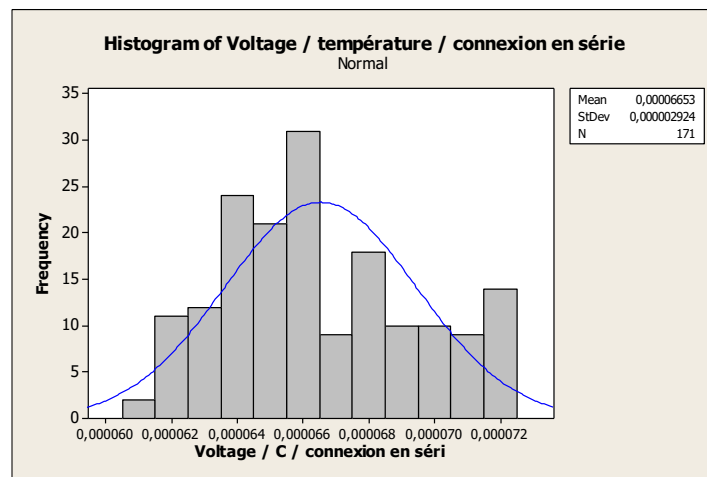
Où R = résistance électrique (Ohm), U = tension (V) et i = courant électrique (A).

La puissance électrique (P) du circuit a été calculée par l'équation suivante :

$$P = U \times i \quad \text{Équation 20}$$

Où P = puissance électrique (Watts – W), U = tension (V) et i = courant électrique (A).

Le calcul de tension (voltage) a été fait en utilisant la relation de génération de tension par le gradient de température et la quantité de connexions. La génération de tension (voltage) est en moyenne de $0,0000665 \text{ V}/^\circ\text{C}/\text{quantité de connexions}$ et l'écart type est de $\pm 0,000002924$, ce qui représente $\pm 4,39 \%$ du résultat (Figure 43).



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 43. Histogramme de tension (voltage) par température par quantité de connexions en série.

Considérant un prototype de 20 cm x 30 cm (largeur x longueur) et une connexion électrique à chaque 1 cm, on obtient environ 0,92 connexions par m². Les calculs sont faits pour cette configuration afin de transposer les résultats pour une utilisation industrielle (section 4.1). En termes de faisabilité industrielle, l'auteur a émis l'hypothèse que le prototype pourrait être intégré au sein de briques réfractaires pour faciliter son installation dans le four et dans les cheminées de l'usine.

La configuration de connexions en série et en parallèle impacte faiblement la génération de puissance électrique du produit, en Watts. Ainsi, la définition du circuit (quantité de connexions en série et en parallèle) dépendra de la nécessité de l'application, soit un voltage ou un ampérage plus grand.

Une comparaison intéressante est faite entre la performance du projet et la performance des modules de Peltier les plus performants par surface carrée et par nombre de thermocouples. Le Tableau 7 résume la performance de 2 types de modules de Peltier, en comparaison avec la performance du produit développé dans le cadre de ce projet.

Tableau 7. Performance du projet en comparaison avec le module de Peltier très performant.

Paramètres	Thermogénérateur performant	Thermogénérateur très performant	Projet
Modèle	HZ-20HV – Hi-Z Technology, Inc.	1500 Thermoelectric Generator – Global Power Technologies	NA
Dimensions	75 x 75 x 5 mm	1549 x 1549 x 1016 mm	200 x 300 x 100 mm
Quantité de thermocouples	75	Non indiqué	550
Puissance électrique à $\Delta T=100^{\circ}\text{C}$ (W)	5W	500W	0,152W
Maximum de tension (V)	10,8V (pour $\Delta T=200^{\circ}\text{C}$)	24V	7,4V (pour $\Delta T=200^{\circ}\text{C}$)
Puissance électrique/surface	888,88 W/m²	229,22 W/m²	2,53 W/m²
Références	(Riffat et Ma 2003)		Présente étude

Malgré la faisabilité d'ingénierie du projet, on conclut que le prototype utilisant le concept de thermopile classique n'est pas capable de générer assez d'électricité pour une valorisation

à l'échelle industrielle, comparativement à d'autres technologies de thermogénérateurs disponibles actuellement, soit celles qui utilisent des matériaux semi-conducteurs dans leur conception. Néanmoins, des pistes d'amélioration du prototype sont présentées à la section 4.

4. DISCUSSION SUR LES IMPACTS DU PROJET SUR L'OPÉRATIONNALISATION DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Le présent travail avait l'objectif de prouver la faisabilité du développement d'un prototype de thermogénérateur inspiré de l'effet Seebeck. Celui-ci devait être utilisé dans des processus industriels, notamment des usines de bouletage de minerai de fer, pour valoriser la chaleur perdue dans les fours à hautes températures. Deux prototypes ont été développés et présentés dans les chapitres 2 et 3. Un prototype basé sur la projection thermique et un autre basé sur le concept de thermopile classique.

Les calculs des bénéfices environnementaux et économiques de l'utilisation des prototypes sont présentés pour répondre aux cibles définies par les 17 ODD du Programme 2030 des Nations Unies.

Comme le prototype utilisant la projection thermique comme processus de fabrication n'a pas généré de résultats quantifiables pour une analyse plus approfondie, la discussion présentée dans ce chapitre portera sur le prototype qui utilise le concept de thermopile classique.

Avant de détailler les résultats, voici un résumé des points d'amélioration des prototypes décrits dans les chapitres 2 et 3.

- Prototype utilisant la projection thermique :
 - Développer un substrat isolant permettant l'utilisation de la projection thermique sans impacter l'adhérence du revêtement. L'utilisation d'un substrat métallique favorise un transfert de chaleur très rapide entre la partie en connexion avec la chaleur vers la surface froide, réduisant ainsi la différence de température entre les deux surfaces. Cela a un impact important sur les bénéfices de l'effet Seebeck.
 - Développer conjointement avec les fournisseurs de poudres de projection thermique, ou de façon expérimentale, des matériaux semi-conducteurs, qui réduiront les pertes de chaleur lors du transfert d'électrons par l'effet Joule.

- Développer des revêtements plus épais et comportant moins de porosité. Cela favorisera le transport d'électrons et réduira les chances de bris durant le transport des électrons.
- Développer un processus de soudage des fils électriques sur le revêtement par projection thermique pour un prototype industriel.
- Prototype utilisant le concept de thermopile classique :
 - Développer conjointement avec des entreprises spécialisées, ou de façon expérimentale, des câbles de thermocouples basés sur des matériaux semi-conducteurs, afin de réduire les pertes thermiques par effet Joule.
 - Améliorer les connexions des câbles ou développer une soudure par fusion résistante aux hautes températures.
 - Développer une méthode de fabrication de briques intégrée avec des câbles de thermocouples.

Ces améliorations devraient aider à augmenter l'efficacité de la génération d'électricité des prototypes. Les pertes par effet Joule seront réduites, ainsi que les pertes causées par les bris de connexion des câbles ou par les imperfections du revêtement.

4.1 BÉNÉFICES ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DE L'UTILISATION DU THERMOGÉNÉRATEUR

Les bénéfices économiques attendus pour le projet concernent la réduction de la consommation électrique par la valorisation de la chaleur des processus. De cette façon, l'énergie récupérée serait valorisée dans les processus ou pourrait même être distribuée dans le système de distribution d'énergie d'une juridiction.

La réduction de GES attendue est liée à la réduction de la consommation électrique des processus industriels puisqu'on peut présumer que l'électricité ainsi produite serait consommée sur place par d'autres secteurs de l'entreprise. Par conséquent, on peut s'attendre à une réduction de l'énergie fournie par des sources primaires, comme l'hydroélectricité, les combustibles fossiles ou d'autres sources.

4.1.1 BÉNÉFICES ÉCONOMIQUES

Les bénéfices économiques du projet sont basés sur l'hypothèse que l'utilisation d'un thermogénérateur fonctionnant selon le concept de thermopile classique pourrait générer des quantités significatives d'électricité dans le cadre d'une utilisation à l'échelle industrielle.

Les bénéfices économiques sont calculés en déterminant la capacité de génération d'électricité par la récupération de la chaleur d'un processus industriel et les coûts actuels d'énergie dans deux contextes énergétiques différents : 1) au Québec, où la source d'énergie est hydroélectrique, et 2) dans un pays où la source d'énergie est thermoélectrique (de source fossile et non renouvelable).

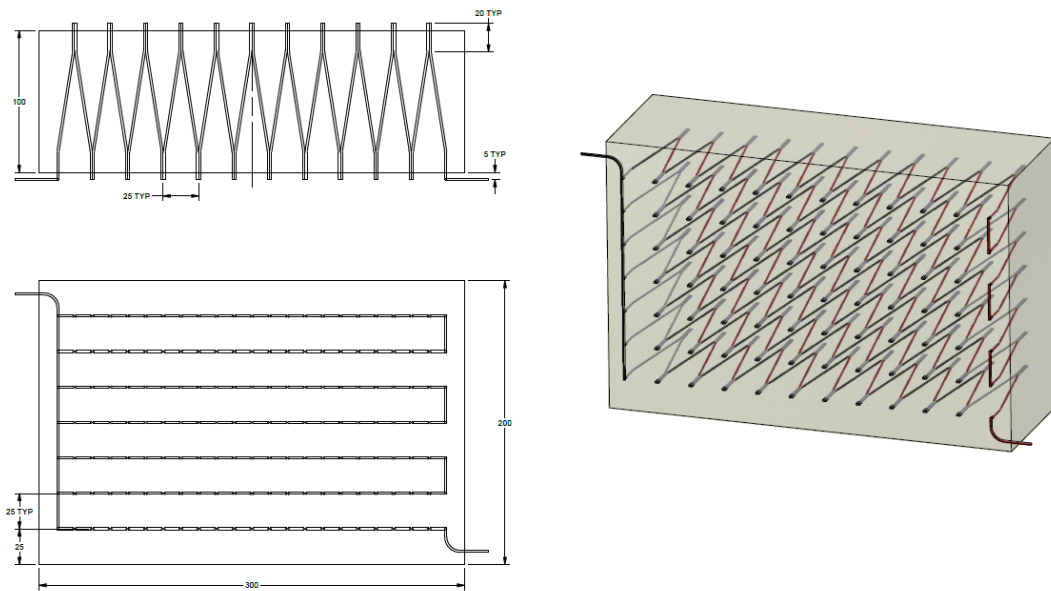
Une usine de bouletage de minerai de fer utilise du minerai, des additifs et de l'énergie pour la production des boulettes de minerai de fer. L'énergie est utilisée pour les opérations de l'usine, comme le broyage, la filtration, le bouletage et la fournaise. Cette dernière est la plus gourmande en termes d'énergie, car il s'agit d'un processus thermique et qu'il y a une certaine inefficacité liée à la perte de la chaleur du procédé. Dans cette étape du processus de fabrication des boulettes, les sources d'énergie utilisées sont essentiellement l'électricité pour les mouvements du chariot de grille et le débit d'air à l'intérieur du four pour les ventilateurs de procédé, ainsi que l'énergie thermique produite par l'ajout de l'huile combustible, du gaz naturel et du charbon à l'intérieur des boulettes. Finalement, la pierre à chaux est un minerai utilisé à l'intérieur des boulettes pour la correction de la basicité. Il s'agit d'un ajout important pour la production d'acier (Meyer 1980; Fonseca 2003; Cotta *et al.* 2014; Moraes *et al.* 2018).

Les bénéfices économiques du projet sont calculés en fonction de l'utilisation de la chaleur perdue dans le processus de cuisson des boulettes par les cheminées et par la zone de refroidissement du four. Les bénéfices sont présentés par prototype dans les sous-sections suivantes.

Une possible application industrielle est démontrée dans la Figure 44, où des briques avec connexions intégrées remplaceraient les briques utilisées dans les cheminées du four et les briques réfractaires utilisées dans la zone de refroidissement du four de cuisson des

boulettes. Le modèle de brique avec connexions intégrées présenté ici a les dimensions suivantes :

- Longueur = 300 mm
- Largeur = 200 mm
- Épaisseur = 100 mm
- Quantité de connexions = 550 connexions de chaque côté de la brique.



© Alexandre Gonçalves Andrade, 2023

Figure 44. Proposition de brique réfractaire génératrice d'électricité (ne représente pas le produit final ni la quantité de connexions estimée).

Les surfaces carrées de chaque endroit sélectionné dans cette étude sont décrites dans le Tableau 8. La surface carrée de la brique représentée dans la Figure 44 est de $0,06 \text{ m}^2$.

Tableau 8. Dimensions d'endroits d'installation du thermogénérateur.

Cheminée	Dimensions
Hauteur	50 m
Diamètre	9 m
Calcul de la surface latérale cheminée	$2 \pi rh$
Surface carrée	1414 m ²
Zone de refroidissement	Dimensions
Largeur de la zone de refroidissement	5 m
Hauteur de la zone de refroidissement	4 m
Longueur de la zone de refroidissement	63 m
Calcul surface latérale de la zone de refroidissement (2 côtés)	2 x hauteur x longueur
Surface carrée	504 m ²

Le Tableau 9 présente les calculs de bénéfices économiques du projet, considérant son installation dans deux cheminées du four de cuisson et sur la zone de refroidissement du four. Le scénario présenté l'est pour une usine localisée au Québec. En tenant compte des résultats des essais et des calculs d'équations présentés auparavant, nous estimons une génération de puissance électrique de l'ordre de 0,152 W pour une pièce de 0,06 m² utilisée dans un gradient de température de 100 °C (représentant l'installation dans les cheminées) et de 2,43 W si la pièce est utilisée dans un gradient de température de 400 °C (représentant l'installation dans la zone de refroidissement du four de cuisson).

