



# **Gestion de l'énergie dans les systèmes de production : évaluation et application des pratiques énergétiques dans l'industrie forestière**

**Mémoire**

**Thomas Antonio Hernandez Gutierrez**

**Maîtrise en génie mécanique - avec mémoire**  
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

# **Gestion de l'énergie dans les systèmes de production : évaluation et application des pratiques énergétiques dans l'industrie forestière**

**Mémoire**

**Thomas Antonio Hernández Gutiérrez**

Sous la direction de :

Nadia Lehoux, directrice de recherche  
Louis Gosselin, codirecteur de recherche

# Résumé

La lutte contre les changements climatiques est au cœur des préoccupations du 21<sup>e</sup> siècle. Pour faire face à cet enjeu, tous les secteurs d'activité doivent être alignés sur les principes du développement durable. L'industrie forestière, figurant parmi les plus énergivores au monde, doit adopter des stratégies lui permettant de réduire ses émissions de GES, d'améliorer son efficacité énergétique et de continuer à se développer de manière durable. La mise en œuvre de systèmes de gestion de l'énergie s'inscrit dans cette équation. Ainsi, cette industrie doit tirer profit de l'industrie 4.0 qui digitalise l'ensemble des pratiques opérationnelles des organisations. C'est dans ce contexte que prend place ce mémoire qui vise à promouvoir les pratiques de gestion de l'énergie au sein des processus de production de l'industrie forestière, en particulier dans les scieries. Pour y arriver, une revue de la littérature a d'abord été réalisée en vue de définir les principales dimensions de la gestion de l'énergie qui soutiennent la mise en œuvre d'un système de gestion de l'énergie dans les systèmes de production d'une organisation. Par la suite, la deuxième étape de la recherche a consisté à créer un cadre d'analyse dimensionnel afin d'évaluer le degré de maturité énergétique de l'industrie forestière dans le monde, et d'identifier les stratégies de sa transition énergétique la conduisant vers un développement plus durable. Dans la dernière étape de la recherche, deux scénarios d'analyse ont été élaborés pour les scieries du sous-secteur des produits du bois, dans le but de représenter les différentes actions, indicateurs de performance énergétique, stratégies, contrôles et méthodes pouvant être utilisés pour surveiller la performance énergétique des opérations lorsque le niveau d'accès à l'information diffère entre chaque scierie. Cette dernière étape du projet a permis de constater qu'en fonction du niveau d'accès à l'information, il est possible de choisir différents outils et méthodes de contrôle de l'énergie adaptés au contexte énergétique de chaque scierie et de définir différentes actions stratégiques. Ce mémoire propose donc un tour d'horizon visant à montrer l'application des approches de gestion de l'énergie dans l'industrie forestière. Les outils développés sont des incitatifs pouvant être implantés au sein des entreprises. Les bénéfices permettront non seulement une meilleure gestion de l'énergie, mais également une réduction des impacts sur l'environnement.

# Abstract

The 21st century will be the century of the fight against climate change. To face this challenge, all business sectors must be aligned with the principles of sustainable development. The forest industry, one of the most energy-intensive in the world, must adopt strategies that allow it to reduce its GHG emissions, improve its energy efficiency and continue to develop in a sustainable way. The implementation of energy management systems fits into this equation. Similarly, this industry must take advantage of Industry 4.0 that is digitizing all operational practices of organizations. It is in this context that this research is carried out, which aims to promote energy management practices within the production processes of the forest industry, more particularly in sawmills. To achieve this, first a literature review was carried out in order to define the main dimensions of energy management that support the implementation of an energy management system in the production system of an organization. Subsequently, the second phase of the research consisted in creating a dimensional analysis framework in order to assess the energy maturity level of the forest industry in the world, and to identify the strategies of its energy transition leading it towards a more sustainable development. In the final phase of the research, two analysis scenarios were developed for the sawmills of the wood products subsector, in order to illustrate the different actions, energy performance indicators, strategies, controls and methods that can be used to control the energy efficiency of operations, when access to information differs between each sawmill. This last phase of the project made it possible to verify that depending on the level of access to information, it is possible to choose different tools and energy control methods adapted to the energy context of each sawmill and to define different strategic actions. Therefore, this research provides an overview intended to show the application of energy management approaches in the forest industry. The tools developed are incentives that can be implemented within companies. The benefits will not only allow better energy management, but also a reduction in environmental impacts.

# Table des matières

Résumé .....	ii
Abstract.....	iii
Table des matières .....	iv
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	viii
Liste des abréviations .....	ix
Remerciements.....	x
Avant-propos .....	xi
Introduction .....	1
Chapitre 1 : Revue de la littérature .....	7
1.1 Industrie forestière canadienne .....	7
1.2 Industrie des pâtes et papiers canadienne.....	9
1.3 Secteur de la fabrication de produits du bois canadien .....	10
1.4 Systèmes de GE.....	11
1.5 Modèles de maturité de la GE .....	12
1.6 Intégration du système de GE dans la structure organisationnelle .....	12
1.7 GE dans les systèmes de production .....	12
1.7.1 Standardisation : ISO 50001 .....	13
Chapitre 2 : Objectifs et méthodologie.....	14
Chapitre 3 : Portrait conceptuel de la gestion de l'énergie dans les systèmes de production .....	19
3.1 Résumé .....	20
3.2 Introduction.....	21
3.3 Revue de la littérature .....	22
3.3.1 Méthodologie de la recherche.....	22
3.3.2 Systèmes de GE .....	22
3.3.3 GE dans les systèmes de production.....	23
3.3.4 Intégration énergétique dans la structure organisationnelle.....	26
3.3.5 Modèles de maturité de la GE.....	27
3.4 Portrait de la GE .....	27
3.5 Conclusion.....	29
3.6 Références .....	30

Chapitre 4 : Évaluation des pratiques de gestion de l'énergie dans l'industrie forestière .....	32
4.1 Résumé .....	33
4.2 Abstract .....	34
4.3 Introduction.....	35
4.4 Revue de la littérature .....	36
4.4.1 Industrie des pâtes et papiers .....	36
4.4.2 Fabrication de produits du bois .....	36
4.4.3 GE dans l'industrie .....	37
4.5 Méthodologie.....	38
4.6 Portrait énergétique de l'industrie forestière .....	39
4.6.1 Situation énergétique de l'industrie forestière : Utilisation de l'énergie .....	40
4.6.2 Contrôle de la transition énergétique : Les moteurs de changement et les barrières .....	40
4.6.3 Incitatifs .....	41
4.6.4 Structure organisationnelle.....	45
4.6.5 GE au niveau opérationnel.....	46
4.6.6 Discussion des résultats .....	47
4.7 Conclusion.....	48
4.8 Références .....	49
Chapitre 5 : Development of an energy monitoring and control interface for the forest products industry .....	52
5.1 Résumé .....	53
5.2 Abstract .....	54
5.3 Introduction.....	55
5.4 Literature Review.....	56
5.4.1 EM practices in the forest products industry .....	56
5.4.2 EnPIs and its application to the forest products industry.....	57
5.4.3 Statistical control tools .....	59
5.5 Methodology .....	61
5.6 Case study .....	62
5.6.1 Strategic level analysis.....	65
5.6.2 Operational level analysis .....	67
5.7 Conclusion.....	70
5.8 Références .....	70
5.9 Biographies.....	72

Chapitre 6 : GE dans l'industrie des produits du bois: modèle d'évaluation basé sur la facture d'électricité et les pratiques d'efficacité énergétique du secteur.....	73
6.1 Méthodologie.....	73
6.1.1 Revue de la littérature.....	73
6.1.2 Simulation de l'étude.....	88
6.2 Étude de cas.....	88
6.2.1 Analyse comparative basée sur l'IEE.....	89
6.2.2 Évaluation des pratiques de GE et des mesures d'économie d'énergie .....	90
6.3 Conclusion.....	95
6.4 Références .....	96
Conclusion .....	99
Bibliographie.....	103

## Liste des figures

Figure 1. Méthodologie de la recherche .....	15
Figure 2. Éléments clés de la GE dans les systèmes de production .....	24
Figure 3. Portrait conceptuel d'un système de GE.....	28
Figure 4. Cadre d'analyse dimensionnel des pratiques de GE dans l'industrie forestière .....	39
Figure 5. Distribution of EnPIs at different decisional levels of an organization.....	58
Figure 6. Economic EnPIs and Energy control matrix.....	66
Figure 7. CUSUM map for the whole plant and related ECCs .....	67
Figure 8. Sawmill energy portrait (operational level).....	67
Figure 9. Regression analysis of the sawing process .....	68
Figure 10. CUSUM analysis of the sawing process .....	69
Figure 11. Residual analysis and target equation of the sawing process .....	69
Figure 12. Outils conçus pour évaluer la performance énergétique lorsque seule la facture d'électricité est disponible.....	74
Figure 13. Analyse comparative collaborative .....	90
Figure 14. Niveau de maturité des dimensions de la GE (scierie 1) .....	92
Figure 15. Analyse comparative entre les 4 scieries du même groupe industriel .....	93

## Liste des tableaux

Table 1. Overview of EnPIs created to evaluate energy performance in a sawmill at different organizational levels together with their main characteristics.....	65
Tableau 2. Liste de références des pratiques de GE.....	76
Tableau 3. Caractéristiques associées aux pratiques de GE .....	78
Tableau 4. Niveaux de maturité pour évaluer les progrès des pratiques de GE.....	81
Tableau 5. Carnet de bord générique de mesures d'économie d'énergie dans une scierie .....	85
Tableau 6. Évaluation du niveau de maturité actuel des pratiques de GE adoptées par la scierie 1.....	94