Selon les calculs, le projet, si appliqué sur toute la surface des deux cheminées et la zone de refroidissement du four, peut représenter une génération de 217 MWh/année. Cela représenterait une économie d'énergie de l'ordre de 7 310 CAD/année par usine, ce qui ne serait toutefois pas suffisant pour une valorisation à l'échelle industrielle de la technologie dans l'état actuelle de développement. Ce montant ne considère pas les dépenses en investissement pour modifier les installations actuelles ou construire de nouvelles installations. Ce montant en investissement demeure donc à déterminer, mais il devrait être plus faible que les revenus générés sur un terme défini afin que la pratique soit économiquement intéressante pour une usine.

Tableau 9. Calculs des bénéfices économiques du concept de thermopile classique.

Données du prototype (maximum de rendement)	
Surface carrée du prototype (m ²)	0,06
Puissance / brique (kW) – 100 °C (utilisation dans les cheminées)	0,0001521
Puissance / brique (kW) – 400 °C (utilisation dans la zone de refroidissement)	0,0024300
Paramètres usine	
Disponibilité usine (%)	90 %
Heures travaillés/année (heures/année)	7 884
Cheminées 1 et 2	
Hauteur (m)	50
Diamètre (m)	9
Calcul de la surface latérale cheminée	$2\pi rh$
Surface chaque cheminée (m ²)	1 414
Quantité de briques (unités de 0,06 m ²)	23 562
Puissance totale (kWh)/ cheminée	28 254
Puissance totale (kWh)/ 2 cheminées	56 509
Zone refroidissement	
Hauteur des murs (m)	4
Longueur (m)	63
Calcul surface latérale (2 côtés)	2 x hauteur x longueur
Surface latérale (m ²)	504
Quantité de briques (unités de 0,06 m ²)	8 400
Puissance totale (kWh)	160 928
Calculs usine	
Puissance totale (kWh) / usine	217 437
Bénéfices financiers	
Prix électricité Québec (base Tarif L Hydro-Québec) – CAD / kWh	0,03362
Bénéfices financiers - CAD/année	7 310,24

4.1.2 BÉNÉFICES ENVIRONNEMENTAUX

Les bénéfices environnementaux de la solution sont basés sur l'hypothèse qu'un thermogénérateur pourrait réduire les émissions de GES, en comparaison au scénario de référence, soit la pratique courante sans thermogénérateur. Cette section présente deux ensembles de simulations de scénarios où les GES évités par l'utilisation d'un thermogénérateur sont calculés en 1) utilisant le prototype de thermogénérateur développé

dans la présente étude avec le concept de thermopile classique et en 2) utilisant un module de Peltier, soit le TEG conventionnel modèle HZ-20HV – Hi-Z Technology, Inc. (Tableau 7).

Le potentiel de réduction des émissions de GES de cette technologie est quantifié selon les principes des normes ISO 14064-1 et ISO 14064-2 (CAN/CSA 2020b; CAN/CSA 2020a). Des inventaires des émissions de GES du scénario de référence et du scénario de projet sont établis. La comparaison des émissions de GES de ces inventaires déterminera le potentiel de réduction.

Dans le contexte actuel, seules les émissions de catégories 1 et 2 seront considérées dans les inventaires, soit les émissions d'une entreprise considérée dans un inventaire de GES soumis dans une juridiction comme le Québec. Les données à récolter pour ces catégories sont présentées ici. Par le fait même, elles définissent les catégories suivantes :

- Données pour la catégorie 1 – les émissions directes de GES, soit les émissions contrôlées par l'entreprise. Types de données à collecter sans s'y limiter :
 - Sources fixes (machinerie fixe dans un établissement) et mobiles (transport) de combustion de combustibles.
 - Sources d'émissions fugitives : par exemple, ses émissions peuvent provenir de fuites sur des équipements (par exemple des systèmes de refroidissement).
- Données pour la catégorie 2 – les émissions indirectes de GES causées par l'énergie importée. Ce sont les émissions indirectes de GES provenant de la production et de la consommation d'électricité, de chaleur, de vapeur importée, de froid et d'air comprimé.

Le Potentiel de Réchauffement Globale (PGR) utilisé dans le projet est le PRP 100-2013 (IPCC 2013).

Tableau 10. Potentiels de réchauffement global (PRG) sur 100 ans et provenant du cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (PRG 100 – GIEC 2013) (IPCC 2013)

Gaz	PRG 100 ans – GIEC 2013
CO ₂	1
CH ₄	28
N ₂ O	265
R22	1760
R410a	1725
R134a	1300
SF ₆	22800
NF ₃	17200

Les facteurs de conversion de GES pour les sources d'émission utilisées dans l'industrie de bouletage de minerai de fer sont détaillés dans le Tableau 11.

Tableau 11. Facteurs d'émission des additifs utilisés dans la production de boulettes de minerai de fer.

Source	Facteur d'émission				Référence
	t CO₂	t CH₄	t N₂O	t CO₂-éq.	
Charbon (t GES/kg)	0,002340	0,000000030	0,000000020	0,002346	(Gouvernement du Québec 2019)
Coke de pétrole (t GES/litre)	0,003494	0,00000012	0,000024	0,00986	(Gouvernement du Canada 2022)
Bentonite (t GES/kg)	0,0000183			0,0000183	
Pierre à chaux (t GES/kg)	0,0004436			0,0004436	*Référence introuvable, valeurs calculées
Dolomite (t GES/kg)	0,0004766			0,0004766	
L'huile lourde (t GES/litre)	0,003156	0,00000012	0,000000064	0,003176	(Gouvernement du Canada 2022)

Source	Facteur d'émission				Référence
	t CO ₂	t CH ₄	t N ₂ O	t CO ₂ -éq.	
Gaz naturel (t GES/m ³)	0,001926	0,000000037	0,000000033	0,001936	(Gouvernement du Canada 2022)
Énergie électrique Québec (t GES/kWh)				0,0000019	(Gouvernement du Canada 2022)
Énergie électrique Énergie Fossile – Base Inde (t GES/kWh)				0,0007082	(Carbon Footprint 2022)

*Note : Voir les calculs plus bas.

Comme il n'existe pas de référence au Québec pour les facteurs d'émission de la pierre à chaux, de la bentonite et de la dolomite, les calculs ci-dessous ont été effectués.

- Bentonite :

Teneur en carbone moyenne : 0,50 %

Conversion de CO₂/C selon le rapport moléculaire = 44/12 = 3,67

Facteur d'émission de la Bentonite = 0,005*3,67 = 0,0183 t CO₂/t = 0,0000183 t CO₂/kg

- Pierre à chaux :

Teneur en carbone moyenne : 12,10 % (IPCC 2019)

Conversion de CO₂/C selon le rapport moléculaire = 44/12 = 3,67

Facteur d'émission de la pierre à chaux = 0,121*3,67 = 0,44366 t CO₂/t = 0,00044366 t CO₂/kg

- Dolomite :

Teneur en carbone moyenne : 13,00 % (IPCC 2019)

Conversion de CO₂/C selon le rapport moléculaire = 44/12 = 3,67

Facteur d'émission de la Pierre à chaux = 0,13*3,67 = 0,476667 t CO₂/t = 0,000476667 t CO₂/kg.

Le scénario de référence est une usine de bouletage de minerai de fer sans utilisation d'un thermogénérateur. Le scénario de projet consistera en l'utilisation du thermogénérateur à partir de la conception de thermopile classique dans les mêmes conditions d'usine. Les bilans des émissions de GES seront comparés dans deux contextes de production énergétique : 1) dans un pays où la source d'énergie est hydroélectrique, et 2) dans un pays où la source d'énergie est thermoélectrique. Le Tableau 12 résume les scénarios d'étude.

Tableau 12. Scénarios de référence et de projet associés à l'utilisation d'un thermogénérateur dans une usine de bouletage de minerai de fer.

Scénarios de référence	Scénarios de projet
Scénario de référence 1 : Usine de bouletage de minerai de fer utilisant une matrice hydroélectrique	Scénario projet 1 : Usine de bouletage de minerai de fer utilisant une matrice hydroélectrique et le thermogénérateur
Scénario de référence 2 : Usine de bouletage de minerai de fer utilisant une matrice thermoélectrique	Scénario projet 2 : Usine de bouletage de minerai de fer utilisant une matrice thermoélectrique et le thermogénérateur

Les scénarios sont basés sur une usine de production de boulettes de minerai de fer fictive dont la production annuelle est de 5 000 000 tonnes/année en plus de la consommation d'additifs typiques. Les valeurs de consommation typiques estimées des additifs sont basées sur la production des boulettes. La consommation d'énergie électrique est également basée sur la production des boulettes, en kWh par tonne de boulettes produites (Tableau 13). Les facteurs de conversion utilisés dans les calculs sont basés sur le Tableau 11. Les scénarios de projet considèrent l'utilisation du thermogénérateur dans les cheminées du four et dans la zone de refroidissement du four de durcissement des boulettes. Les calculs de bénéfices

considèrent la réduction de la consommation électrique par an compensée par la génération d'électricité des thermogénérateurs, basée sur les résultats d'essais de laboratoire avec le prototype développé.

Tableau 13. Consommation d'additifs dans une usine de bouletage de minerai de fer pour les calculs du projet.

Aditifs^a	Unité	Consommation
Production de boulettes	Tonne/année	5 000 000,00
Charbon	kg/tonne	16,4
Coke de pétrole	kg/tonne	6,1
Bentonite	kg/tonne	5,5
Pierre à chaux	kg/tonne	15,1
Dolomite	kg/tonne	41,0
L'huile lourde	l/tonne	13,0
Gaz naturel	m ³ /tonne	7,8
Énergie électrique	kWh/tonne	57,2

^a Les scénarios de référence et de projet du cas de la présente étude n'utilisent pas les additifs de coke de pétrole (le charbon est plutôt utilisé comme combustible solide), de dolomite (plutôt la pierre à chaux) et le gaz naturel (plutôt l'huile lourde). Néanmoins, les consommations sont présentées ici à titre informatif car ce sont des additifs utilisés dans d'autres cas d'usines.

Selon les résultats des essais, on voit un faible potentiel de réduction des GES. Dans le meilleur des cas, la valeur est de 154 tonnes de CO₂-éq/année pour le scénario 2 de l'étude, ce qui ne justifie pas une utilisation à l'échelle industrielle (Tableau 14 et Tableau 15).

Afin d'améliorer la performance de génération d'électricité, il est nécessaire de poursuivre la recherche en ce qui concerne les matériaux semi-conducteurs, afin de réduire les pertes par effet Joule.

Tableau 14. Sommaire des calculs d'émissions de GES pour les scénarios de référence et de projet. Analyse faite selon les principes de ISO 14064-1.

Type d'émissions	Scénario de référence 1	Scénario de projet 1	Scénario de référence 2	Scénario de projet 2
	Tonnes CO ₂ -éq.			
Catégorie 1	432 839,33	432 839,33	432 839,33	432 839,33
Bentonite	503,25	503,25	503,25	503,25
Charbon	192 383,48	192 383,48	192 383,48	192 383,48
Pierre à chaux	33 491,80	33 491,80	33 491,80	33 491,80
Huile lourde	206 460,80	206 460,80	206 460,80	206 460,80
Catégorie 2	543,40	542,99	202 545,20	202 391,21
Consommation d'électricité (hydroélectrique)	543,40	542,99		
Consommation d'électricité (thermoélectrique)			202 545,20	202 391,21
Total des émissions de GES	433 382,73	433 382,32	635 384,53	635 230,54

Tableau 15. Détails d'émissions de GES pour les scénarios de référence et de projet. Analyse faite selon les principes de ISO 14064-1.