# Liste des abréviations

CEM : Clean Energy Ministerial

CVC : Chauffage, ventilation et climatisation

ECC : Energy cost center

EE : Energy efficiency

EIA : Energy Information Administration

EII : Indice d'intensité énergétique

EM : Energy management

EnPIs : indicateurs de performance énergétique

ESCOs : Entreprises de services énergétiques

GE : Gestion de l'énergie

GES : Gaz à effet de serre

IEA : International Energy Agency

IEE : Indice d'efficacité énergétique

ISO : International Organization for Standardization

MBF : Thousand board feet

MERN : Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles

MFFP : Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

MRNF : Ministère des Ressources naturelles et de la faune

PACC : Plan d'action sur les changements climatiques

PDCA : Plan-Do-Check-Act

PFE : Programme pour améliorer l'efficacité énergétique dans les industries à forte intensité énergétique

R&D : Recherche et développement

RNCan : Ressources Naturelles Canada

SCIAN : Système de classification des industries de l'Amérique du Nord

SEC : Consommation spécifique d'énergie

SFID : Swedish Forest Industries Federation

TIC : Technologies de l'information et de la communication

# Remerciements

Je souhaite remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent tout d'abord à Nadia Lehoux qui, en tant que directrice de cette maîtrise, a su me guider tout au long de ce parcours. Dès le début, la pertinence de ses observations et la justesse de ses interventions ont permis d'orienter les objectifs de la recherche. Sous sa gouverne et par ses précieux conseils, j'ai appris à me questionner, à pousser les réflexions toujours plus loin et à explorer des avenues méconnues. Par son oreille attentive, je suis toujours sorti de nos conversations la tête remplie d'idées.

Je tiens aussi à remercier Louis Gosselin, co-auteur avec Nadia Lehoux des trois articles scientifiques présentés dans ce mémoire. La réussite de cette recherche est teintée par ses conseils, sa disponibilité et son expertise. Je souligne également l'aide précieuse offerte par Caroline Cloutier qui s'est investie à polir et à faire briller chacun des articles scientifiques rédigés dans le cadre de la maîtrise.

Je remercie en outre toute l'équipe du consortium FORAC pour cette immersion dans le monde de la foresterie et pour m'avoir offert cette opportunité de me développer professionnellement, sans compter toute l'aide qu'ils m'ont apportée tout au long de mes études supérieures.

Enfin, je ne peux passer sous silence la source inépuisable d'encouragements et de motivation que ma famille et mes proches m'ont témoigné au cours de ces deux dernières années. Le contexte de la pandémie n'a fait qu'accentuer ces liens qui nous unissent, même en mode virtuel. Je leur dédie ce mémoire.

# Avant-propos

Ce travail intitulé « Gestion de l'énergie dans les systèmes de production : évaluation et application des pratiques énergétiques dans l'industrie forestière » est réalisé en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise en Génie Mécanique (MSc.) de l'Université Laval. Sous la direction de Mme Nadia Lehoux et la codirection de M. Louis Gosselin, ce mémoire s'établit au sein des travaux de recherche du Consortium FORAC.

Ce mémoire est rédigé selon le principe d'insertion d'articles avec trois articles de conférence coécrits avec Mme Nadia Lehoux et M. Louis Gosselin ainsi qu'un chapitre complémentaire portant sur un scénario alternatif lié au troisième article. En tant qu'auteur principal, j'ai mené l'ensemble de la recherche, de la rédaction, des travaux et des analyses à l'étude.

Le premier article intitulé « Portrait conceptuel de la gestion de l'énergie dans les systèmes de production » a été soumis le 30 mai 2020 à la conférence « *MOSIM : Modélisation, Optimisation et Simulation* » et présenté à la 13<sup>e</sup> édition en mode virtuel de cette conférence le 14 novembre 2020 à Agadir, Maroc. La version publiée est identique à la version présentée dans ce mémoire.

Le second article intitulé « Évaluation des pratiques de gestion de l'énergie dans l'industrie forestière » a été soumis le 27 novembre 2020 à la conférence « *CIGI QUALITA: Conférence Internationale Génie Industriel QUALITA* » et présenté à la 14<sup>e</sup> édition en mode virtuel de cette conférence le 6 mai 2021 à Grenoble, France. La version publiée est identique à la version présentée dans ce mémoire.

Le troisième article intitulé « Development of an energy monitoring and control interface for the forest products industry » a été soumis le 8 mai 2021 à la conférence « *IEOM : Industrial Engineering and Operation Management* » et sera présenté à la 4<sup>e</sup> édition européenne de cette conférence en mode virtuel du 2 au 5 août 2021 à Rome, Italie. La version publiée est identique à la version présentée dans ce mémoire.

Par souci de confidentialité, les données présentées dans l'étude sont fictives et ont été modifiées proportionnellement avec un coefficient mathématique. Aucun paramètre de fonctionnement ou de savoir-faire d'une scierie n'est présenté dans ce mémoire.

# Introduction

Le grand souci d'atténuer les effets négatifs du réchauffement planétaire, principalement causés par l'augmentation des gaz à effet de serre (GES), amène les décideurs de diverses industries à travers le monde à établir des stratégies énergétiques axées sur la mitigation des changements climatiques (Thollander *et al.*, 2020a). Par conséquent, pour réaliser des transformations énergétiques radicales permettant de résoudre ces problèmes, il est nécessaire d'améliorer l'efficacité énergétique (Ressources Naturelles Canada [RNCan], 2019a), notamment en modifiant les habitudes de consommation d'énergie et en réduisant l'utilisation des hydrocarbures fossiles (Whitmore et Pineau, 2020). De ce fait, la transition énergétique mondiale, dont l'objectif réside dans la décarbonisation, sera marquée par l'abandon imminent des combustibles émetteurs de carbone au profit de sources d'énergie plus propres qui permettent de réduire les émissions de GES (National Energy Board, 2019). Dans ce contexte, le secteur industriel joue un rôle clé dans le développement de ces stratégies énergétiques, la consommation d'énergie dans le monde ayant notamment été causée par la forte croissance industrielle des dernières années (International Energy Agency [IEA], 2020). En 2018, selon l'IEA (2020), le secteur industriel représentait environ 37% de la consommation totale d'énergie finale mondiale, ce qui équivaut à 157 exajoules (EJ). À cet égard, les industries des pâtes et papiers, des produits chimiques et pétrochimiques, du fer et de l'acier, du ciment et de l'aluminium se classent comme les plus énergivores, avec environ 69% de l'utilisation finale d'énergie industrielle mondiale (IEA, 2017). Pour cette raison, les défis énergétiques que doit relever le secteur industriel pour réduire ses impacts environnementaux résident dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de production et dans l'adoption de meilleures pratiques de gestion de l'énergie (GE) (Thollander *et al.*, 2020a). Pour rendre cela possible, il est nécessaire de réfléchir à la manière dont la GE devra être intégrée à la planification des opérations et à la manière dont les stratégies manufacturières, les outils de support et les systèmes d'information devront être structurés (May *et al.*, 2013b) afin de créer des systèmes de production plus durables.

Alternativement, l'arrivée de l'Industrie 4.0 dont les principes reposent sur la création d'usines plus intelligentes, interconnectées et autonomes favorise non seulement la transformation technologique des systèmes de production, mais se révèle également comme une avenue prometteuse pouvant contribuer positivement au développement durable des organisations (Kagermann *et al.*, 2013; Teng *et al.*, 2021). Dans cette perspective, les technologies numériques de l'Industrie 4.0 seront essentielles pour développer de meilleurs systèmes de contrôle et d'analyse de données permettant de visualiser en détail le profil énergétique des opérations. De même, ceux-ci permettront d'identifier avec plus de précision des possibles anomalies pouvant affecter la performance énergétique au sein de la chaîne de production (Bai *et al.*, 2020; García *et al.*, 2020). Dans cette transition vers un développement plus durable, l'intégration des approches de GE avec les technologies numériques, les systèmes intelligents et les environnements d'analyse de données avancés de l'Industrie 4.0,

offrira l'opportunité d'attaquer les enjeux énergétiques des organisations. Subséquemment, cette intégration permettra d'optimiser les processus de production, d'augmenter leur efficacité énergétique et de réduire leur consommation d'énergie (Nagasawa *et al.*, 2017 ; Shrouf *et al.*, 2014).

En tant que pays leader en production et en exportation d'énergie dans le monde, le Canada relève de manière responsable les défis énergétiques du XXI<sup>e</sup> siècle, car il est également l'un des plus grands consommateurs d'énergie de la planète. Son climat froid, sa population dispersée et son économie basée sur des industries à forte intensité énergétique (minière, forestière, pétrochimique, pâtes et papiers, alumineries, raffinage et sidérurgie) sont directement associés à sa forte intensité énergétique (Ménard, 2005). En 2016, les provinces de l'Ontario, de l'Alberta et du Québec ont consommé ensemble 73,4% de l'énergie totale du pays (Gouvernement du Canada, 2019). Dans la province de Québec, cela s'explique en partie par la consommation industrielle liée à l'énergie hydroélectrique bon marché, qui a attiré des industries à forte intensité énergétique dans la région (Whitmore et Pineau, 2020). Dans la même province, les statistiques montrent qu'environ 35% de la consommation totale d'énergie est attribuée au secteur industriel, qui est le plus énergivore avec une consommation de 612 pétajoules (PJ) en 2017. De ce fait, les industries manufacturières de l'aluminium et des pâtes et papiers ont consommé 71% de l'énergie totale du secteur (Whitmore et Pineau, 2020).