Étiquettes de lignes	Tonnes CO ₂	Tonnes CH ₄	Tonnes N ₂ O	Tonnes CO ₂ -éq.
Scénario de référence 1	431 558,45	10,26	5,80	433 382,73
Catégorie 1	431 015,05	10,26	5,80	432 839,33
Fixe	431 015,05	10,26	5,80	432 839,33
Charbon	191 880,00	2,46	1,64	192 383,48
Pierre à chaux	33 491,80	0,00	0,00	33 491,80
Bentonite	503,25	0,00	0,00	503,25
Huile lourde	205 140,00	7,80	4,16	206 460,80
Catégorie 2	543,40	0,00	0,00	543,40
Consommation d'énergie	543,40	0,00	0,00	543,40
Consommation d'électricité (hydroélectrique)	543,40	0,00	0,00	543,40
Scénario de projet 1	431 558,04	10,26	5,80	433 382,32
Catégorie 1	431 015,05	10,26	5,80	432 839,33
Fixe	431 015,05	10,26	5,80	432 839,33
Charbon	191 880,00	2,46	1,64	192 383,48
Pierre à chaux	33 491,80	0,00	0,00	33 491,80
Bentonite	503,25	0,00	0,00	503,25
Huile lourde	205 140,00	7,80	4,16	206 460,80
Catégorie 2	542,99	0,00	0,00	542,99
Consommation d'énergie	542,99	0,00	0,00	542,99
Consommation d'électricité (hydroélectrique)	542,99	0,00	0,00	542,99
Scénario de référence 2	633 560,25	10,26	5,80	635 384,53
Catégorie 1	431 015,05	10,26	5,80	432 839,33
Fixe	431 015,05	10,26	5,80	432 839,33
Charbon	191 880,00	2,46	1,64	192 383,48
Pierre à chaux	33 491,80	0,00	0,00	33 491,80
Bentonite	503,25	0,00	0,00	503,25

Étiquettes de lignes	Tonnes CO₂	Tonnes CH₄	Tonnes N₂O	Tonnes CO₂-éq.
Huile lourde	205 140,00	7,80	4,16	206 460,80
Catégorie 2	202 545,20	0,00	0,00	202 545,20
Consommation d'énergie	202 545,20	0,00	0,00	202 545,20
Consommation d'électricité (thermoélectrique)	202 545,20	0,00	0,00	202 545,20
Scénario de projet 2	633 406,26	10,26	5,80	635 230,54
Catégorie 1	431 015,05	10,26	5,80	432 839,33
Fixe	431 015,05	10,26	5,80	432 839,33
Charbon	191 880,00	2,46	1,64	192 383,48
Pierre à chaux	33 491,80	0,00	0,00	33 491,80
Bentonite	503,25	0,00	0,00	503,25
Huile lourde	205 140,00	7,80	4,16	206 460,80
Catégorie 2	202 391,21	0,00	0,00	202 391,21
Consommation d'énergie	202 391,21	0,00	0,00	202 391,21
Consommation d'électricité (thermoélectrique)	202 391,21	0,00	0,00	202 391,21

Il est possible de vérifier que l'émission de GES/tonne de boulettes produites dans le cadre d'une usine située dans une région où l'énergie électrique provient d'une source hydroélectrique est de 86,6 kg CO₂-éq/tonne de boulettes (totale d'émission de 433 383 tonnes CO₂-éq. divisé par la production annuelle de l'usine de 5 000 000 tonnes de boulettes). Quant au même taux dans une région où le bouquet électrique provient d'une source thermoélectrique, celui-ci est de 127 kg CO₂-éq/tonne de boulettes (totale d'émission de 635 385 tonnes CO₂-éq. divisé par la production annuelle de l'usine de 5 000 000 tonnes de boulettes). Cette différence est due aux facteurs d'émission d'électricité des sources hydroélectrique et thermoélectrique.

On remarquera ici l'importance de la source d'électricité dans le bilan d'émission des GES d'une industrie, dont le profil est le même quant à sa consommation et à sa production. Pour les scénarios de référence, une usine localisée dans un pays ayant une matrice hydroélectrique, la consommation électrique représente 0,13 % du bilan d'émission de GES totale (543,4 tonnes CO₂-éq/année sur le totale de 433 383 tonnes CO₂-éq/année), alors que l'usine située dans un pays ayant une matrice thermoélectrique, la consommation électrique représente 31,88 % des émissions de GES (202 545 tonnes CO₂-éq/année sur le totale de 635 385 tonnes CO₂-éq/année).

Le projet, dans son état actuel de technologie, démontre un faible potentiel de récupération de la chaleur perdue dans les processus industriels liés aux fours à haute température (moins de 1 % de réduction d'émission des GES). Cela s'explique par le choix et la disponibilité des matériaux utilisés dans la production des prototypes, soit des matériaux métalliques et non des matériaux semi-conducteurs, comme ceux qui sont utilisés dans les thermogénérateurs conventionnels.

Afin de prouver le potentiel d'utilisation d'un thermogénérateur dans une application industrielle, le scénario mettant en scène un module de Peltier conventionnel a été simulé (Tableau 16). Sa capacité de génération d'électricité était de 5W par module de 75 mm x 75 mm, modèle HZ-20HV – Hi-Z Technology, Inc., selon les informations du Tableau 7. Il faut préciser que la faible résistance mécanique des connexions électriques du module de Peltier conventionnel limite son application à un maximum de 100 °C. De plus, sa faible épaisseur ne permet pas un gradient de température pour l'utilisation dans une cheminée et dans la zone

de refroidissement du four. Ainsi, les informations suivantes servent uniquement à présenter le potentiel de la technologie, si la technologie des thermogénérateurs conventionnels progresse en termes de conception d'ingénierie.

Tableau 16. Calculs d'émission des GES pour les scénarios utilisant un TEG conventionnel. Analyse faite selon les principes de la norme ISO 14064-1.

Type d'émissions	Scénario de base 1	Scénario projet 1 - TEG conventionnel	Scénario de base 2	Scénario projet 2 - TEG conventionnel
		Tonnes CO ₂ -éq		
Catégorie 1	432 839,33	432 839,33	432 839,33	432 839,33
Bentonite	503,25	503,25	503,25	503,25
Charbon	192 383,48	192 383,48	192 383,48	192 383,48
Pierre à chaux	33 491,80	33 491,80	33 491,80	33 491,80
Huile lourde	206 460,80	206 460,80	206 460,80	206 460,80
Catégorie 2	543,40	478,91	202 545,20	178 506,92
Consommation d'électricité (hydroélectrique)	543,40	478,91		
Consommation d'électricité (thermoélectrique)			202 545,20	178 506,92
Total des émissions	433 382,73	433 318,24	635 384,53	611 346,25
Réduction des émissions de GES (%)		0,014 %		3,78 %

On voit le potentiel de réduction de 3,78 % des émissions de GES d'une usine fictive de 5 000 000 tonnes de boulettes/année située dans un pays où la matrice électrique provient de source thermoélectrique à travers l'utilisation d'un TEG conventionnel (dans le cas où l'utilisation directe de cette technologie est possible dans le gradient de températures de travail de 100 à 400 °C; Tableau 16). Pareillement, cette possible utilisation du TEG conventionnel dans une usine située dans un pays avec une source thermoélectrique apporterait des bénéfices financiers d'environ 1 141 156 CAD/année par la réduction des coûts d'électricité (en utilisant le prix de l'énergie électrique au Québec).

4.2 RÉPONSES À DES CIBLES DES 17 ODD DU PROGRAMME 2030 DES NATIONS UNIES

Les 169 cibles des 17 ODD du Programme 2030 des Nations Unies (Nations Unies 2015) sont examinées afin de déterminer comment l'application et les retombées de cette technologie répondent à ce Programme. Notre hypothèse est que le prototype développé dans cette étude, s'il atteignait un niveau de maturité technologique pour une utilisation industrielle, apporterait minimalement les mêmes bénéfices que ceux qu'engendre un thermogénérateur conventionnel (en utilisant des matériaux semi-conducteurs). L'exercice se fera en liant l'application et les retombées du projet à des cibles des ODD et en présentant une explication détaillée de la réponse à ces cibles.

L'analyse est basée sur l'hypothèse que l'utilisation d'un thermogénérateur pourrait répondre à certaines des cibles des 17 ODD du Programme 2030 des Nations Unies.

En réponse aux objectifs de développement durable, le projet est fortement lié à l'objectif 7 – « Énergie propre et d'un coût abordable », à l'objectif 8 – « Travail décent et croissance économique », à l'objectif 9 – « Industrie, Innovation et Infrastructures », à l'objectif 12 – « Consommation et production durables », à l'objectif 13 – « Lutte contre les changements climatiques » et l'objectif 17 – « Partenariats pour la réalisation des objectifs » (Nations Unies 2015). Ainsi, les cibles de ces ODD seront d'abord examinées pour déterminer la réponse de cette technologie. Il est à noter que la réponse à ces cibles sont des liens potentiels et que seules les actions finales (ex. augmentation du niveau de maturité technologique par la recherche et développement, suivi d'un transfert technologique)

permettent d'identifier des liens plus robustes. Les textes des cibles sont ceux des Nations Unies (Nations Unies 2015) (les libellés de toutes les cibles sont présentés à l'annexe 1).

Dans l'objectif 7 (Énergie propre et d'un coût abordable), les cibles touchées par le projet sont les suivantes :

7.3 – « D'ici à 2030, multiplier par deux le taux mondial d'amélioration de l'efficacité énergétique. »

7.a – « D'ici à 2030, renforcer la coopération internationale en vue de faciliter l'accès à la recherche et aux technologies relatives à l'énergie propre, notamment l'énergie renouvelable, l'efficacité énergétique et les nouvelles technologies relatives aux combustibles fossiles propres, et promouvoir l'investissement dans l'infrastructure énergétique et les technologies relatives à l'énergie propre. »

Réponse : L'utilisation d'une technologie capable de valoriser la chaleur perdue dans les processus industriels permettra une amélioration de l'efficacité énergétique des usines qui utilisent des fours à haute température. Cela permettrait de compenser minimalement l'utilisation des combustibles fossiles dans les émissions de GES des entreprises. Cela implique également l'avancement de la recherche de nouvelles technologies, comme celle du thermogénérateur, afin de développer des sources renouvelables d'énergie. Le concept de thermopile classique de la présente étude permettrait une réduction sur le bouquet énergétique local de 217 437 kWh pour une usine de 5 millions de tonnes de boulettes par année (voir Tableau 9 de la section 4.1.1). Plus précisément pour la réponse à 7.a, le transfert technologique dépendra de l'implication d'industries et/ou des gouvernements afin de faciliter et d'accélérer le développement des technologies plus efficaces énergétiquement.

Dans l'objectif 8 (Travail décent et croissance économique), les cibles touchées par le projet sont :

8.2 – « Parvenir à un niveau élevé de productivité économique par la diversification, la modernisation technologique et l'innovation, notamment en mettant l'accent sur les secteurs à forte valeur ajoutée et à forte intensité de main-d'œuvre. »

8.3 – « Promouvoir des politiques axées sur le développement qui favorisent des activités productives, la création d’emplois décents, l’entrepreneuriat, la créativité et l’innovation et stimulent la croissance des microentreprises et des petites et moyennes entreprises et facilitent leur intégration dans le secteur formel, y compris par l’accès aux services financiers. »

Réponse : Le développement d’un thermogénérateur minimalement efficace pour l’utilisation à l’échelle industrielle constitue une innovation, pouvant générer des emplois, l’entrepreneuriat et la croissance des petites et moyennes entreprises. Par exemple, si le concept de thermopile classique atteignait un niveau de maturité technologique pour son utilisation industrielle, alors une entreprise pourrait ajouter cette offre de produits à son panier sur le marché mondial; une telle action pourrait potentiellement générer de nouveaux emplois.

Dans l’objectif 9 (Industrie, Innovation et Infrastructures), les cibles touchées par le projet sont :

9.2 – « Promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et, d’ici à 2030, augmenter nettement la contribution de l’industrie à l’emploi et au produit intérieur brut, en fonction du contexte national, et la multiplier par deux dans les pays les moins avancés. »

9.4 – « D’ici à 2030, moderniser l’infrastructure et adapter les industries afin de les rendre durables, par une utilisation plus rationnelle des ressources et un recours accru aux technologies et procédés industriels propres et respectueux de l’environnement, chaque pays agissant dans la mesure de ses moyens. »

9.5 – « Renforcer la recherche scientifique, perfectionner les capacités technologiques des secteurs industriels de tous les pays, en particulier des pays en développement, notamment en encourageant l’innovation et en augmentant considérablement le nombre de personnes travaillant dans le secteur de la recherche et du développement pour 1 million d’habitants et en accroissant les dépenses publiques et privées consacrées à la recherche et au développement d’ici à 2030. »

Réponse : La récupération des pertes de chaleur dans les industries entraîne une amélioration de l'efficacité des usines en permettant de les rendre plus durables. La recherche et développement des technologies ayant cet objectif encourage l'innovation et augmente le nombre de personnes et entreprises travaillant dans les secteurs de recherche et développement. Une telle innovation pourrait émerger avec le développement du concept de thermopile classique de la présente étude.

Dans l'objectif 12 (Consommation et production durables), la cible touchée par le projet est :

12.a – « Aider les pays en développement à se doter des moyens scientifiques et technologiques qui leur permettent de s'orienter vers des modes de consommation et de production plus durables. »

Réponse : Le développement d'un outil pour récupérer la chaleur perdue dans les processus industriels promouvra un mode de production plus durable. Le partage d'information, comme nous le faisons dans ce document, pourrait aider les pays en développement à développer leurs propres outils, mais cela n'est pas suffisant pour faire avancer la recherche technologique et le partage d'information. Il serait important qu'une implication plus grande des entreprises et des gouvernements soit effective et concrète dans le partage de telles technologies vers des modes de consommation et production plus durables. Le potentiel d'atteinte de cette cible par un transfert technologique dépend aussi des leviers et du champ de compétences des organisations privées et publiques. Sur ce point, la compétence de l'aide aux pays en développement appartient généralement aux gouvernements; le transfert technologique d'une technologie de thermopile classique vers les pays en développement devrait alors être facilité par des gouvernements.