Malgré le fait que l'industrie des pâtes et papiers au Québec est l'une des plus énergivores, les changements structurels majeurs qu'elle a subis au fil du temps ont fait chuter ses émissions de GES de 73% entre 1990 et 2017 (Whitmore et Pineau, 2020). De même, la capacité de l'industrie forestière à produire sa propre électricité, principalement à partir de la bioénergie, a réduit sa dépendance aux combustibles fossiles. L'évolution de son profil énergétique et de sa structure organisationnelle a, quant à elle, diminué la consommation d'énergie de cette industrie de 25% et ses émissions provenant des combustibles fossiles de 38% à l'échelle nationale entre 2006 et 2016 (RNCAN, 2020). Cependant, malgré les efforts déployés pour réduire son empreinte écologique, cette industrie continue d'émettre des quantités importantes de GES (Duhaim et Ramacieri, 2019). En outre, le Plan d'Action sur les Changements Climatiques (PACC) 2013-2020 n'a pas permis au Québec d'atteindre ses objectifs énergétiques projetés, la province n'ayant réduit ses émissions que de 9% par rapport à son objectif de 20% (Whitmore et Pineau, 2020). Ces situations reflètent la nécessité de déployer des systèmes de GE permettant au secteur forestier d'améliorer son efficacité énergétique, de réduire son empreinte écologique et de continuer à se développer dans les dimensions du développement durable.

L'industrie forestière a connu ces dernières années de grandes avancées technologiques qui lui ont permis de moins dépendre des sources d'énergie fossiles et de valoriser le potentiel énergétique de la biomasse forestière résiduelle. Cependant, les coûts élevés associés à l'acquisition de ces technologies énergétiques émergentes peuvent représenter une barrière économique pour le secteur (Fleiter *et al.*, 2012). De même, le déploiement et

l'application de ces systèmes énergétiques durables liés à la bioénergie ne se fera pas instantanément, du fait qu'actuellement, la durabilité n'est toujours pas considérée comme un objectif principal pour optimiser les systèmes de production (Nagasawa *et al.*, 2017). De ce fait, pour maintenir sa compétitivité et son alignement par rapport aux objectifs de sa transition énergétique, l'industrie forestière est obligée de rechercher des stratégies lui permettant de continuer à se développer de manière durable à court terme. L'amélioration de l'efficacité énergétique est l'une des alternatives, même si de nombreuses entreprises industrielles manquent encore de méthodes et de contrôles adéquats pour aborder efficacement la GE dans les systèmes de production (Bunse *et al.*, 2011). À titre d'exemple, l'industrie suédoise des pâtes et papiers, bien qu'elle soit l'une des plus écoénergétiques au monde, manque encore d'indicateurs de performance énergétique lui permettant d'analyser le véritable comportement énergétique de ses processus de production. Il semble que le manque de ressources, de connaissances et d'intérêt sont des facteurs qui entravent le développement de meilleurs systèmes de contrôle d'énergie dans cette industrie (Andersson et Thollander, 2019). Dans le sous-secteur des produits du bois, comme le soulignent Gopalakrishnan *et al.* (2005), Johnsson *et al.* (2019) et Quesada-Pineda *et al.* (2015), peu d'études se sont intéressées à l'analyse des pratiques de GE, malgré le fait que les opérations des scieries consomment de grandes quantités d'énergie et que l'énergie électrique représente un pourcentage important de la consommation totale d'énergie et des coûts d'exploitation des usines de ce sous-secteur. Selon Gopalakrishnan *et al.* (2012), la méconnaissance des avantages que pourrait apporter l'amélioration de l'efficacité énergétique à la chaîne de valeur a conduit ce sous-secteur à avoir des coûts d'exploitation excessifs. Quant au Québec, bien que l'industrie forestière soit un pilier économique majeur dans cette région, B. Dumont (2019) a récemment souligné que la présence de systèmes de GE est quasi inexistante dans la plupart des scieries de cette province nord-américaine. D'un autre côté, par rapport à la transition numérique 4.0, le secteur forestier aligne actuellement sa structure opérationnelle et oriente ses recherches vers le développement de solutions plus innovantes et de nouvelles technologies. Au cours des dernières décennies, la recherche forestière a connu de grands progrès dans les technologies de capteurs intelligents et de télédétection (Müller *et al.*, 2019). Néanmoins, la dimension de l'Industrie 4.0 liée aux outils d'acquisition et de traitement des données numériques semble moins développée dans ce secteur. Cette situation complique l'analyse du profil énergétique des systèmes de production et rend difficile la mise en œuvre de stratégies énergétiques permettant une meilleure prise de décision. À cet effet, toutes ces situations suscitent l'intérêt de la recherche pour répondre aux questions suivantes :

- Comment le secteur forestier devra-t-il intégrer les approches de GE dans sa structure opérationnelle ?
- Quelles sont les stratégies énergétiques à mettre de l'avant pour que cette industrie puisse relever les défis de sa transition énergétique actuelle ?

- Comment le niveau de maturité énergétique d'accès à l'information de chaque organisation peut-il influencer la manière dont les stratégies énergétiques, les contrôles opérationnels et les systèmes de contrôle énergétiques sont déployés dans les différents niveaux de décision d'une entreprise de ce secteur ?

Cette recherche vise donc à promouvoir les pratiques de GE au sein des systèmes de production de l'industrie forestière, particulièrement dans les scieries, et à mettre en place les supports et mécanismes de contrôle et d'évaluation nécessaires lui permettant d'avoir une image réelle et précise du comportement énergétique de ses opérations. Pour ce faire, trois objectifs principaux ont guidé la recherche. En premier lieu, un portrait conceptuel bâti à partir d'une revue de la littérature a permis de mettre en relief les éléments clés devant être considérés par les industries, lors de l'implantation d'un système de GE dans leurs systèmes de production. Par la suite, la deuxième étape du projet de recherche a eu pour objectif d'analyser les pratiques de GE du secteur forestier, ainsi que son degré de maturité énergétique dans le monde, afin de mieux cibler ses enjeux énergétiques actuels, ses meilleures pratiques de GE et ses opportunités d'amélioration. Enfin, à travers une étude de cas, le troisième objectif a permis de développer une interface de tableau de bord pour les scieries du sous-secteur des produits du bois, leur offrant la possibilité d'avoir un meilleur traitement de leurs données énergétiques, d'identifier leurs principaux problèmes d'efficacité énergétique et d'établir un processus décisionnel plus efficace et intuitif à tous les niveaux organisationnels.

La méthodologie utilisée pour mener à bien la recherche a été divisée en trois étapes fondamentales. La première étape a consisté à effectuer une revue de la littérature afin d'explorer les principaux concepts et fondements de la GE et d'évaluer comment ces principes sont intégrés dans les systèmes de production. Par la suite, l'analyse de la littérature a permis de développer un portrait conceptuel mettant en lumière les éléments clés devant être présents lors de la mise en œuvre d'un système de GE et la manière dont ceux-ci sont interreliés. Les résultats de l'étude ont révélé que ce portrait est un outil pratique permettant aux organisations d'identifier facilement les dimensions sur lesquelles elles doivent travailler pour améliorer leur efficacité énergétique. De la même manière, les systèmes de GE se sont avérés être des supports importants dans la croissance énergétique des organisations, du fait qu'ils favorisent l'amélioration de la performance énergétique opérationnelle et contribuent à réduire l'empreinte écologique des organisations.

Dans la deuxième étape de la recherche, une première revue de la littérature a permis d'analyser la chaîne de valeur de l'industrie forestière, la situation énergétique de ses deux sous-secteurs les plus énergivores (l'industrie des pâtes et papiers et l'industrie de la fabrication de produits du bois) et l'importance de la GE dans cette industrie. Ensuite, afin d'évaluer le niveau de maturité énergétique actuel de l'industrie forestière, ainsi que ses meilleures pratiques de GE et les facteurs conduisant sa transition énergétique dans le monde, une

deuxième revue de la littérature a permis d'identifier les critères d'évaluation nécessaires à la réalisation de cette étude. En conséquence, sur la base de différentes méthodologies et structures d'analyse utilisées pour évaluer le contexte énergétique d'autres secteurs industriels, il a été possible d'établir cinq critères clés d'évaluation qui ont rendu possible l'étude du profil énergétique de cette industrie dans différents pays du monde. Les résultats observés dans la deuxième étape de la recherche ont permis de constater que le niveau de maturité énergétique des industries forestières est assez hétérogène d'une région à l'autre et que l'implantation de stratégies énergétiques durables dans ce secteur évolue également à des rythmes très différents dans chaque pays. De la même manière, il a été possible d'identifier que les technologies émergentes liées à la bioénergie, aux systèmes de GE et à l'arrivée de l'industrie 4.0 sont des composantes centrales qui, une fois intégrées, favoriseront la transition énergétique de cette industrie et la conduiront vers un développement plus durable.