Dans l'objectif 13 (Lutte contre les changements climatiques), la cible touchée partiellement par le projet est :

13.2 – « Incorporer des mesures relatives aux changements climatiques dans les politiques, les stratégies et la planification nationales »

Réponse : Le développement d'une technologie capable d'utiliser de l'énergie perdue dans la chaleur émise par des processus industriels pourrait aider à la réduction des émissions de GES des industries en proportion avec la réduction de la consommation d'électricité de sources fossiles (donc Scope 2). Les défis de réduction d'émission de GES de l'industrie de bouletage de minerai de fer sont résumés dans le Tableau 17 pour les principaux joueurs (plus de détails dans la section 1.5). Selon le concept de thermopile classique de la présente étude, le potentiel d'utilisation d'un thermogénérateur performant pourrait réduire les émissions de GES de l'ordre 3,78% pour une usine située dans un pays avec une matrice électrique à base thermoélectrique (Tableau 16). Cette diminution demeure modeste mais pourrait tout de même s'intégrer à un portefeuille de solutions d'une usine de bouletage de minerai de fer.

Tableau 17. Défis de réduction d'émission de GES dans l'industrie de bouletage de minerai de fer (principaux joueurs dans le marché)

Entreprise	Cible de réduction d'émission de GES (l'horizon 2030)	Références
Vale SA	33%	(Vale 2021; Vale 2022)
Rio Tinto / IOC	50%	(Rio Tinto 2022)
BHP	30%	(BHP 2020; BHP 2021)

Dans l'objectif 17 (Partenariats pour la réalisation des objectifs), les cibles touchées par le projet sont :

17.6 – « Renforcer l'accès à la science, à la technologie et à l'innovation et la coopération Nord-Sud et Sud-Sud et la coopération triangulaire régionale et internationale dans ces domaines et améliorer le partage des savoirs selon des modalités arrêtées d'un commun accord, notamment en coordonnant mieux les mécanismes existants, en particulier au niveau des organismes des Nations Unies, et dans le cadre d'un mécanisme mondial de facilitation des technologies »

17.7 – « Promouvoir la mise au point, le transfert et la diffusion de technologies respectueuses de l'environnement en faveur des pays en développement, à des conditions favorables, y compris privilégiées et préférentielles, arrêtées d'un commun accord »

Réponse : Les liens potentiels avec ces cibles sont surtout associés à la diffusion de connaissances par ce mémoire de maîtrise. Pour le lien potentiel avec la cible 17.6, le partage de connaissances est un point important où les entreprises et le gouvernement doivent mettre l'effort, autant pour le développement des technologies qui permettront la réduction des émissions de GES que pour la mise au point et l'accompagnement dans l'évolution de ces technologies. Ce mémoire de maîtrise permettra de partager de l'information tant au niveau des différents processus (projection thermique, processus de bouletage de minerai de fer, processus de production d'aluminium) que du développement d'un thermogénérateur utilisable dans les processus industriels avec des calculs d'émissions de GES et son potentiel de réduction de l'empreinte carbone dans une usine typique. La présente étude ouvre la voie pour poursuivre la recherche et développement, ce qui pourrait potentiellement et ultimement être lié à une réponse à la cible 17.6, selon la volonté et les efforts des acteurs qui recevront l'information. La cible 17.7 a comme point central le partage de connaissances et est ici en relation synergique avec la réponse à la cible 17.6. Donc, il y a une certaine responsabilité des entreprises et des gouvernements pour le partage de ces connaissances et tout dépendant des champs de compétences. De plus le partage de connaissances peut aussi s'exécuter par la communauté universitaire (cours, conférences et articles scientifiques) afin de faire avancer la recherche de nouvelles technologies. Dans ce cadre plus global, ce mémoire de maîtrise peut aider à répondre à ces cibles.

Comme nous l'avons démontré, notre projet touche potentiellement à 6 objectifs de développement durable et à 11 cibles spécifiques. On voit des relations synergiques entre les cibles visées par le projet (avec l'hypothèse de la possibilité de production d'un thermogénérateur utilisant des matériaux plus performants, soit les semi-conducteurs, et avec la bonne géométrie ou conception d'ingénierie pour une utilisation industrielle). Par exemple, en répondant à la cible 7.3, on peut aussi répondre aux cibles 8.2 et 9.4 au niveau de l'utilisation des technologies plus efficaces énergétiquement pour viser une réduction d'émission de GES. Afin de faire cela, il importe de développer des solutions durables, ce

qui répond à la cible 9.5. Une autre relation synergique potentielle concerne les cibles 7.a, 12.a, 8.3, 9.5, 13.2, 17.6 et 17.7 visant à développer des politiques et des mesures pour faciliter la recherche scientifique et le partage d'informations susceptibles de mener à une amélioration de l'efficacité énergétique et des technologies propres. Afin de créer un produit fonctionnel et performant, il sera toutefois nécessaire d'utiliser des matériaux critiques, comme les semi-conducteurs. Ici, il y a une relation antagoniste potentielle, vu que ces matériaux étant des produits d'activités minières peuvent affecter les écosystèmes aquatiques et terrestres et avoir un impact négatif sur des cibles des ODD 14 et 15.

5. CONCLUSION

Le projet d'innovation décrit dans ce travail démontre la possibilité d'amélioration de l'efficacité énergétique des usines qui utilisent des fours à hautes températures. Cela représente une réduction possible d'émission de GES liée à la consommation électrique de ses opérations.

Comme l'objectif 1 du travail a été le développement des prototypes de thermogénérateur, deux prototypes ont été développés et testés en laboratoire. L'un en utilisant la technologie de projection thermique et l'autre en utilisant le concept de thermopile classique. Les deux prototypes sont basés sur l'effet Seebeck.

La géométrie du prototype 1 n'a pas permis une évaluation efficace du rendement énergétique. La carence des poudres et fils de projection thermique à partir des matériaux semi-conducteurs a limité la possibilité de réaliser un prototype fonctionnel avec cette technologie. Toutefois, un prototype a été produit avec des poudres métalliques, mais le transfert rapide de chaleur du substrat métallique, les pertes par effet Joule, le niveau de porosité du revêtement et la faible épaisseur du revêtement n'ont pas permis une génération quantifiable d'électricité.

Le prototype utilisant le concept de thermopile classique a démontré un certain potentiel, mais sa génération d'électricité s'est avérée faible. Cela s'explique par l'utilisation des fils métalliques conducteurs au lieu de l'utilisation des matériaux semi-conducteurs, qui ont fait en sorte que les pertes d'énergie par effet Joule ont été importantes, réduisant la quantité totale d'électricité générée. Avec la sélection correcte des matériaux, une réduction de 3,78 % des émissions de GES d'une usine de bouletage de minerai de fer pourrait être possible, pour le scénario d'utilisation dans un pays dont la matrice électrique est de source thermoélectrique.

Le deuxième objectif du travail a été de déterminer comment les technologies développées dans cette étude pourraient répondre à des cibles des 17 ODD du Programme 2030 des Nations Unies dans une perspective d'opérationnalisation du développement durable et de l'application de l'écologie industrielle. Notre concept peut offrir des réponses

contribuant à 6 objectifs du développement durable, dans l'atteinte de 11 cibles spécifiques. Dans la possibilité de création d'un thermogénérateur efficace, on constate des liens entre les cibles visées par le projet. En répondant à la cible 7.3, on peut aussi répondre aux cibles 8.2 et 9.4 au niveau de l'utilisation des technologies plus efficaces énergétiquement et visant la réduction d'émission de GES. Afin de faire cela, il importe de développer des solutions durables, ce qui répond à la cible 9.5. Une autre relation synergique concerne les cibles 7.a, 12.a, 8.3, 9.5, 13.2, 17.6 et 17.7 qui visent à développer des politiques et des mesures pour faciliter la recherche scientifique et le partage d'informations susceptibles de mener à une amélioration énergétique et des technologies propres. Afin de créer un produit fonctionnel et performant, il sera toutefois nécessaire d'utiliser des matériaux critiques, comme les semi-conducteurs. Ici, il y a une relation antagoniste, vu que ces matériaux étant des produits d'activités minières peuvent affecter les écosystèmes aquatiques et terrestres et avoir un impact négatif sur des cibles des ODD 14 et 15. Toutefois, ces antagonismes présumés devraient être opposés aux bénéfices liés à la réduction de l'extraction de carburants fossiles et des polluants atmosphériques liés à la génération thermoélectrique pour en connaître l'ampleur réelle.

Sur la base des expériences faites durant cette étude, voici quelques suggestions qui pourront orienter de futurs travaux liés à l'utilisation de l'effet Seebeck pour la récupération de la chaleur perdue dans les processus industriels :

- Pour le concept de projection thermique :
 - Développement des poudres et/ou fils semi-conducteurs pour la technologie de projection thermique pour la fabrication d'un prototype.
 - Augmenter l'épaisseur du revêtement fait à partir de la projection thermique, afin de réduire les risques de manque de matériaux à certains endroits. Un revêtement trop mince nuit au déplacement des électrons.
 - Développer une recette de projection thermique ou utiliser une technologie ayant le minimum de porosité, afin de réduire les risques mentionnés dans le point précédent.
 - Développer une méthode de soudage de fils sur le revêtement thermique pour la récupération et le transfert d'électricité au réseau électrique.

- Pour le concept de thermopile classique :
 - Développement de fils semi-conducteurs.
 - Faire la conception d'ingénierie qui permettra l'utilisation à l'échelle industrielle. L'auteur suggère le concept de brique réfractaire avec le thermogénérateur à l'intérieur.

Ces suggestions et la poursuite de la recherche dans ce domaine permettront de rendre la technologie plus mature. Une prochaine étape serait le développement d'un prototype pouvant être utilisé à l'échelle industrielle. Les essais et les projections de cette étude montrent des bénéfices économiques et environnementaux, qui nécessitent une poursuite des travaux pour affiner la technologie et la rendre opérationnelle à l'échelle industrielle.

LISTE DE RÉFÉRENCE

Aichinger C, Fulgencio A, Hieblt B, Redl R et Stiasny H. 2013. Circular pelletizing technology – a revolutionary solution. 43rd Ironmaking and Raw Materials Seminar, 12h Brazilian Symposium on Iron Ore and 1st Brazilian Symposium on Agglomeration of Iron Ore, September 1st to 4th, Belo Horizonte, MG, Brazil.

Alanne K et Saari A. 2006. Distributed Energy generation and sustainable development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 10 : 539-558.

Amin S et Panchal H. 2016. A Review on thermal spray coating processes. International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER), 2 : 556 - 563.

ArcelorMittal. 2022 (mis à jour le 11 mai 2022). ArcelorMittal and BioÉnergie AE Côte-Nord Canada announce a major agreement for the Côte-Nord economy and the beginning of the energy transition at the Port-Cartier pellet plant. Consulté le 11 juin 2023, <https://mines-infrastructure-arcelormittal.com/en/arcelormittal-and-bioenergie-ae-cote-nord-canada-announce-a-major-agreement-for-the-cote-nord-economy-and-the-beginning-of-the-energy-transition-at-the-port-cartier-pellet-plant/>

BHP. 2020. BHP Climate change report 2020 [Press Release]. BHP, file:///C:/Users/poste93/Downloads/200910_BHPClimateChangeReport2020.pdf, p. 48.

BHP. 2021. BHP Decarbonisation strategy [Press Release]. BHP, https://www.bhp.com/-/media/documents/environment/2022/220721_bhp_decarbonisation_strategy.pdf.

Booster M. 2017. How wind power plant works? Complete explanation. Consulté le 16 aout 2021, <https://www.mechanicalbooster.com/2017/12/wind-power-plant.html>

Braga D et al. e. 2022. Novel use of renewable charcoal to reduce CO2 emissions in pelletizing plant. 4th International Conference on Energy and Material Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry.

Braga D, Dubé M, Alba M et Sampaio RS. Sustainability in the Steel Industry: The potentials and results of Biochar applications for iron ore pellet plants. Dans : Annual conference of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM), North American 9th Iron Ore Symposium Montreal, Canada, May 1-3 2023.

Cambridge Uo. 2009 (mis à jour le 31 aout 2009). THERMOELECTRIC MATERIALS FOR THERMOCOUPLES. Consulté le 05 aout 2023, <https://www.msm.cam.ac.uk/utc/thermocouple/pages/ThermocouplesOperatingPrinciples.html>

CAN/CSA. 2020a. Gaz à effet de serre - partie 2: Spécifications et lignes directrices, au niveau des projets, pour la quantification, la surveillance et la déclaration des réductions

d'émissions ou d'accroissements de suppressions des gaz à effet de serre iso 14064-2:2019, idt.

CAN/CSA. 2020b. Gaz à effet de serre - partie 1: Spécifications et lignes directrices, au niveau des organismes, pour la quantification et la déclaration des émissions et des suppressions des gaz à effet de serre. iso 14064- 1:2018, idt.

Carbon Footprint. 2022. Carbon footprint: Country specific electricity grid greenhouse gas emission factor. https://www.carbonfootprint.com/docs/2022_03_emissions_factors_sources_for_2021_electricity_v11.pdf

Castelli AF, Elsidio C, Scaccabarozzi R, Nord LO et Martelli E. 2019. Optimization of organic Rankine cycles for waste heat recovery from aluminum production plants. *Frontiers in Energy Research*, 7.