À partir des résultats de la deuxième étape de la recherche, il a également été possible de constater qu'il semble y avoir un besoin de mieux gérer et traiter les données énergétiques du secteur forestier au niveau opérationnel. Ce constat a permis de définir les bases de développement de la troisième étape de la recherche. Pour répondre à ce problème, dans un premier temps, il a fallu identifier à travers une revue de la littérature, les différents indicateurs de performance énergétique utilisés à différents niveaux organisationnels dans ce secteur ainsi que les différentes méthodes de contrôle statistique pour contrôler leur comportement. Par la suite, à partir de données synthétiques d'électricité et de production d'une scierie canadienne, il a été possible d'intégrer ces indicateurs de performance énergétique aux différentes méthodes statistiques identifiées, et de les tester et simuler ensemble dans un système de contrôle énergétique créé pour le sous-secteur des produits du bois. Finalement, à l'aide du logiciel Microsoft Power BI, il a été possible de construire l'interface de tableau de bord et de l'appliquer à une étude de cas dans laquelle sa fonctionnalité a été évaluée. À la lueur des résultats obtenus, il a été possible d'observer qu'en fonction du niveau d'accès à l'information de chaque scierie, il sera possible de définir différents types d'actions et de stratégies permettant d'évaluer et contrôler la performance énergétique des opérations à tous les niveaux organisationnels. Dans le meilleur des scénarios, lorsqu'il y a un accès total aux données énergétiques via des compteurs intelligents, les multiples options d'analyse de l'interface permettent d'établir une meilleure prise de décision, de mieux comprendre le comportement énergétique des opérations, d'établir des objectifs énergétiques et d'évaluer l'impact des variations excessives de la consommation d'énergie sur la performance économique des scieries. En revanche, lorsque seule la facture d'électricité est utilisée, les possibilités d'analyse deviennent très limitées et s'appuient sur des indicateurs de performance énergétique qui ne donnent pas une image complète du portrait énergétique des opérations. L'interface s'est donc avérée être un outil de support pratique permettant d'analyser avec un grand niveau de détail le profil énergétique et économique des opérations d'une scierie à tous les niveaux organisationnels.

Le présent mémoire, dont la contribution scientifique et industrielle repose sur trois articles qui seront présentés ultérieurement, est composé de 7 sections. Étant donné que pour chaque article, une revue exhaustive de la littérature propre à chaque étude a été réalisée, la première section présente une revue littéraire succincte permettant d'introduire les grands concepts clés qui ont guidé cette recherche. La deuxième section aborde les trois grands objectifs de la recherche et détaille la méthodologie utilisée dans la réalisation de l'étude. Pour leur part, les sections trois, quatre et cinq forment le cœur du mémoire et introduisent les articles rédigés dans le cadre de la maîtrise. En complément de la section précédente, la sixième section présente un scénario alternatif lié au troisième article. La septième section conclut le mémoire, suivie de la bibliographie.

# Chapitre 1 : Revue de la littérature

L'objectif principal de cette section est d'introduire de manière succincte les grands concepts clés qui ont été utilisés tout au long de la recherche. À cet égard, les diverses bases de données bibliographiques et scientifiques consultées au cours de l'étude ont permis de créer la base structurelle théorique du présent chapitre, portant principalement sur les systèmes de GE et leur intégration avec les systèmes de production et la structure organisationnelle d'une entreprise. Ainsi, étant donné que les recherches de ce travail visent principalement à promouvoir de meilleures pratiques énergétiques dans l'industrie forestière canadienne, il semble d'abord nécessaire d'effectuer un survol de cette industrie afin de connaître le contexte énergétique actuel de ses secteurs d'activité les plus énergivores (l'industrie des pâtes et papiers et l'industrie de la fabrication de produits du bois). D'autre part, en tant que pierre d'assise sur laquelle a été bâtie cette recherche, le premier article présentera par la suite une revue holistique de la littérature des éléments clés devant constituer un système de GE. Le deuxième article portera quant à lui principalement sur une revue générale de la chaîne de valeur de l'industrie forestière, sur l'évaluation énergétique de ses deux secteurs les plus énergivores et sur l'importance de la GE dans ce secteur. Enfin, la revue littéraire du troisième article dressera un portrait des pratiques de GE présentes dans le secteur de produits du bois et mettra en relief les différents indicateurs de performance énergétique ainsi que les différents modèles statistiques utilisés dans l'industrie pour suivre et contrôler le comportement énergétique des opérations au sein d'une organisation. Bien que certains concepts soient expliqués en détail dans les articles, il a été jugé approprié d'en reprendre certains dans ce chapitre pour dresser un portrait clair des sujets importants de l'étude.

## 1.1 Industrie forestière canadienne

À l'échelle nationale, l'industrie forestière est un pilier fondamental de la structure économique du Canada et cela en fait une source inestimable de richesse pour le pays. Pour mieux comprendre son contexte commercial, le Canada est le quatrième exportateur de produits forestiers au monde. De ce fait, les États-Unis, la Chine et le Japon représentent ensemble 87% des exportations totales de produits forestiers du pays (RNCAN, 2019b).

Le secteur forestier est divisé en trois activités principales, classées selon les catégories du Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN, 2017) : la foresterie et l'exploitation forestière (SCIAN 113), la fabrication de produits en bois (SCIAN 321) et la fabrication du papier (SCIAN 322). Concernant les activités émergentes de cette industrie, la filière bioénergétique, liée à la valorisation énergétique de la biomasse forestière, vise à exploiter et à réutiliser cette ressource de manière durable, à travers l'utilisation de différentes technologies telles que la densification, la gazéification, la torréfaction, la pyrolyse et les systèmes de cogénération. De cette façon, il devient possible de produire de l'énergie verte, contribuant favorablement à

la lutte contre les changements climatiques et à la décarbonisation de ce secteur (Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune [MRNF], 2012).

D'un point de vue régional, la fabrication du papier est l'une des activités forestières les plus répandues dans l'Est du Canada, tandis que dans les provinces de l'Ouest, les activités forestières sont plus concentrées dans la fabrication de produits du bois et de pâte commercialisée (RNCAN, 2019b). Au Québec, la forêt couvre 905 800 km<sup>2</sup>, soit plus de la moitié du territoire (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs [MFFP], 2020). Cet avantage géographique fait en sorte que les activités forestières sont présentes dans presque toutes les régions de la province, ce qui a permis le développement d'une activité manufacturière robuste basée sur la fabrication de produits du bois et l'industrie des pâtes et papiers (MRNF, 2012). D'un autre côté, selon le cahier d'information sur la forêt (RNCAN, 2019b), les produits forestiers développés au Canada sont divisés en quatre segments : les produits en bois massif (le bois d'œuvre résineux et les panneaux structuraux), la pâte de bois (la pâte kraft), les produits du papier (le papier journal, le papier d'impression et d'écriture) et les bioproduits (ex : les biocarburants).

Par ailleurs, en ce qui concerne son profil énergétique, l'industrie forestière fait partie des secteurs industriels les plus énergivores du pays, principalement en raison de l'industrie des pâtes et papiers qui à elle seule, consomme une grande partie de toute l'énergie utilisée par cette industrie (RNCAN, 2017). De même, les changements structurels majeurs que cette industrie a subis au fil des ans et son nouveau régime bioénergétique en expansion ont réduit sa dépendance aux combustibles fossiles, ce qui a entraîné une réduction constante de ses émissions de GES au cours des dernières décennies (RNCAN, 2020). Cependant, malgré le fait que l'industrie de la bioénergie à base de biomasse est en plein essor et que l'émergence de nouvelles technologies de production de biocarburants fasse progresser la transition énergétique du secteur, l'industrie forestière a encore un certain potentiel pour réduire ses émissions de GES. En effet, pour que le secteur atteigne les objectifs de sa transition énergétique, il semble que les stratégies qu'il doit adopter reposent sur deux vecteurs de changement. À long terme, la biomasse forestière promet d'être une source importante d'énergie propre et un allié précieux dans la transformation énergétique de cette industrie, tandis qu'à court terme, les initiatives de GE visant à améliorer l'efficacité énergétique opérationnelle, s'avèrent des supports clés pour générer d'importantes économies d'énergie pour le secteur (Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles [MERN], 2013). C'est pourquoi l'industrie doit continuer à améliorer son efficacité énergétique, car l'énergie est un facteur d'une importance cruciale qui lui permettra de poursuivre son développement durable.

## 1.2 Industrie des pâtes et papiers canadienne

L'industrie des pâtes et papiers, fondée dans les années 1800, est aujourd'hui un pilier majeur de l'économie canadienne. Les entreprises manufacturières appartenant à ce sous-secteur transforment les matières végétales ligneuses en une grande variété de pâtes, papiers et cartons (Kuhlberg, 2015).

Concernant le mode de fonctionnement de cette industrie, les opérations des usines de pâtes et papiers peuvent être intégrées, ce qui signifie que les usines de papier et de carton produiront leur propre pâte à l'interne, mais lorsque leurs opérations sont séparées, celles-ci doivent acheter la pâte sur le marché, laquelle est produite par des usines de pâte non intégrées (Thollander *et al.*, 2020b). Ainsi, le papier et le carton sont fabriqués à partir de copeaux de bois et de fibres recyclés provenant de scieries. Les fibres de cellulose et la lignine sont les deux principaux composants du bois. Pour produire du papier, il faut transformer le bois en pâte en séparant les fibres de la lignine à l'aide de procédés de mise en pâte chimiques, semi-chimiques ou mécaniques. La pâte peut également être produite en utilisant des déchets de papier récupérés comme matière première (Thollander *et al.*, 2020b).