Cotta LCS, Athayde M, Bailon AMG, Santos GM et Nunes SF. 2014. Aumento da eficiência de queima do forno de pelletização straight-grate da Samarco Mineração. 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Dai D, Zhou Y et Liu J. 2011. Liquid metal based thermoelectric generation system for waste heat recovery. *Renewable Energy*, 36 : 3530-3536.

Davis JR. 2004. *ASM Handbook - Thermal Spray Technology*. ASM International, Materials Park, OH, 337 p.

Enescu D. 2019. Thermoelectric energy harvesting: Basic principles and applications. *Green Energy Advances, IntechOpen Book Series*, <https://www.intechopen.com/chapters/65239>, p. 38.

EPA - United States Environmental Protection Agency. 2013. Renewable Energy Fact Sheet: Wind Turbines. Environmental protection agency office of wastewater management.

Fernandes AESS. 2012. Conversão de energia com células de Peltier. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 97 p.

Fonseca MC. 2004. Influência da distribuição granulométrica do pellet feed no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta.

Fonseca VO. 2003. Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO. *REDEMAT*, 253 p.

Gouvernement du Canada. 2021. Comprendre la corrosion galvanique. Consulté le 2022/03/06, <https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/formations-apprentissage/ateliers-en-personne/corrosion-galvanique.html>

Gouvernement du Canada. 2022. Emission factors and reference values. Dans : Canada Eccc éd., <https://publications.gc.ca/site/eng/9.911206/publication.html>.

Gouvernement du Québec. 2019. Facteurs d'émission et de conversion. Consulté le 29 décembre 2022, <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/FacteursEmission.pdf>

Halmann MM et Steinberg M. 1998. Greenhouse gas carbon dioxide mitigation: Science and technology CRC Press.

He J, Kanatzidis M et Dravid V. 2013. High performance bulk thermoelectrics via a panoscopic approach. *Materials Today*, 321.

He W, Zhang G, Zhang X, Ji J, Li G et Zhao X. 2015. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Applied Energy*, 143 : 1-25.

IPCC. 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC, <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.

IPCC, P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz et Malley J. 2022. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Jaziri N, Boughamoura A, Müller J, Mezghani B, Tounsi F et Ismail M. 2020. A comprehensive review of thermoelectric generators: Technologies and common applications. *Energy Reports*, 6 : 264-287.

Kannan N et Vakeesan D. 2016. Solar energy for future world: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62 : 1092-1105.

Kaunda CS, Kimambo CZ et Nielsen TK. 2012. Hydropower in the context of sustainable energy supply: A review of technologies and challenges. *ISRN Renewable Energy*, 2012 : 1-15.

Koivuluoto H. 2022. A Review of Thermally Sprayed Polymer Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31 : 1750-1764.

Kordzadeh E, Campos F, Strüber G et Schwalm T. 2017. Contributions to the technology comparison between straight grate and grate-kiln. *ABM Proceedings*, 47 : 14.

- Kumar V, Shrivastava RL et Untawale SP. 2015. Solar energy: Review of potential green & clean energy for coastal and offshore applications. *Aquatic Procedia*, 4 : 473-480.
- Kvande H et Drablos PA. 2014. The aluminum smelting process and innovative alternative technologies. *J Occup Environ Med*, 56 : S23-32.
- Ladam Y, Solheim A, Segatz M et Lorentsen O-A. 2011. Heat recovery from aluminium reduction cells. Dans :, p. 393-398.
- Larsson M, Grip C-E, Ohlsson H, Rutqvist S, Wikström J-O et Ångström S. 2006. Comprehensive Study Regarding Greenhouse Gas Emission from Iron Ore Based Production at the Integrated Steel Plant SSAB Tunnlåt AB. *International Journal of Green Energy*, 3 : 171-183.
- Leisenberg WK, Dojc D et Maiwald D. 2008. Triple low-triple high, concepts for the anode plant of the future. *Light metals*.
- Magazine CB. 2022. Quebec iron ore pellet plant earns CETEQ award for woody biofuel use [Press release]. *Canadian Biomass Magazine*, <https://www.canadianbiomassmagazine.ca/iron-ore-pellet-plant-earns-ceteq-award-for-woody-biofuel-use/>.
- Mamur H et Ahiska R. 2014. A review: Thermoelectric generators in renewable energy. *INTERNATIONAL JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY RESEARCH*, 4.
- Metso:Outotec. 2023. Traveling Grate Pelletizing Plant. Consulté le 2023/04/01, <https://www.mogroup.com/portfolio/traveling-grate-pelletizing-plant/>
- Meyer K. 1980. Pelletizing of iron ores. Springer, 317 p.
- Mishra P. 2017. Power plants - how wind power plant works? Complete explanation. Consulté le 16 aout 2021, <https://www.mechanicalbooster.com/2017/12/wind-power-plant.html>
- Moraes SL, Lima JRB et Ribeiro RR. 2018. Iron ore pelletizing process: An overview. *InTech* : 21.
- Muthukrishnan V. 2021 (mis à jour le 2021/12/21). Thermopile: What Are They (And How Do They Work? Consulté le 2023/04/02, <https://www.electrical4u.com/thermopile/>
- Namboothiri S, Lavoie P, Cotton D et Taylor MP. 2009. Controlled cooling of aluminium smelting cells sidewalls using heat exchangers supplied with air. *Light Metals*, https://www.researchgate.net/publication/303965924_Controlled_Cooling_of_Aluminium_Smelting_Cells_Sidewalls_Using_Heat_Exchangers_Supplied_with_Air, p. 317-322.

Nations Unies. 2015. Résolution adoptée par l'assemblée générale le 25 septembre 2015. . https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_fr.pdf.

Nations Unies. 2022. Rapport sur les objectifs de développement durable 2022. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/>.

Nordgren S. 2010. Energy analysis of pelletising in a straight grate induration furnace. Licentiate Thesis, Luleå University of Technology, www.ltu.se, 60 p.

Nowicki C et Gosselin L. 2012. An overview of opportunities for waste heat recovery and thermal integration in the primary aluminum industry. *Jom*, 64 : 990-996.

Nunes HJL et Barbosa ATR. 2017. Efeito Seebeck no aumento de eficiência de uma caldeira. 13º Congresso Ibero- americano de Engenharia Mecânica, Lisbonne, Portugal.

Nunes S. 2007. Influência da Carga Circulante do Pelotamento na Qualidade Física das Pelotas Cruas e Queimadas da Samarco Mineração., Universidade Federal de Ouro Preto, <https://www.repositorio.ufop.br>, 131 p.

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. 2023. Waste Heat Recovery Basics. Consulté le 11 octobre 2023, <https://www.energy.gov/eere/iedo/waste-heat-recovery-basics#:~:text=It%20is%20estimated%20that%20between,equipment%20surfaces%20and%20heated%20products>.

Omega. 2021. OMEGA Temperature Measurement Handbook. Dans : OMEGA éd.

Ozawa M. 2003. Determinação experimental da resistividade ohmica de cinzas volantes para projetos de precipitadores eletrostáticos.

Panwar NL, Kaushik SC et Kothari S. 2011. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 : 1513-1524.

Pawlowski L. 2008. The science and engineering of thermal spray coatings. John Wiley & Sons, 626 p.

Riffat SB et Ma X. 2003. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, 23 : 913-935.

Rio Tinto. 2022. Rio Tinto climate change report 2022 [Press release]. Rio Tinto, <https://www.riotinto.com/sustainability/climate-change#:~:text=Our%20goals,and%20by%2050%25%20by%202030>, p. 46.

Roth E. 2004. Why thermal power plants have a relatively low efficiency. Efficiency of thermal power plants.

Sami SM. 2010. Energy and exergy analysis of new refrigerant mixtures in an Organic Rankine Cycle for low temperature power generation. *International Journal of Ambient Energy*, 31 : 23-32.

Schlamadinger B, Apps M, Bohlin F, Gustavsson L, Jungmeier G, Marland G, Pingoud K et Savolainen I. 1997. Towards a standard methodology for greenhouse gas balances of bioenergy systems in comparison with fossil energy systems. *Biomass and Bioenergy*, 13 : 359-375.

Siddique ARM, Mahmud S et Heyst BV. 2017. A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their existing challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73 : 730-744.

Snyder G et Toberer E. 2008. Complex thermoelectric materials. *Nature materials*, 7 : 105-114.

Sorhuus A, Ose S et Wedde G. 2013. AHEx- a new, combined waste heat recovery and emission control system for anode bake furnaces. *Light Metals*, p. 1323-1328.

Souza RPD et Machado AF. 1976. Balanço térmico de um forno de pelotização de minério de ferro hematítico. *ABM - Associação Brasileira de Minérios*, 32.

statistics Weba. 2020. Explore energy data by category, indicator, country or region. Consulté le 19 septembre 2021, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource>

Sustainable Development Commission. 2016. The role of nuclear power in a low carbon economy. Paper 1: An introduction to nuclear power – science, technology and UK policy context. An evidence-based report by the Sustainable Development Commission.

Tejero-Martin D, Rezvani Rad M, McDonald A et Hussain T. 2019. Beyond Traditional Coatings: A Review on Thermal-Sprayed Functional and Smart Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28 : 598-644.

Thomazini AD. 2021. Modelagem e simulação da degradação de pelotas verdes de minério de ferro em operações de pelotização pelo método de elementos discretos., Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Tie SF et Tan CW. 2013. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20 : 82-102.

Tremblay D, Fortier F, Boucher J-F, Riffon O et Villeneuve C. 2020. Sustainable development goal interactions: An analysis based on the five pillars of the 2030 agenda. *Sustainable Development*, 28.

Tugsataydin. 2020. An introduction to the galvanic series: Galvanic compatibility and corrosion. Consulté le 2022/03/06, <https://www.corrosionpedia.com/an-introduction-to-the-galvanic-series-galvanic-compatibility-and-corrosion/2/1403>

Twidell J. 2006. Energy Policy, 34 : 1094-1095.

USGS. 2018. A coal-fired thermoelectric power plant. . Consulté le 16 juillet 2021, https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/a-coal-fired-thermoelectric-power-plant?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

Vale. 2021. Climate change report 2021 [Press release]. Vale, https://vale.com/documents/d/guest/vale_cc_2021-en, p. 51.

Vale. 2022. Integrated report 2022 [Press release]. Vale, https://vale.com/documents/d/guest/vale_relatointegrado2022-en-final-1, p. 55-57.

Vale. 2023 (mis à jour le 16 mars 2023). Vale produz, pela primeira vez, pelotas a partir de fontes renováveis. Consulté le 16 mai 2023, <https://www.vale.com/pt/w/vale-produz-pela-primeira-vez-pelotas-a-partir-de-fontes-renovaveis>

Villeneuve C. 2016. Le programme de développement durable à l'horizon 2030 - Enjeux et défis de mise en oeuvre. INSTITUT DE LA FRANCOPHONIE POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE, Liason Energie - Francophonie, p. 127.

Wikipedia. 2022 (mis à jour le 2022/03/24). Thermopile. Consulté le 2023/04/02, <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermopile>

Wikipedia. 2023 (mis à jour le 2023/05/03). Thermocouple. Consulté le 2023/05/28, <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple>

Yu M, Gudjonsdottir MS, Valdimarsson P et Saevarsdottir G. 2018. Waste heat recovery from aluminum production. Dans : Energy Technology 2018. p. 165-178.

Zaferani SH, Jafarian M, Vashaee D et Ghomashchi R. 2021. Thermal management systems and waste heat recycling by thermoelectric generators - An overview. Energies, 14.

Zhang T. 2020. Methods of improving the efficiency of thermal power plants. ECM - The Electrochemical Society.

Zierold KM et Odoh C. 2020. A review on fly ash from coal-fired power plants: chemical composition, regulations, and health evidence. Reviews on Environmental Health, 35 : 401-418.

ANNEXE 1

LIBELLÉS DES CIBLES DES OBJECTIFS DE DEVELOPPEMENT DURABLE DU PROGRAMME 2030 DES NATIONS UNIES (2015).

Objectif	Description
1	Éliminer la pauvreté sous toutes ses formes et partout dans le monde
1.1	D'ici à 2030, éliminer complètement l'extrême pauvreté dans le monde entier (s'entend actuellement du fait de vivre avec moins de 1,90 dollar américain par jour)
1.2	D'ici à 2030, réduire de moitié au moins la proportion d'hommes, de femmes et d'enfants de tous âges souffrant d'une forme ou l'autre de pauvreté, telle que définie par chaque pays
1.3	Mettre en place des systèmes et mesures de protection sociale pour tous, adaptés au contexte national, y compris des socles de protection sociale, et faire en sorte que, d'ici à 2030, une part importante des pauvres et des personnes vulnérables en bénéficient
1.4	D'ici à 2030, faire en sorte que tous les hommes et les femmes, en particulier les pauvres et les personnes vulnérables, aient les mêmes droits aux ressources économiques et qu'ils aient accès aux services de base, à la propriété foncière, au contrôle des terres et à d'autres formes de propriété, à l'héritage, aux ressources naturelles et à des nouvelles technologies et des services financiers adaptés à leurs besoins, y compris la microfinance
1.5	D'ici à 2030, renforcer la résilience des pauvres et des personnes en situation vulnérable et réduire leur exposition aux phénomènes climatiques extrêmes et à d'autres chocs et catastrophes d'ordre économique, social ou environnemental et leur vulnérabilité
1.a	Garantir une mobilisation importante de ressources provenant de sources multiples, y compris par le renforcement de la coopération pour le développement, afin de doter les pays en développement, en

	particulier les pays les moins avancés, de moyens adéquats et prévisibles de mettre en œuvre des programmes et politiques visant à mettre fin à la pauvreté sous toutes ses formes
1.b	Mettre en place aux niveaux national, régional et international des cadres d'action viables, fondés sur des stratégies de développement favorables aux pauvres et soucieuses de la problématique hommes-femmes, afin d'accélérer l'investissement dans des mesures d'élimination de la pauvreté
2	Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable
2.1	D'ici à 2030, éliminer la faim et faire en sorte que chacun, en particulier les pauvres et les personnes en situation vulnérable, y compris les nourrissons, ait accès tout au long de l'année à une alimentation saine, nutritive et suffisante
2.2	D'ici à 2030, mettre fin à toutes les formes de malnutrition, y compris en réalisant d'ici à 2025 les objectifs arrêtés à l'échelle internationale relatifs aux retards de croissance et à l'émaciation parmi les enfants de moins de 5 ans, et répondre aux besoins nutritionnels des adolescentes, des femmes enceintes ou allaitantes et des personnes âgées
2.3	D'ici à 2030, doubler la productivité agricole et les revenus des petits producteurs alimentaires, en particulier les femmes, les autochtones, les exploitants familiaux, les éleveurs et les pêcheurs, y compris en assurant l'égalité d'accès aux terres, aux autres ressources productives et intrants, au savoir, aux services financiers, aux marchés et aux possibilités d'ajout de valeur et d'emploi autres qu'agricoles
2.4	D'ici à 2030, assurer la viabilité des systèmes de production alimentaire et mettre en œuvre des pratiques agricoles résilientes qui permettent d'accroître la productivité et la production, contribuent à la préservation des écosystèmes, renforcent les capacités d'adaptation aux changements climatiques, aux phénomènes météorologiques extrêmes,

	à la sécheresse, aux inondations et à d'autres catastrophes et améliorent progressivement la qualité des terres et des sols
2.5	D'ici à 2020, préserver la diversité génétique des semences, des cultures et des animaux d'élevage ou domestiqués et des espèces sauvages apparentées, y compris au moyen de banques de semences et de plantes bien gérées et diversifiées aux niveaux national, régional et international, et favoriser l'accès aux avantages que présentent l'utilisation des ressources génétiques et du savoir traditionnel associé et le partage juste et équitable de ces avantages, ainsi que cela a été décidé à l'échelle internationale
2.a	Accroître, notamment dans le cadre du renforcement de la coopération internationale, l'investissement en faveur de l'infrastructure rurale, des services de recherche et de vulgarisation agricoles et de la mise au point de technologies et de banques de gènes de plantes et d'animaux d'élevage, afin de renforcer les capacités productives agricoles des pays en développement, en particulier des pays les moins avancés
2.b	Corriger et prévenir les restrictions et distorsions commerciales sur les marchés agricoles mondiaux, y compris par l'élimination parallèle de toutes les formes de subventions aux exportations agricoles et de toutes les mesures relatives aux exportations aux effets similaires, conformément au mandat du Cycle de développement de Doha
2.c	Adopter des mesures visant à assurer le bon fonctionnement des marchés de denrées alimentaires et des produits dérivés et faciliter l'accès rapide aux informations relatives aux marchés, y compris les réserves alimentaires, afin de contribuer à limiter l'extrême volatilité du prix des denrées alimentaires
3	Permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge
3.1	D'ici à 2030, faire passer le taux mondial de mortalité maternelle au-dessous de 70 pour 100 000 naissances vivantes

3.2	D'ici à 2030, éliminer les décès évitables de nouveau-nés et d'enfants de moins de 5 ans, tous les pays devant chercher à ramener la mortalité néonatale à 12 pour 1 000 naissances vivantes au plus et la mortalité des enfants de moins de 5 ans à 25 pour 1 000 naissances vivantes au plus
3.3	D'ici à 2030, mettre fin à l'épidémie de sida, à la tuberculose, au paludisme et aux maladies tropicales négligées et combattre l'hépatite, les maladies transmises par l'eau et autres maladies transmissibles
3.4	D'ici à 2030, réduire d'un tiers, par la prévention et le traitement, le taux de mortalité prématurée due à des maladies non transmissibles et promouvoir la santé mentale et le bien-être
3.5	Renforcer la prévention et le traitement de l'abus de substances psychoactives, notamment de stupéfiants et d'alcool
3.6	D'ici à 2020, diminuer de moitié à l'échelle mondiale le nombre de décès et de blessures dus à des accidents de la route
3.7	D'ici à 2030, assurer l'accès de tous à des services de soins de santé sexuelle et procréative, y compris à des fins de planification familiale, d'information et d'éducation, et la prise en compte de la santé procréative dans les stratégies et programmes nationaux
3.8	Faire en sorte que chacun bénéficie d'une couverture sanitaire universelle, comprenant une protection contre les risques financiers et donnant accès à des services de santé essentiels de qualité et à des médicaments et vaccins essentiels sûrs, efficaces, de qualité et d'un coût abordable
3.9	D'ici à 2030, réduire nettement le nombre de décès et de maladies dus à des substances chimiques dangereuses, à la pollution et à la contamination de l'air, de l'eau et du sol
3.a	Renforcer dans tous les pays l'application de la Convention-cadre de l'Organisation mondiale de la Santé pour la lutte antitabac
3.b	Appuyer la recherche et la mise au point de vaccins et de médicaments contre les maladies, transmissibles ou non, qui touchent principalement

	les habitants des pays en développement, donner accès, à un coût abordable, à des médicaments et vaccins essentiels, conformément à la Déclaration de Doha sur l'Accord sur les ADPIC et la santé publique. Cette déclaration réaffirme le droit qu'ont les pays en développement de tirer pleinement parti des dispositions de l'Accord sur les aspects des droits de propriété intellectuelle qui touchent au commerce et à la marge de manœuvre nécessaire pour protéger la santé publique et, en particulier, assurer l'accès universel aux médicaments
3.c	Accroître considérablement le budget de la santé, le recrutement, le perfectionnement, la formation et le maintien en poste du personnel de santé dans les pays en développement, notamment dans les pays les moins avancés et les petits États insulaires en développement
3.d	Renforcer les moyens dont disposent tous les pays, en particulier les pays en développement en matière d'alerte rapide, de réduction des risques et de gestion des risques sanitaires nationaux et mondiaux
4	Assurer l'accès de tous à une éducation de qualité, sur un pied d'égalité, et promouvoir les possibilités d'apprentissage tout au long de la vie
4.1	D'ici à 2030, faire en sorte que toutes les filles et tous les garçons suivent, sur un pied d'égalité, un cycle complet d'enseignement primaire et secondaire gratuit et de qualité, qui débouche sur un apprentissage véritablement utile
4.2	D'ici à 2030, faire en sorte que toutes les filles et tous les garçons aient accès à des activités de développement et de soins de la petite enfance et à une éducation préscolaire de qualité qui les préparent à suivre un enseignement primaire
4.3	D'ici à 2030, faire en sorte que les femmes et les hommes aient tous accès dans des conditions d'égalité à un enseignement technique, professionnel ou tertiaire, y compris universitaire, de qualité et d'un coût abordable

4.4	D'ici à 2030, augmenter considérablement le nombre de jeunes et d'adultes disposant des compétences, notamment techniques et professionnelles, nécessaires à l'emploi, à l'obtention d'un travail décent et à l'entrepreneuriat
4.5	D'ici à 2030, éliminer les inégalités entre les sexes dans le domaine de l'éducation et assurer l'égalité d'accès des personnes vulnérables, y compris les personnes handicapées, les autochtones et les enfants en situation vulnérable, à tous les niveaux d'enseignement et de formation professionnelle
4.6	D'ici à 2030, veiller à ce que tous les jeunes et une proportion considérable d'adultes, hommes et femmes, sachent lire, écrire et compter
4.7	D'ici à 2030, faire en sorte que tous les élèves acquièrent les connaissances et compétences nécessaires pour promouvoir le développement durable, notamment par l'éducation en faveur du développement et de modes de vie durables, des droits de l'homme, de l'égalité des sexes, de la promotion d'une culture de paix et de non-violence, de la citoyenneté mondiale et de l'appréciation de la diversité culturelle et de la contribution de la culture au développement durable
4.a	Faire construire des établissements scolaires qui soient adaptés aux enfants, aux personnes handicapées et aux deux sexes ou adapter les établissements existants à cette fin et fournir un cadre d'apprentissage effectif qui soit sûr, exempt de violence et accessible à tous
4.b	D'ici à 2020, augmenter considérablement à l'échelle mondiale le nombre de bourses d'études offertes aux pays en développement, en particulier aux pays les moins avancés, aux petits États insulaires en développement et aux pays d'Afrique, pour financer le suivi d'études supérieures, y compris la formation professionnelle, les cursus informatiques, techniques et scientifiques et les études d'ingénieur, dans des pays développés et d'autres pays en développement

4.c	D'ici à 2030, accroître considérablement le nombre d'enseignants qualifiés, notamment au moyen de la coopération internationale pour la formation d'enseignants dans les pays en développement, surtout dans les pays les moins avancés et les petits États insulaires en développement
5	Parvenir à l'égalité des sexes et autonomiser toutes les femmes et les filles
5.1	Mettre fin, dans le monde entier, à toutes les formes de discrimination à l'égard des femmes et des filles
5.2	Éliminer de la vie publique et de la vie privée toutes les formes de violence faite aux femmes et aux filles, y compris la traite et l'exploitation sexuelle et d'autres types d'exploitation
5.3	Éliminer toutes les pratiques préjudiciables, telles que le mariage des enfants, le mariage précoce ou forcé et la mutilation génitale féminine
5.4	Faire une place aux soins et travaux domestiques non rémunérés et les valoriser, par l'apport de services publics, d'infrastructures et de politiques de protection sociale et la promotion du partage des responsabilités dans le ménage et la famille, en fonction du contexte national
5.5	Garantir la participation entière et effective des femmes et leur accès en toute égalité aux fonctions de direction à tous les niveaux de décision, dans la vie politique, économique et publique
5.6	Assurer l'accès de tous aux soins de santé sexuelle et procréative et faire en sorte que chacun puisse exercer ses droits en matière de procréation, ainsi qu'il a été décidé dans le Programme d'action de la Conférence internationale sur la population et le développement et le Programme d'action de Beijing et les documents finaux des conférences d'examen qui ont suivi
5.a	Entreprendre des réformes visant à donner aux femmes les mêmes droits aux ressources économiques, ainsi qu'à l'accès à la propriété et

	au contrôle des terres et d'autres formes de propriété, aux services financiers, à l'héritage et aux ressources naturelles, dans le respect du droit interne
5.b	Renforcer l'utilisation des technologies clefs, en particulier l'informatique et les communications, pour promouvoir l'autonomisation des femmes
5.c	Adopter des politiques bien conçues et des dispositions législatives applicables en faveur de la promotion de l'égalité des sexes et de l'autonomisation de toutes les femmes et de toutes les filles à tous les niveaux et renforcer celles qui existent
6	Garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable
6.1	D'ici à 2030, assurer l'accès universel et équitable à l'eau potable, à un coût abordable
6.2	D'ici à 2030, assurer l'accès de tous, dans des conditions équitables, à des services d'assainissement et d'hygiène adéquats et mettre fin à la défécation en plein air, en accordant une attention particulière aux besoins des femmes et des filles et des personnes en situation vulnérable
6.3	D'ici à 2030, améliorer la qualité de l'eau en réduisant la pollution, en éliminant l'immersion de déchets et en réduisant au minimum les émissions de produits chimiques et de matières dangereuses, en diminuant de moitié la proportion d'eaux usées non traitées et en augmentant considérablement à l'échelle mondiale le recyclage et la réutilisation sans danger de l'eau
6.4	D'ici à 2030, augmenter considérablement l'utilisation rationnelle des ressources en eau dans tous les secteurs et garantir la viabilité des retraits et de l'approvisionnement en eau douce afin de tenir compte de la pénurie d'eau et de réduire nettement le nombre de personnes qui souffrent du manque d'eau