D'un autre côté, cette industrie vit actuellement l'une des transformations les plus importantes de son histoire, car ses marchés traditionnels subissent une mutation irréversible, provoquée par la nouvelle hégémonie technologique qui a rapidement colonisé les modes de diffusion et de consommation de l'information. Parallèlement, les réglementations environnementales de plus en plus strictes, la hausse des prix de l'énergie et l'émergence de nouveaux concurrents, en particulier des pays en voie de développement d'Amérique du Sud, où les usines opèrent dans des climats plus favorables et où les coûts de production sont plus bas (Kuhlberg, 2015), sont d'autres défis auxquels l'industrie est confrontée. Toutes ces situations ont occasionné un ralentissement de son activité économique et la fermeture de plusieurs usines ces dernières années. À titre d'exemple, de 2000 à 2012, le nombre d'usines de pâtes et papiers au Québec a diminué de plus de 30%, passant de 63 à 43 (MRNF, 2012). Pire encore, de 2012 à 2019, le nombre d'usines est passé de 43 à 22, soit une diminution de près de 50% (MFFP, 2020). Cependant, le phénomène semble être mondial du fait qu'en Suède, après plusieurs fermetures d'usines au fil des ans, il ne restait que 51 usines en 2018, contre 134 en 1980 (Thollander *et al.*, 2020b). Malgré l'effondrement de ses marchés traditionnels, le Canada demeure un important producteur mondial de papier journal et de pâte kraft (Kuhlberg, 2015).

Pour rester compétitif et rentable, ce secteur devra poursuivre ses efforts afin de continuer à se moderniser et à se diversifier. L'avenue de la bioénergie lui permet de développer progressivement de nouveaux bioproduits, d'élargir ses marchés et de retirer les énergies fossiles de ses opérations. Cependant, ce secteur doit également mettre en place des stratégies lui permettant de réduire ses coûts de fabrication. L'amélioration de l'efficacité énergétique est un facteur clé de son développement durable à court terme, puisque, selon les procédés de

production, l'énergie peut représenter de 15 à 25% de ses coûts opérationnels totaux (MERN, 2013). Par conséquent, l'industrie des pâtes et papiers doit comprendre comment elle utilise l'énergie avant d'adopter de nouvelles sources d'énergie ou de technologies. À cet égard, la GE, dont les objectifs résident dans l'amélioration de la performance énergétique d'une organisation (ISO, 2018), est une ressource importante pour améliorer sa performance énergétique.

### **1.3 Secteur de la fabrication de produits du bois canadien**

Le secteur de la fabrication de produits du bois comprend toutes les activités de fabrication destinées à transformer le bois en divers produits et se divise en trois principaux segments d'activité. Tout d'abord, les scieries sont responsables de la première transformation de la ressource forestière en bois de sciage ou bois d'œuvre. Pour leur part, les usines de panneaux sont responsables de la fabrication de panneaux OSB, LDF, MDF, HDF, contre-plaqués, etc. Ces usines s'approvisionnent principalement d'essences feuillues (MRNF, 2012). Finalement, l'industrie de la deuxième et de la troisième transformation est responsable de la production de produits finis ou semi-finis tels que des poutres ou des panneaux d'ingénierie, des cadres et moulures, des meubles en bois, du bois traité, etc. Ces produits sont fabriqués à partir de bois de première transformation (MRNF, 2012).

Selon une publication de la base de données nationale sur la consommation d'énergie du gouvernement du Canada (RNCAN, 2018), en 2018, le sous-secteur de la fabrication de produits du bois ne représentait que 6,5% de la consommation totale d'énergie utilisée par le secteur industriel canadien, avec seulement 142,8 PJ consommés. De même, entre 2000 et 2018, sa consommation d'énergie a connu un taux de croissance de 10,3%. La consommation d'énergie dans ce sous-secteur semble faible par rapport aux autres industries manufacturières. Cependant, l'utilisation efficace de l'énergie offre des avantages dans les dimensions économique, sociale et environnementale de toute industrie (Quesada-Pineda *et al.*, 2015). En tant que premier exportateur et deuxième producteur de bois d'œuvre résineux dans le monde (RNCAN, 2019b) et avec un marché en expansion et en diversification, ce sous-secteur doit se concentrer davantage sur des stratégies d'efficacité énergétique lui permettant de contribuer au développement durable de l'industrie forestière.

De même, ces dernières années, comme le soulignent Devaru *et al.* (2014), en raison de l'augmentation des prix de l'énergie et des récessions économiques qui ont affecté la marge bénéficiaire de la production de bois, le gaspillage d'énergie dans les scieries devient très coûteux et n'est plus une option. Ainsi, selon les auteurs, l'un des moyens par lesquels ce sous-secteur peut réduire ses coûts opérationnels et améliorer sa rentabilité, est de se concentrer sur la réduction de sa consommation d'énergie. Par conséquent, les gestionnaires d'énergie de ce sous-secteur devraient savoir que les coûts énergétiques sont habituellement l'un des coûts de production les plus élevés où il y a encore une marge d'amélioration importante (Morvay et Gvozdenac, 2008) et que ceux-

ci peuvent être réduits de deux manières: soit en négociant un prix inférieur auprès du fournisseur d'énergie ou en adoptant des stratégies internes de GE favorisant l'efficacité énergétique dans les processus de production (Thollander *et al.*, 2020c) et permettant aux industriels d'améliorer leurs empreintes environnementales.

En revanche, Nyboer et Bennett, cités dans Quesada-Pineda *et al.* (2015) ont déterminé que la biomasse résiduelle représente 54,4% de l'énergie totale consommée dans l'industrie canadienne de la fabrication de produits du bois, tandis que l'électricité occupe la deuxième place, avec 25,6% de l'énergie totale utilisée dans ce sous-secteur. Étant donné que l'utilisation de l'électricité est toujours importante dans ce sous-secteur, des stratégies plus efficaces sont nécessaires pour contrôler sa consommation, car dans une autre enquête menée dans l'industrie irlandaise des produits du bois, Murphy *et al.* (2015) ont constaté que l'utilisation de l'électricité dans la transformation du bois en Irlande (p. ex., sciage du bois) est la principale cause des émissions de GES dans cette industrie. Par conséquent, comme la consommation d'énergie dans une scierie est largement due à l'utilisation d'électricité et de chaleur, tout changement, amélioration ou projet visant à réduire l'utilisation de l'énergie électrique aura des impacts significatifs à tous les niveaux organisationnels (Loeffler *et al.*, 2016).

## 1.4 Systèmes de GE

Un système de GE vise à améliorer l'efficacité énergétique d'une entreprise par la mise en œuvre de diverses méthodes, techniques et projets d'amélioration continue. Dans ce contexte, l'efficacité énergétique fait référence à une utilisation plus responsable, opportune et intelligente de l'énergie, à l'adoption d'activités moins énergivores et à l'optimisation de la consommation d'énergie au sein d'une entreprise. De ce fait, un système de GE est un outil permettant d'atteindre les objectifs énergétiques d'une organisation par la mesure, la surveillance, le contrôle et l'évaluation constante de la performance énergétique de ses processus de production (Gordic *et al.*, 2014) dans ses différents niveaux décisionnels (Duflou *et al.*, 2012). Le but ultime de ces systèmes est de réduire l'empreinte carbone des entreprises et d'éliminer les coûts associés au gaspillage d'énergie. Ces derniers sont l'une des principales motivations pour lesquelles les entreprises déploient des programmes et systèmes de GE (Hasan *et al.*, 2018). Dans ce contexte, l'amélioration de l'efficacité énergétique permet de réduire ces coûts, puisqu'elle consiste à « faire plus de travail avec la même quantité d'énergie ou faire la même quantité de travail avec moins d'énergie » (Bajpai, 2016a). Selon Gopalakrishnan *et al.* (2014), dans un système de GE, les politiques énergétiques de chaque entreprise, établies par la haute direction, représentent l'engagement énergétique de toute la structure organisationnelle et agissent comme des leviers pour une gestion réussie de l'énergie. Ainsi, les objectifs énergétiques doivent être en accord avec ces politiques. D'autre part, la planification vise à établir les procédures et les différents systèmes de mesure qui permettront de suivre les principaux consommateurs d'énergie affectant la performance énergétique au sein d'une organisation, tandis que les plans d'action rassemblent les activités à mener pour évaluer en permanence la réalisation des objectifs énergétiques.

## **1.5 Modèles de maturité de la GE**

Avant de commencer la mise en œuvre du système de GE, il est recommandé d'analyser l'état de maturité énergétique actuel des pratiques de GE au sein de l'organisation. Même plus tard, lors du développement du système de GE et de sa mise en œuvre, il est utile d'analyser périodiquement la situation, de voir où se trouve l'entreprise et ce qui doit être fait et corrigé pour atteindre les cibles énergétiques souhaitées (Introna *et al.*, 2014). La structure interne d'un modèle de maturité peut être composée de différents niveaux et dimensions interdépendantes. Les niveaux représentent le degré de maturité d'une entreprise par rapport à son développement énergétique et les dimensions sont des éléments essentiels permettant d'atteindre les cibles établies des systèmes de GE. Plus l'entreprise est développée, meilleur sera son niveau de maturité et son alignement par rapport aux objectifs stratégiques énergétiques. Dans la littérature, Il existe des outils pour évaluer le niveau de maturité énergétique des entreprises. De leur côté, (Introna *et al.*, 2014) fournissent aux entreprises un outil pour mesurer leur degré de maturité énergétique, leur permettant de développer un plan de croissance adapté en fonction de leurs domaines d'opportunité identifiés. De même, un autre outil pour évaluer le niveau de maturité a été développé par (Jovanović et Filipović, 2016), combinant des directives ISO 50001 avec des techniques de gestion pour économiser l'énergie suggérées dans la littérature. D'autre part, (Kent, 2018) propose des tableaux d'auto-évaluation et des formulaires plus rudimentaires, conçus pour évaluer manuellement l'état de maturité des entreprises. Ce ne sont que des exemples parmi tant d'autres.

## **1.6 Intégration du système de GE dans la structure organisationnelle**

Lors de la création du système de GE, il est important de créer une équipe et de documenter les rôles, autorités et responsabilités respectifs de tous les membres qui seront impliqués, afin d'établir la structure qui soutiendra le processus d'implantation du système de GE. La taille de l'équipe dépendra notamment de la dimension de chaque entreprise, de l'envergure de ses objectifs énergétiques et de ses niveaux de production (Javied *et al.*, 2019). Ainsi, il peut y avoir différentes façons de la construire étant donné qu'il n'y a pas de modèle unique précisant la façon dont la structure organisationnelle doit être définie pour exécuter le programme de GE. Par ailleurs, le gestionnaire d'énergie doit occuper une position élevée dans la structure organisationnelle afin de communiquer périodiquement avec la haute direction les progrès accomplis ou les problèmes rencontrés (Gordic *et al.*, 2014). À cet égard, les résultats devront être adressés à la fois à la direction pour montrer la valeur du travail et au personnel pour montrer les progrès accomplis.

## **1.7 GE dans les systèmes de production**

Une fois que les projets et les activités d'amélioration établis dans le plan d'action ont été déployés dans l'organisation, il est de grande importance de disposer d'un système approprié de collecte, de mesure et

d'analyse des données énergétiques. Ce système de contrôle d'énergie consiste à mesurer, surveiller et évaluer la performance énergétique des opérations à l'aide d'indicateurs de performance énergétique, afin de définir des objectifs et des actions correctives permettant de continuer à améliorer l'efficacité énergétique des systèmes de production (Gordic *et al.*, 2014). La surveillance du comportement énergétique des opérations commence d'abord par la mesure et la collecte de données. Ces informations peuvent être extraites à partir des instruments de mesure, des factures, des données de production, etc. (Morvay et Gvozdenac, 2008). De même, la fiabilité des analyses effectuées dépendra de la qualité des données collectées. Ainsi, une analyse constante des indicateurs de performance énergétique permettra aux décideurs de mieux évaluer la performance de chaque processus surveillé et d'identifier des opportunités d'amélioration potentielles (Bunse *et al.*, 2011). Pour cette raison, l'implantation efficace de chacun de ces indicateurs doit être appuyée par des outils d'analyse facilitant la visualisation et la compréhension des résultats mesurés (May *et al.*, 2017). Ces outils de visualisation et d'analyse des informations peuvent être des bases de données intégrées dans la structure du système informatique de chaque entreprise (Dörr *et al.*, 2013) ou des modèles statistiques permettant d'évaluer en détail le vrai comportement énergétique des opérations.

### 1.7.1 Standardisation : ISO 50001

Cette norme est basée sur le cycle d'amélioration continue PDCA (*Plan-Do-Check-Act*) et sur l'intégration de la GE dans les opérations d'une entreprise. En outre, cette norme fournit un bon support pour améliorer les pratiques énergétiques dans les industries ayant des processus bien définis et structurés, et vise à les certifier en matière d'efficacité énergétique (Jovanović et Filipović, 2016). D'autre part, cette norme est compatible avec d'autres normes de gestion telles que la norme de gestion de la qualité ISO 9001 et la norme environnementale ISO 14001, ce qui facilite l'intégration des exigences de ce standard dans d'autres systèmes de gestion (Müller *et al.*, 2013). De ce point de vue, la norme ISO 50001 est un moyen d'unifier les politiques et les initiatives énergétiques dans un système de GE homogène (Field et Safari, 2019). Cependant, malgré les grands avantages de la mise en œuvre de cette norme, Müller *et al.* (2013) ont souligné que la norme fournit des détails sur ce qu'il faut faire pour mettre en œuvre avec succès un système de GE, mais la manière d'y parvenir n'est pas détaillée ni définie. Sans aucun doute, la norme est un cadre de GE efficace supportant bien les défis énergétiques des organisations, mais ce n'est pas la seule option pour mettre en œuvre un système de GE (Field et Safari, 2019).

Comme la recherche poursuivie dans le cadre du présent mémoire s'intéresse principalement à la promotion des pratiques de GE au sein des systèmes de production du secteur forestier, avec ces concepts qui viennent d'être présentés, il sera possible d'analyser dans les prochaines sections comment ceux-ci ont contribué au développement de chacun des axes principaux du projet de recherche.

## Chapitre 2 : Objectifs et méthodologie

La recherche effectuée dans le cadre de ce projet de maîtrise a pour objectif général de mieux supporter les pratiques de GE au sein des systèmes de production du secteur forestier, spécialement dans les scieries, et d'établir les outils et supports nécessaires afin d'avoir un meilleur aperçu du profil énergétique des opérations.

Les objectifs spécifiques poursuivis sont :

- De proposer un portrait conceptuel énergétique permettant d'identifier les éléments clés devant constituer un système de GE et d'évaluer les différentes manières dont une organisation peut les intégrer dans son système de production;
- De bâtir un cadre d'analyse dimensionnel afin d'analyser le degré de maturité énergétique de l'industrie forestière et de mettre en lumière les meilleures pratiques de GE, les enjeux énergétiques existants et les vecteurs stratégiques conduisant une transition énergétique;
- De développer une interface de tableau de bord conviviale permettant aux scieries du sous-secteur des produits du bois de gérer et traiter agilement les données électriques de leurs processus de production à différents niveaux organisationnels, de choisir les outils d'analyse appropriés en fonction de leur niveau d'accès à l'information et d'identifier clairement leurs principaux problèmes d'efficacité énergétique.

Pour ce faire, l'étude a été développée en trois grandes étapes présentées ci-dessous. Les trois étapes incluent la revue de la littérature qui a été effectuée à partir des principes du cercle herméneutique, l'analyse du degré de maturité énergétique du secteur forestier et le développement de l'interface de tableau de bord pour les scieries du sous-secteur des produits du bois, avec les deux scénarios d'analyse réalisés ainsi que la synthèse et les recommandations pour chacun.

La première étape, entièrement présentée dans l'article 1, a consisté en la réalisation d'une revue de la littérature, de façon à explorer les principaux concepts et fondements de la GE et à évaluer comment ces principes peuvent être intégrés dans les systèmes de production d'une organisation. À partir de cette revue, un portrait conceptuel dévoilant les éléments clés devant être présents dans un système de GE et la manière dont ceux-ci interagissent mutuellement a pu être proposé. La deuxième étape, discutée dans l'article 2, a reposé sur l'élaboration d'un cadre d'analyse dimensionnel destiné à évaluer le degré de maturité énergétique de l'industrie forestière dans le monde, et à identifier les stratégies de sa transition énergétique la conduisant vers un développement plus durable. À partir de cette analyse, il a ensuite été possible de constater qu'il semble y avoir actuellement un besoin de mieux surveiller, contrôler et évaluer les données énergétiques des systèmes

de production du secteur forestier. Pour répondre à ce problème, la troisième étape, abordée à l'article 3 (chapitre 5) et au chapitre 6, a permis d'établir deux scénarios d'analyse différents en fonction de la quantité d'informations auxquelles une scierie peut accéder. De ce fait, pour chaque scénario, différents indicateurs de performance énergétique, stratégies d'analyse et méthodes statistiques de contrôle ont été identifiés et, par la suite, des tests ont été réalisés afin d'évaluer leur fonctionnalité et leur applicabilité. La formulation de recommandations basées sur les résultats observés a dès lors pu être réalisée. La troisième étape est répartie dans les chapitres 5 et 6 du mémoire. La Figure 1 résume chacune des étapes réalisées dans cette étude.

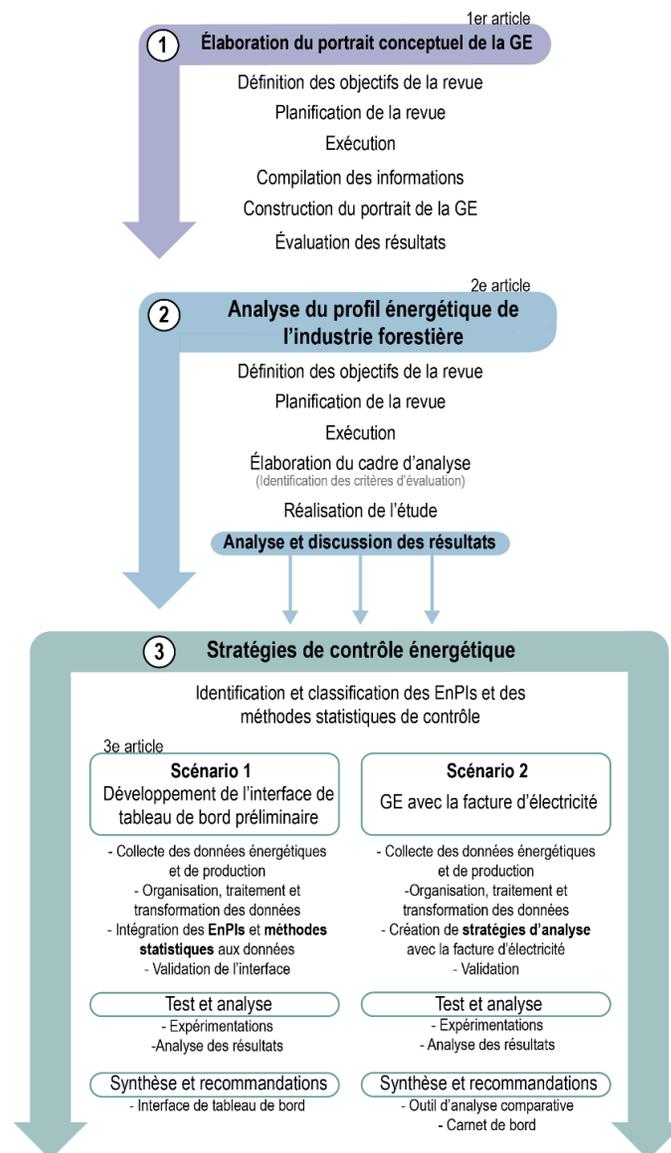


Figure 1. Méthodologie de la recherche

Dans la première étape de la recherche, prenant assise sur les principes du cercle herméneutique et à l'aide de diverses bases de données bibliographiques et textuelles, une revue de la littérature portant principalement sur les concepts fondamentaux de la GE, son application et son intégration dans les systèmes de production d'une organisation, a été effectuée. Cette première approche a permis d'avoir une image holistique des principales particularités propres à la GE et de définir les 3 dimensions clés devant supporter la mise en œuvre d'un système de GE : la GE dans les systèmes de production, l'intégration de la GE dans la structure organisationnelle et les modèles de maturité de la GE. De même, à partir de cette première revue scientifique, un portrait conceptuel servant de base à l'élaboration d'un programme de GE et permettant d'intégrer la facette énergétique dans la planification des opérations d'une entreprise a été proposé.