6.5	D'ici à 2030, mettre en œuvre une gestion intégrée des ressources en eau à tous les niveaux, y compris au moyen de la coopération transfrontière
6.6	D'ici à 2020, protéger et restaurer les écosystèmes liés à l'eau, notamment les montagnes, les forêts, les zones humides, les rivières, les aquifères et les lacs
6.a	D'ici à 2030, développer la coopération internationale et l'appui au renforcement des capacités des pays en développement en ce qui concerne les activités et programmes relatifs à l'eau et à l'assainissement, y compris la collecte de l'eau, la désalinisation, l'utilisation rationnelle de l'eau, le traitement des eaux usées, le recyclage et les techniques de réutilisation
6.b	Appuyer et renforcer la participation de la population locale à l'amélioration de la gestion de l'eau et de l'assainissement
7	Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes, à un coût abordable
7.1	D'ici à 2030, garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables et modernes, à un coût abordable
7.2	D'ici à 2030, accroître nettement la part de l'énergie renouvelable dans le bouquet énergétique mondial
7.3	D'ici à 2030, multiplier par deux le taux mondial d'amélioration de l'efficacité énergétique
7.a	D'ici à 2030, renforcer la coopération internationale en vue de faciliter l'accès à la recherche et aux technologies relatives à l'énergie propre, notamment l'énergie renouvelable, l'efficacité énergétique et les nouvelles technologies relatives aux combustibles fossiles propres, et promouvoir l'investissement dans l'infrastructure énergétique et les technologies relatives à l'énergie propre
7.b	D'ici à 2030, développer les infrastructure et améliorer les technologies afin d'approvisionner en services énergétiques modernes et durables

	tous les habitants des pays en développement, en particulier des pays les moins avancés, des petits États insulaires en développement et des pays en développement sans littoral, dans le respect des programmes d'aide qui les concernent
8	Promouvoir une croissance économique soutenue, partagée et durable, le plein emploi productif et un travail décent pour tous
8.1	Maintenir un taux de croissance économique par habitant adapté au contexte national et, en particulier, un taux de croissance annuelle du produit intérieur brut d'au moins 7 % dans les pays les moins avancés.
8.2	Parvenir à un niveau élevé de productivité économique par la diversification, la modernisation technologique et l'innovation, notamment en mettant l'accent sur les secteurs à forte valeur ajoutée et à forte intensité de main-d'œuvre.
8.3	Promouvoir des politiques axées sur le développement qui favorisent des activités productives, la création d'emplois décents, l'entrepreneuriat, la créativité et l'innovation et stimulent la croissance des microentreprises et des petites et moyennes entreprises et facilitent leur intégration dans le secteur formel, y compris par l'accès aux services financiers.
8.4	Améliorer progressivement, jusqu'en 2030, l'efficacité de l'utilisation des ressources mondiales du point de vue de la consommation comme de la production et s'attacher à ce que la croissance économique n'entraîne plus la dégradation de l'environnement, comme prévu dans le cadre décennal de programmation relatif à la consommation et à la production durables, les pays développés montrant l'exemple en la matière.
8.5	D'ici à 2030, parvenir au plein emploi productif et garantir à toutes les femmes et à tous les hommes, y compris les jeunes et les personnes handicapées, un travail décent et un salaire égal pour un travail de valeur égale.

8.6	D'ici à 2020, réduire considérablement la proportion de jeunes non scolarisés et sans emploi ni formation.
8.7	Prendre des mesures immédiates et efficaces pour supprimer le travail forcé, mettre fin à l'esclavage moderne et à la traite d'êtres humains, interdire et éliminer les pires formes de travail des enfants, y compris le recrutement et l'utilisation d'enfants soldats et, d'ici à 2025, mettre fin au travail des enfants sous toutes ses formes.
8.8	Défendre les droits des travailleurs, promouvoir la sécurité sur le lieu de travail et assurer la protection de tous les travailleurs, y compris les migrants, en particulier les femmes, et ceux qui ont un emploi précaire.
8.9	D'ici à 2030, élaborer et mettre en œuvre des politiques visant à développer un tourisme durable qui crée des emplois et mette en valeur la culture et les produits locaux.
8.10	Renforcer la capacité des institutions financières nationales de favoriser et généraliser l'accès de tous aux services bancaires et financiers et aux services d'assurance
8.a	Accroître l'appui apporté dans le cadre de l'initiative Aide pour le commerce aux pays en développement, en particulier aux pays les moins avancés, y compris par l'intermédiaire du cadre intégré renforcé pour l'assistance technique liée au commerce en faveur des pays les moins avancés.
8.b	D'ici à 2020, élaborer et mettre en œuvre une stratégie mondiale en faveur de l'emploi des jeunes et appliquer le Pacte mondial pour l'emploi de l'Organisation internationale du Travail.
9	Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation
9.1	Mettre en place une infrastructure de qualité, fiable, durable et résiliente, y compris une infrastructure régionale et transfrontière, pour favoriser le développement économique et le bien-être de l'être humain,

	en mettant l'accent sur un accès universel, à un coût abordable et dans des conditions d'équité.
9.2	Promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et, d'ici à 2030, augmenter nettement la contribution de l'industrie à l'emploi et au produit intérieur brut, en fonction du contexte national, et la multiplier par deux dans les pays les moins avancés.
9.3	Accroître, en particulier dans les pays en développement, l'accès des entreprises, notamment des petites entreprises industrielles, aux services financiers, y compris aux prêts consentis à des conditions abordables, et leur intégration dans les chaînes de valeur et sur les marchés.
9.4	D'ici à 2030, moderniser l'infrastructure et adapter les industries afin de les rendre durables, par une utilisation plus rationnelle des ressources et un recours accru aux technologies et procédés industriels propres et respectueux de l'environnement, chaque pays agissant dans la mesure de ses moyens.
9.5	Renforcer la recherche scientifique, perfectionner les capacités technologiques des secteurs industriels de tous les pays, en particulier des pays en développement, notamment en encourageant l'innovation et en augmentant considérablement le nombre de personnes travaillant dans le secteur de la recherche et du développement pour 1 million d'habitants et en accroissant les dépenses publiques et privées consacrées à la recherche et au développement d'ici à 2030.
9.a	Faciliter la mise en place d'une infrastructure durable et résiliente dans les pays en développement en renforçant l'appui financier, technologique et technique apporté aux pays d'Afrique, aux pays les moins avancés, aux pays en développement sans littoral et aux petits États insulaires en développement.
9.b	Soutenir la recherche, le développement et l'innovation technologique au niveau national dans les pays en développement, notamment en

	instaurant des conditions propices telles que la diversification industrielle et l'ajout de valeur aux marchandises.
9.c	Accroître nettement l'accès aux technologies de l'information et de la communication et faire en sorte que tous les habitants des pays les moins avancés aient accès à Internet à un coût abordable d'ici à 2020.
10	Réduire les inégalités dans les pays et d'un pays à l'autre
10.1	D'ici à 2030, faire en sorte, au moyen d'améliorations progressives, que les revenus des 40 pour cent les plus pauvres de la population augmentent plus rapidement que le revenu moyen national, et ce de manière durable
10.2	D'ici à 2030, autonomiser toutes les personnes et favoriser leur intégration sociale, économique et politique, indépendamment de leur âge, de leur sexe, de leur handicap, de leur race, de leur appartenance ethnique, de leurs origines, de leur religion ou de leur statut économique ou autre
10.3	Assurer l'égalité des chances et réduire l'inégalité des résultats, notamment en éliminant les lois, politiques et pratiques discriminatoires et en promouvant l'adoption de lois, politiques et mesures adéquates en la matière
10.4	Adopter des politiques, notamment sur les plans budgétaire, salarial et dans le domaine de la protection sociale, et parvenir progressivement à une plus grande égalité
10.5	Améliorer la réglementation et la surveillance des institutions et marchés financiers mondiaux et renforcer l'application des règles
10.6	Faire en sorte que les pays en développement soient davantage représentés et entendus lors de la prise de décisions dans les institutions économiques et financières internationales, afin que celles-ci soient plus efficaces, crédibles, transparentes et légitimes

10.7	Faciliter la migration et la mobilité de façon ordonnée, sans danger, régulière et responsable, notamment par la mise en œuvre de politiques de migration planifiées et bien gérées
10.a	Mettre en œuvre le principe d'un traitement spécial et différencié pour les pays en développement, en particulier les pays les moins avancés, conformément aux accords de l'Organisation mondiale du commerce
10.b	Stimuler l'aide publique au développement et les flux financiers, y compris les investissements étrangers directs, pour les États qui en ont le plus besoin, en particulier les pays les moins avancés, les pays d'Afrique, les petits États insulaires en développement et les pays en développement sans littoral, conformément à leurs plans et programmes nationaux
10.c	D'ici à 2030, faire baisser au-dessous de 3 pour cent les coûts de transaction des envois de fonds effectués par les migrants et éliminer les couloirs de transfert de fonds dont les coûts sont supérieurs à 5 pour cent
11	Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables
11.1	D'ici à 2030, assurer l'accès de tous à un logement et des services de base adéquats et sûrs, à un coût abordable, et assainir les quartiers de taudis.
11.2	D'ici à 2030, assurer l'accès de tous à des systèmes de transport sûrs, accessibles et viables, à un coût abordable, en améliorant la sécurité routière, notamment en développant les transports publics, une attention particulière devant être accordée aux besoins des personnes en situation vulnérable, des femmes, des enfants, des personnes handicapées et des personnes âgées.
11.3	D'ici à 2030, renforcer l'urbanisation inclusive et durable pour tous et les capacités de planification et de gestion participatives, intégrées et durables des établissements humains dans tous les pays.

11.4	Renforcer les efforts de protection et de préservation du patrimoine culturel et naturel mondial.
11.5	D'ici à 2030, réduire considérablement le nombre de personnes tuées et le nombre de personnes touchées par les catastrophes, y compris celles d'origine hydrique, et réduire considérablement le montant des pertes économiques qui sont dues directement à ces catastrophes exprimé en proportion du produit intérieur brut mondial, l'accent étant mis sur la protection des pauvres et des personnes en situation vulnérable.
11.6	D'ici à 2030, réduire l'impact environnemental négatif des villes par habitant, en accordant une attention particulière à la qualité de l'air et à la gestion, notamment municipale, des déchets.
11.7	D'ici à 2030, assurer l'accès de tous, en particulier des femmes et des enfants, des personnes âgées et des personnes handicapées, à des espaces verts et des espaces publics sûrs.
11.a	Favoriser l'établissement de liens économiques, sociaux et environnementaux positifs entre zones urbaines, périurbaines et rurales en renforçant la planification du développement à l'échelle nationale et régionale.
11.b	D'ici 2020, accroître considérablement le nombre de villes et d'établissements humains qui adoptent et mettent en œuvre des politiques et plans d'action intégrés en faveur de l'insertion de tous, de l'utilisation rationnelle des ressources, de l'adaptation aux effets des changements climatiques et de leur atténuation et de la résilience face aux catastrophes, et élaborer et mettre en œuvre, conformément au Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe (2015-2030), une gestion globale des risques de catastrophe à tous les niveaux.
11.c	Aider les pays les moins avancés, y compris par une assistance financière et technique, à construire des bâtiments durables et résilients en utilisant des matériaux locaux.

12	Établir des modes de consommation et de production durables
12.1	Mettre en œuvre le Cadre décennal de programmation concernant les modes de consommation et de production durables avec la participation de tous les pays, les pays développés montrant l'exemple en la matière, compte tenu du degré de développement et des capacités des pays en développement
12.2	D'ici à 2030, parvenir à une gestion durable et à une utilisation rationnelle des ressources naturelles
12.3	D'ici à 2030, réduire de moitié à l'échelle mondiale le volume de déchets alimentaires par habitant au niveau de la distribution comme de la consommation et réduire les pertes de produits alimentaires tout au long des chaînes de production et d'approvisionnement, y compris les pertes après récolte
12.4	D'ici à 2020, instaurer une gestion écologiquement rationnelle des produits chimiques et de tous les déchets tout au long de leur cycle de vie, conformément aux principes directeurs arrêtés à l'échelle internationale, et réduire considérablement leur déversement dans l'air, l'eau et le sol, afin de minimiser leurs effets négatifs sur la santé et l'environnement
12.5	D'ici à 2030, réduire considérablement la production de déchets par la prévention, la réduction, le recyclage et la réutilisation
12.6	Encourager les entreprises, en particulier les grandes et les transnationales, à adopter des pratiques viables et à intégrer dans les rapports qu'elles établissent des informations sur la viabilité
12.7	Promouvoir des pratiques durables dans le cadre de la passation des marchés publics, conformément aux politiques et priorités nationales
12.8	D'ici à 2030, faire en sorte que toutes les personnes, partout dans le monde, aient les informations et connaissances nécessaires au développement durable et à un style de vie en harmonie avec la nature