Suite à cette revue de la littérature, la deuxième étape de la recherche a permis d'étudier la chaîne de valeur et le contexte énergétique des deux sous-secteurs les plus énergivores du secteur forestier (l'industrie des pâtes et papiers et l'industrie de la fabrication de produits du bois) tout en examinant l'importance de la GE dans les systèmes de production. Subséquemment, dans le but d'analyser le degré de maturité énergétique actuel de l'industrie forestière, son implication dans le développement de pratiques de GE ainsi que les stratégies les plus prometteuses conduisant sa transition énergétique dans le monde, il a été nécessaire de développer un cadre d'analyse dimensionnel basé sur différents critères d'évaluation. Afin de déterminer les axes d'évaluation pour mener à bien cette étude, une revue littéraire a permis d'identifier différents articles analysant le contexte énergétique d'autres secteurs industriels sous différents angles et perspectives. En conséquence, en se basant sur les cadres et méthodologies d'analyse utilisés par Hossain *et al.* (2020), Abdelaziz *et al.* (2011) et Bunse *et al.* (2011), il a été possible de définir cinq axes clés d'évaluation qui ont permis d'étudier le contexte énergétique actuel de l'industrie forestière dans divers pays du monde : utilisation de l'énergie dans le secteur forestier, contrôle de la transition énergétique, incitatifs, structure organisationnelle et GE au niveau opérationnel. Grâce à l'utilisation de ce cadre d'analyse qui est présenté dans l'article 2, il a été possible de mettre en contexte la situation énergétique du secteur forestier, de déterminer quelles sont les différentes sources d'énergie utilisées actuellement dans ses opérations, d'identifier les motivations poussant les organisations de ce secteur à améliorer leur efficacité énergétique et les barrières les empêchant de progresser, d'évaluer les supports, mécanismes et composantes centrales favorisant la progression de sa transition énergétique, d'analyser la manière dont les entreprises de ce secteur intègrent les approches de la GE dans leur structure organisationnelle et de déterminer les contrôles et méthodes qu'elles utilisent pour mesurer, contrôler et évaluer la performance énergétique de leurs opérations.

Les résultats obtenus à partir de la deuxième étape de la recherche ont permis de constater que malgré le fait qu'il s'agisse d'une industrie dont la transition énergétique dépend largement du développement de nouvelles technologies à base de biomasse forestière, en matière d'efficacité énergétique, il semble qu'il y a encore place

à l'amélioration quant à la manière dont les données énergétiques sont contrôlées et évaluées au sein des systèmes de production. Ainsi, le développement de la troisième étape de la recherche a tenté d'adresser ce problème, plus particulièrement en se concentrant sur les scieries du sous-secteur des produits du bois. Pour y parvenir, il a fallu développer deux scénarios d'analyse proposant des indicateurs de performance énergétique, des méthodes et des actions différentes en fonction du niveau d'accès aux données énergétiques de chaque scierie. L'article 3, qui est présenté dans le chapitre 5 de ce mémoire, représente le scénario des scieries ayant un accès total aux données énergétiques de leurs processus de production, ce qui a permis de développer une interface de tableau de bord conviviale offrant la possibilité d'avoir une meilleure prise de décision, une meilleure gestion des coûts énergétiques, et une meilleure compréhension du comportement énergétique des opérations à tous les niveaux organisationnels. Le développement de cette interface s'est déroulé en différentes étapes. Premièrement, il a été nécessaire d'analyser la littérature scientifique pour identifier les différents indicateurs de performance énergétique et les méthodes statistiques utilisées dans l'industrie et le sous-secteur des produits du bois pour contrôler et suivre la performance énergétique des opérations. Une fois la littérature analysée, les indicateurs identifiés ont été organisés en fonction de leur nature (économique ou physique) et de leur niveau d'application. De même, sur la base des travaux menés par Benedetti *et al.* (2017), Gordic *et al.* (2014), Morvay et Gvozdenac (2008), Van Gorp (2005) ainsi que Greenwald et Wallace (2007), il a été possible de déterminer cinq outils statistiques de contrôle largement utilisés pour surveiller la performance énergétique des processus de production à différents niveaux organisationnels : analyse de régression, méthode des sommes cumulées (CUSUM) pour évaluer les économies d'énergie, analyse résiduelle, carte CUSUM et matrice de contrôle de l'énergie. Par la suite, à partir des données synthétiques d'électricité et de production d'une scierie canadienne, il a été possible d'intégrer ces indicateurs de performance énergétique aux différentes méthodes statistiques identifiées. Subséquemment, à l'aide du logiciel Microsoft Power BI, il a été possible de créer l'interface de tableau de bord et de l'appliquer à une étude de cas dans laquelle sa fonctionnalité a été évaluée. Finalement, les grandes conclusions et recommandations issues de l'interprétation des résultats obtenus lors de l'évaluation de l'interface ont été dégagées. Le chapitre 5 de ce mémoire décrit en détail chacune des étapes de développement de l'interface de tableau de bord et discute les résultats de cette étude amplement.

Par ailleurs, étant donné que plusieurs scieries n'ont pas accès aux données énergétiques de leurs processus de production et ne connaissent que la consommation totale d'énergie pour l'ensemble de leur usine, le chapitre 6 fait référence au scénario supplémentaire lorsque seule la facture d'électricité est disponible. Ainsi, il est important de souligner que dans ce scénario, les fonctionnalités et les outils statistiques de l'interface de tableau de bord peuvent également être utilisés si les scieries ont accès à la consommation totale d'énergie et aux volumes de production globaux de l'ensemble de l'usine. Cependant, en utilisant uniquement les données globales d'énergie et de production, il devient difficile de tirer des conclusions efficaces permettant de justifier ce qui est à l'origine des changements de performance énergétique de l'ensemble de l'usine, car il n'y a pas de

suivi de la consommation d'énergie de chaque processus. Pour cette raison, afin d'avoir une meilleure vue d'ensemble des causes possibles pouvant affecter la performance énergétique organisationnelle dans cette situation de faible accès à l'information, il a été nécessaire de créer un outil d'analyse comparative permettant à différentes scieries d'un même groupe industriel d'évaluer collectivement leurs initiatives, projets et bonnes pratiques énergétiques ainsi que d'échanger des idées d'amélioration. Le développement de cet outil d'analyse comparative, où seule la facture d'électricité et les volumes de production globaux sont disponibles, s'est déroulé en différentes étapes. Premièrement, des indicateurs de performance énergétique simples, permettant de voir le contexte et profil énergétique général de chaque scierie analysée, ont été identifiés à l'aide de la littérature scientifique. Ensuite, afin de comparer la performance énergétique de ces scieries au niveau de l'usine, l'indice d'efficacité énergétique (IEE) proposé par la *European Commission* (2009) a été utilisé, du fait que cet indicateur est bien adapté au contexte de ce scénario où l'accès à l'information est limité. De plus, l'avantage de cet indicateur est qu'il ne nécessite que deux données facilement accessibles pour une scierie, à savoir la consommation d'énergie de l'ensemble de l'usine et les volumes de production globaux. Par la suite, afin de simuler et de tester ce scénario d'analyse fictive dont l'objectif est de montrer ce qui peut être fait lorsqu'il y a peu d'accès à l'information, des données synthétiques d'électricité et de production pour chaque scierie analysée ont été créées, à partir des données réelles de la même scierie canadienne évaluée au chapitre 5 du mémoire. Au final, grâce à l'outil d'analyse comparative, il a été possible d'évaluer conjointement la performance énergétique des scieries fictives créées pour l'étude à l'aide de l'IEE, et de montrer le profil énergétique de chacune. Pour compléter cet outil, un carnet de bord générique a été proposé pour aider les scieries à détecter de possibles raisons faisant varier leur consommation d'énergie au sein de leurs opérations. De ce fait, cet outil leur permet d'avoir un suivi constant de toutes les causes possibles qui ont pu avoir un impact sur leur performance énergétique et de les justifier périodiquement. De même, grâce à ce carnet de bord, plusieurs scieries d'un même groupe industriel pourront collectivement comparer, partager, évaluer et échanger leurs meilleures pratiques énergétiques mises en œuvre dans leurs organisations. Le chapitre 6 illustre en détail chacune des étapes de ce dernier scénario et décrit les résultats obtenus ainsi que les conclusions formulées.