12.a	Aider les pays en développement à se doter des moyens scientifiques et technologiques qui leur permettent de s'orienter vers des modes de consommation et de production plus durables
12.b	Mettre au point et utiliser des outils de contrôle des impacts sur le développement durable, pour un tourisme durable qui crée des emplois et met en valeur la culture et les produits locaux
12.c	Rationaliser les subventions aux combustibles fossiles qui sont source de gaspillage, en éliminant les distorsions du marché, selon le contexte national, y compris par la restructuration de la fiscalité et l'élimination progressive des subventions nuisibles, afin de mettre en évidence leur impact sur l'environnement, en tenant pleinement compte des besoins et de la situation propres aux pays en développement et en réduisant au minimum les éventuels effets pernicioeux sur le développement de ces pays tout en protégeant les pauvres et les collectivités concernées
13	Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions
13.1	Renforcer, dans tous les pays, la résilience et les capacités d'adaptation face aux aléas climatiques et aux catastrophes naturelles liées au climat
13.2	Incorporer des mesures relatives aux changements climatiques dans les politiques, les stratégies et la planification nationales
13.3	Améliorer l'éducation, la sensibilisation et les capacités individuelles et institutionnelles en ce qui concerne l'adaptation aux changements climatiques, l'atténuation de leurs effets et la réduction de leur impact et les systèmes d'alerte rapide
13.a	Mettre en œuvre l'engagement que les pays développés parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ont pris de mobiliser ensemble auprès de multiples sources 100 milliards de dollars des États-Unis par an d'ici à 2020 pour répondre aux besoins des pays en développement en ce qui concerne les mesures concrètes d'atténuation et la transparence de leur mise en œuvre et

	rendre le Fonds vert pour le climat pleinement opérationnel en le dotant dans les plus brefs délais des moyens financiers nécessaires
13.b	Promouvoir des mécanismes de renforcement des capacités afin que les pays les moins avancés et les petits États insulaires en développement se dotent de moyens efficaces de planification et de gestion pour faire face aux changements climatiques, l'accent étant mis notamment sur les femmes, les jeunes, la population locale et les groupes marginalisés
14	Conserver et exploiter de manière durable les océans, les mers et les ressources marines aux fins du développement durable
14.1	D'ici à 2025, prévenir et réduire nettement la pollution marine de tous types, en particulier celle résultant des activités terrestres, y compris les déchets en mer et la pollution par les nutriments
14.2	D'ici à 2020, gérer et protéger durablement les écosystèmes marins et côtiers, notamment en renforçant leur résilience, afin d'éviter les graves conséquences de leur dégradation et prendre des mesures en faveur de leur restauration pour rétablir la santé et la productivité des océans
14.3	Réduire au maximum l'acidification des océans et lutter contre ses effets, notamment en renforçant la coopération scientifique à tous les niveaux
14.4	D'ici à 2020, réglementer efficacement la pêche, mettre un terme à la surpêche, à la pêche illicite, non déclarée et non réglementée et aux pratiques de pêche destructrices et exécuter des plans de gestion fondés sur des données scientifiques, l'objectif étant de rétablir les stocks de poissons le plus rapidement possible, au moins à des niveaux permettant d'obtenir un rendement constant maximal compte tenu des caractéristiques biologiques
14.5	D'ici à 2020, préserver au moins 10 % des zones marines et côtières, conformément au droit national et international et compte tenu des meilleures informations scientifiques disponibles

14.6	D'ici à 2020, interdire les subventions à la pêche qui contribuent à la surcapacité et à la surpêche, supprimer celles qui favorisent la pêche illicite, non déclarée et non réglementée et s'abstenir d'en accorder de nouvelles, sachant que l'octroi d'un traitement spécial et différencié efficace et approprié aux pays en développement et aux pays les moins avancés doit faire partie intégrante des négociations sur les subventions à la pêche menées dans le cadre de l'Organisation mondiale du commerce
14.7	D'ici à 2030, faire mieux bénéficier les petits États insulaires en développement et les pays les moins avancés des retombées économiques de l'exploitation durable des ressources marines, notamment grâce à une gestion durable des pêches, de l'aquaculture et du tourisme
14.a	Approfondir les connaissances scientifiques, renforcer les capacités de recherche et transférer les techniques marines, conformément aux Critères et principes directeurs de la Commission océanographique intergouvernementale concernant le transfert de techniques marines, l'objectif étant d'améliorer la santé des océans et de renforcer la contribution de la biodiversité marine au développement des pays en développement, en particulier des petits États insulaires en développement et des pays les moins avancés
14.b	Garantir aux petits pêcheurs l'accès aux ressources marines et aux marchés
14.c	Améliorer la conservation des océans et de leurs ressources et les exploiter de manière plus durable en application des dispositions du droit international, énoncées dans la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer, qui fournit le cadre juridique requis pour la conservation et l'exploitation durable des océans et de leurs ressources, comme il est rappelé au paragraphe 158 de « L'avenir que nous voulons »

15	Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon durable, gérer durablement les forêts, lutter contre la désertification, enrayer et inverser le processus de dégradation des sols et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité
15.1	D'ici à 2020, garantir la préservation, la restauration et l'exploitation durable des écosystèmes terrestres et des écosystèmes d'eau douce et des services connexes, en particulier les forêts, les zones humides, les montagnes et les zones arides, conformément aux obligations découlant des accords internationaux
15.2	D'ici à 2020, promouvoir la gestion durable de tous les types de forêt, mettre un terme à la déforestation, restaurer les forêts dégradées et accroître considérablement le boisement et le reboisement au niveau mondial
15.3	D'ici à 2030, lutter contre la désertification, restaurer les terres et sols dégradés, notamment les terres touchées par la désertification, la sécheresse et les inondations, et s'efforcer de parvenir à un monde neutre en matière de dégradation des terres.
15.4	D'ici à 2030, assurer la préservation des écosystèmes montagneux, notamment de leur biodiversité, afin de mieux tirer parti de leurs bienfaits essentiels pour le développement durable
15.5	Prendre d'urgence des mesures énergiques pour réduire la dégradation du milieu naturel, mettre un terme à l'appauvrissement de la biodiversité et, d'ici à 2020, protéger les espèces menacées et prévenir leur extinction
15.6	Favoriser le partage juste et équitable des bénéfices découlant de l'utilisation des ressources génétiques et promouvoir un accès approprié à celles-ci, ainsi que cela a été décidé à l'échelle internationale
15.7	Prendre d'urgence des mesures pour mettre un terme au braconnage et au trafic d'espèces végétales et animales protégées et s'attaquer au problème sous l'angle de l'offre et de la demande

15.8	D'ici à 2020, prendre des mesures pour empêcher l'introduction d'espèces exotiques envahissantes, atténuer sensiblement les effets que ces espèces ont sur les écosystèmes terrestres et aquatiques et contrôler ou éradiquer les espèces prioritaires
15.9	D'ici à 2020, intégrer la protection des écosystèmes et de la biodiversité dans la planification nationale, dans les mécanismes de développement, dans les stratégies de réduction de la pauvreté et dans la comptabilité
15.a	Mobiliser des ressources financières de toutes provenances et les augmenter nettement pour préserver la biodiversité et les écosystèmes et les exploiter durablement
15.b	Mobiliser d'importantes ressources de toutes provenances et à tous les niveaux pour financer la gestion durable des forêts et inciter les pays en développement à privilégier ce type de gestion, notamment aux fins de la préservation des forêts et du reboisement
15.c	Apporter, à l'échelon mondial, un soutien accru à l'action menée pour lutter contre le braconnage et le trafic d'espèces protégées, notamment en donnant aux populations locales d'autres moyens d'assurer durablement leur subsistance
16	Promouvoir l'avènement de sociétés pacifiques et inclusives aux fins du développement durable, assurer l'accès de tous à la justice et mettre en place, à tous les niveaux, des institutions efficaces, responsables et ouvertes à tous
16.1	Réduire nettement, partout dans le monde, toutes les formes de violence et les taux de mortalité qui y sont associés
16.2	Mettre un terme à la maltraitance, à l'exploitation et à la traite, et à toutes les formes de violence et de torture dont sont victimes les enfants
16.3	Promouvoir l'état de droit aux niveaux national et international et donner à tous accès à la justice dans des conditions d'égalité

16.4	D'ici à 2030, réduire nettement les flux financiers illicites et le trafic d'armes, renforcer les activités de récupération et de restitution des biens volés et lutter contre toutes les formes de criminalité organisée
16.5	Réduire nettement la corruption et la pratique des pots-de-vin sous toutes leurs formes
16.6	Mettre en place des institutions efficaces, responsables et transparentes à tous les niveaux
16.7	Faire en sorte que le dynamisme, l'ouverture, la participation et la représentation à tous les niveaux caractérisent la prise de décisions
16.8	Élargir et renforcer la participation des pays en développement aux institutions chargées de la gouvernance au niveau mondial
16.9	D'ici à 2030, garantir à tous une identité juridique, notamment grâce à l'enregistrement des naissances
16.10	Garantir l'accès public à l'information et protéger les libertés fondamentales, conformément à la législation nationale et aux accords internationaux
16.a	Appuyer, notamment dans le cadre de la coopération internationale, les institutions nationales chargées de renforcer, à tous les niveaux, les moyens de prévenir la violence et de lutter contre le terrorisme et la criminalité, en particulier dans les pays en développement
16.b	Promouvoir et appliquer des lois et politiques non discriminatoires pour le développement durable
17	Renforcer les moyens de mettre en œuvre le Partenariat mondial pour le développement et le revitaliser.
17.1	Améliorer, notamment grâce à l'aide internationale aux pays en développement, la mobilisation de ressources nationales en vue de renforcer les capacités nationales de collecte de l'impôt et d'autres recettes
17.2	Faire en sorte que les pays développés honorent tous leurs engagements en matière d'aide publique au développement, notamment celui pris par

	nombre d'entre eux de consacrer 0,7% de leur revenu national brut à l'aide aux pays en développement et entre 0,15% et 0,20% à l'aide aux pays les moins avancés, les bailleurs de fonds étant encouragés à envisager de se fixer pour objectif de consacrer au moins 0,20% de leur revenu national brut à l'aide aux pays les moins avancés
17.3	Mobiliser des ressources financières supplémentaires de diverses provenances en faveur des pays en développement
17.4	Aider les pays en développement à assurer la viabilité à long terme de leur dette au moyen de politiques concertées visant à favoriser le financement de la dette, son allègement ou sa restructuration, selon le cas, et réduire le surendettement en réglant le problème de la dette extérieure des pays pauvres très endettés
17.5	Adopter et mettre en œuvre des dispositifs visant à encourager l'investissement en faveur des pays les moins avancés
17.6	Renforcer l'accès à la science, à la technologie et à l'innovation et la coopération Nord-Sud et Sud-Sud et la coopération triangulaire régionale et internationale dans ces domaines et améliorer le partage des savoirs selon des modalités arrêtées d'un commun accord, notamment en coordonnant mieux les mécanismes existants, en particulier au niveau des organismes des Nations unies, et dans le cadre d'un mécanisme mondial de facilitation des technologies
17.7	Promouvoir la mise au point, le transfert et la diffusion de technologies respectueuses de l'environnement en faveur des pays en développement, à des conditions favorables, y compris privilégiées et préférentielles, arrêtées d'un commun accord
17.8	Faire en sorte que la banque de technologies et le mécanisme de renforcement des capacités scientifiques et technologiques et des capacités d'innovation des pays les moins avancés soient pleinement opérationnels d'ici à 2017 et renforcer l'utilisation des technologies clefs, en particulier de l'informatique et des communications

17.9	Apporter, à l'échelon international, un soutien accru pour assurer le renforcement efficace et ciblé des capacités des pays en développement et appuyer ainsi les plans nationaux visant à atteindre tous les objectifs de développement durable, notamment dans le cadre de la coopération Nord-Sud et Sud-Sud et de la coopération triangulaire
17.10	Promouvoir un système commercial multilatéral universel, réglementé, ouvert, non discriminatoire et équitable sous l'égide de l'Organisation mondiale du commerce, notamment grâce à la tenue de négociations dans le cadre du Programme de Doha pour le développement
17.11	Accroître nettement les exportations des pays en développement, en particulier en vue de doubler la part des pays les moins avancés dans les exportations mondiales d'ici à 2020
17.12	Permettre l'accès rapide de tous les pays les moins avancés aux marchés en franchise de droits et sans contingent, conformément aux décisions de l'Organisation mondiale du commerce, notamment en veillant à ce que les règles préférentielles applicables aux importations provenant des pays les moins avancés soient transparentes et simples et facilitent l'accès aux marchés
17.13	Renforcer la stabilité macroéconomique mondiale, notamment en favorisant la coordination et la cohérence des politiques
17.14	Renforcer la cohérence des politiques de développement durable
17.15	Respecter la marge de manœuvre et l'autorité de chaque pays en ce qui concerne l'élaboration et l'application des politiques d'élimination de la pauvreté et de développement durable
17.16	Renforcer le Partenariat mondial pour le développement durable, associé à des partenariats multipartites permettant de mobiliser et de partager des savoirs, des connaissances spécialisées, des technologies et des ressources financières, afin d'aider tous les pays, en particulier les pays en développement, à atteindre les objectifs de développement durable

17.17	Encourager et promouvoir les partenariats publics, les partenariats public-privé et les partenariats avec la société civile, en faisant fond sur l'expérience acquise et les stratégies de financement appliquées en la matière
17.18	D'ici à 2020, apporter un soutien accru au renforcement des capacités des pays en développement, notamment des pays les moins avancés et des petits États insulaires en développement, l'objectif étant de disposer d'un beaucoup plus grand nombre de données de qualité, actualisées et exactes, ventilées par niveau de revenu, sexe, âge, race, appartenance ethnique, statut migratoire, handicap et emplacement géographique, et selon d'autres caractéristiques propres à chaque pays
17.19	D'ici à 2030, tirer parti des initiatives existantes pour établir des indicateurs de progrès en matière de développement durable qui viendraient compléter le produit intérieur brut, et appuyer le renforcement des capacités statistiques des pays en développement