## **Chapitre 3 : Portrait conceptuel de la gestion de l'énergie dans les systèmes de production**

*L'article intitulé « Portrait conceptuel de la gestion de l'énergie dans les systèmes de production » est inséré dans cette section du mémoire. Il a été soumis le 30 mai 2020 à la conférence « MOSIM : Modélisation, Optimisation et Simulation » et présenté à la 13<sup>e</sup> édition de cette conférence le 14 novembre 2020 à Agadir, Maroc. La version publiée est identique à la version présentée dans ce mémoire.*

### **3.1 Résumé**

Pour faire face aux problèmes énergétiques industriels actuels qui prennent de plus en plus d'importance, les organisations doivent définir des stratégies énergétiques propulsant l'industrie vers un développement plus durable. Dans ce contexte, la mise en œuvre d'un système de gestion de l'énergie permet non seulement de réduire les coûts, mais aussi de protéger l'environnement, de préserver les ressources et de réduire l'empreinte carbone. Cet article relie à travers une image conceptuelle, les principaux axes de référence de la gestion de l'énergie trouvés dans la littérature. Une revue de la littérature a d'abord permis de déterminer qu'un système de gestion de l'énergie se base sur trois aspects primordiaux : le niveau de maturité énergétique d'une entreprise, la structure organisationnelle qui soutient l'implantation du système énergétique et les phases nécessaires pour gérer la performance énergétique des systèmes de production. Le regroupement de tous ces éléments a ensuite permis d'analyser leur importance et la manière dont l'un influence l'autre. Le portrait final présente l'image complète des éléments clés devant être présents dans un système de gestion de l'énergie.

## 3.2 Introduction

Ces dernières années, les problèmes énergétiques liés aux changements climatiques, à la rareté des ressources et aux sources d'approvisionnement en énergie ont fait évoluer les attitudes de la société et de l'industrie en faveur de la protection de l'environnement (May *et al.*, 2017). Tandis que les ressources consommées et les déchets résultant de la production affectent l'environnement à diverses échelles, les systèmes manufacturiers continueront d'être un pilier important de l'économie mondiale et, par conséquent, ils doivent exercer davantage de pression sur leurs processus et systèmes de fabrication pour garantir la protection de l'environnement et de la planète (Duflou *et al.*, 2012).

Au fil du temps, la demande de biens a augmenté et, en conséquence, la demande de ressources naturelles et d'énergie a accru abruptement. La transition vers le développement durable nécessite des stratégies qui accroissent l'efficacité des opérations et des processus en mettant en œuvre des méthodes de production moins énergivores. Pour ce faire, les stratégies de fabrication doivent évoluer du « profit maximum avec un capital minimum » au « profit maximum avec un minimum de ressources » (IEA, 2007). À cet égard, l'analyse de la consommation d'énergie et de son utilisation doit faire partie de stratégies exhaustives d'amélioration continue pour favoriser la détection des pertes énergétiques.

La gestion énergétique (GE) industrielle vise ainsi à augmenter l'efficacité énergétique dans les processus de production. Elle devient une priorité considérable en raison de trois facteurs importants qui motivent la mise en œuvre des systèmes de GE : la hausse des prix de l'énergie, les nouvelles réglementations environnementales sur les émissions de CO<sub>2</sub> et une sensibilisation des clients aux produits énergétiques durables (Bunse *et al.*, 2011 ; May *et al.*, 2017). De ce fait, l'industrie 4.0 qui se trouve en pleine transition vers la création de valeur industrielle durable (Carvalho *et al.*, 2018), offre la possibilité d'atteindre cette création de valeur à travers les trois principaux piliers de la durabilité : environnemental, social et économique (Stock et Seliger, 2016).

Traditionnellement, comme l'illustrent Schönsleben (2007) et Chryssolouris (2006), les performances d'un système de production étaient évaluées en surveillant quatre attributs : le coût, le temps, la qualité et la flexibilité. Néanmoins, aucun ne tenait compte de l'efficacité énergétique ou des dimensions essentielles à la durabilité. Toutefois, selon Bunse *et al.* (2011), en raison des impacts environnementaux et économiques importants associés à la consommation d'énergie, l'efficacité énergétique doit être considérée au même titre que les attributs conventionnels. Similairement, Salonitis et Ball (2013) proposent d'étendre le tétraèdre de fabrication proposé par Chryssolouris (2006) pour inclure la « durabilité » comme nouveau moteur de fabrication puisque les processus de production devraient optimiser leur consommation d'énergie pour réduire les pertes énergétiques et l'utilisation des ressources.

L'objectif de cet article vise donc à analyser les éléments devant constituer un système de GE et de quelle façon ils sont liés entre eux. Pour ce faire, une revue de la littérature a d'abord été menée, afin de mieux comprendre ce que sont les systèmes de GE et leur rôle au sein des systèmes de production. L'analyse de la littérature a ensuite permis de dégager un cadre conceptuel explicitant les éléments clés devant constituer un système de GE et leur interdépendance. L'article vise ainsi à proposer un système de GE pouvant agir comme mécanisme de support et de création de valeur durable dans une organisation afin d'améliorer sa performance énergétique.

Cet article scientifique décrit, à la section 2, la méthodologie de recherche qui a permis d'explorer, rassembler, organiser et évaluer la littérature pertinente sur la GE dans les systèmes de production. À la section 3, cette classification dévoile le portrait conceptuel des éléments clés des systèmes énergétiques. Il est complété par une conclusion.

### **3.3 Revue de la littérature**

L'état de l'art effectué dans cette recherche a permis d'identifier les principaux cadres de GE présents dans l'industrie et d'examiner différentes méthodologies et modèles de gestion visant à améliorer l'efficacité énergétique dans les systèmes de production.

#### **3.3.1 Méthodologie de la recherche**

Afin d'effectuer une interprétation itérative du sujet et de garder une flexibilité pour creuser la revue scientifique, le cercle herméneutique a guidé la stratégie de recherche. Les bases de données bibliographiques *Engineering Village* et *Web of Science* ont servi de support pour effectuer la revue scientifique. Ensuite, les bases de données textuelles comme *ScienceDirect*, *SpringerLink* et *IEEE Xplore* ont été exploitées pour pousser plus loin certains aspects particuliers de l'étude. L'équation de recherche a été définie comme suit : ("*energy management*" or "*energy management framework*" or "*energy efficient*") and "*manufacturing*" and "*sustainable development*". Dans la phase de collecte des données, l'étude a tenu compte des articles publiés de 2010 à 2019. Cependant, les références pertinentes citées dans ces articles, même datant des années précédentes, ont également été prises en compte. Les critères de sélection ont permis de conserver les articles abordant la GE comme sujet principal ou encore ceux se concentrant sur l'intégration énergétique dans les systèmes de production. Cette analyse a permis de discerner les concepts importants liés à la GE et a également orienté la recherche vers les trois principaux axes de référence de GE étudiés dans cet article : la GE dans les systèmes de production, l'intégration de la GE dans la structure organisationnelle et les modèles de maturité de la GE.

#### **3.3.2 Systèmes de GE**

Dans la littérature étudiée, la GE prend différentes définitions. D'après Field et Safari (2019), la GE englobe plusieurs approches où le contrôle des émissions polluantes est aussi important que la préservation des

ressources. Plus précisément, la norme ISO 50001 (ISO, 2018), qui concerne les systèmes de GE, établit que les objectifs de la GE résident dans l'amélioration de la performance énergétique d'une organisation. Autrement dit, cela implique de mieux gérer la consommation d'énergie pour améliorer la productivité, réduire l'empreinte carbone et éliminer les coûts associés au gaspillage énergétique. Dans leur étude des écarts entre les besoins de l'industrie et la littérature scientifique, Bunse *et al.* (2011) précisent que la GE est constituée de différentes phases où l'efficacité énergétique des systèmes de production doit être mesurée, surveillée et constamment évaluée. De leur côté, May *et al.* (2017) étendent cette définition en disant que la GE couvre également différents niveaux hiérarchiques opérationnels dans une usine de fabrication (c'est-à-dire les outils, l'équipement, les postes de travail, etc.). Ainsi, mesurer la performance énergétique à différents niveaux est nécessaire pour mettre en œuvre une stratégie de GE dans les systèmes de production (May *et al.*, 2013).

Chacune des phases de la GE permet aux décideurs d'identifier les opportunités d'amélioration dans le système énergétique et de suivre les effets de leurs décisions sur la consommation d'énergie (May *et al.*, 2017). Selon Gopalakrishnan *et al.* (2014), un système de GE est un instrument qui précise les objectifs et les politiques énergétiques à cibler, les procédures et les plans d'action à suivre, ainsi que les processus d'amélioration continue. Suivant les principes de la norme ISO 50001, Menghi *et al.* (2019) ont analysé différents outils et méthodes pour évaluer l'efficacité énergétique dans les systèmes de production selon trois groupes : l'analyse énergétique, l'évaluation énergétique et les mesures d'économie d'énergie. Il semble également exister des cadres axés sur la construction de la structure organisationnelle où les fonctions et les rôles des parties impliquées dans le système énergétique sont définis (voir Gordić *et al.*, 2010; Javied *et al.*, 2019). Finalement, il existe des outils pour évaluer le niveau de maturité énergétique des entreprises (voir Introna *et al.*, 2014; Jovanović et Filipović, 2016).

### 3.3.3 GE dans les systèmes de production

La GE dans les systèmes de production est composée de plusieurs éléments clés nécessaires pour pouvoir intégrer l'efficacité énergétique dans les opérations d'une entreprise. Cinq thèmes importants sont ressortis de l'analyse de la littérature : les moteurs de changement et les barrières, la mesure de l'efficacité énergétique, les systèmes de contrôle, l'évaluation de l'amélioration de l'efficacité énergétique et les leviers. La Figure 2 illustre les éléments clés de la GE dans les systèmes de production. Chaque élément est brièvement expliqué ci-dessous.

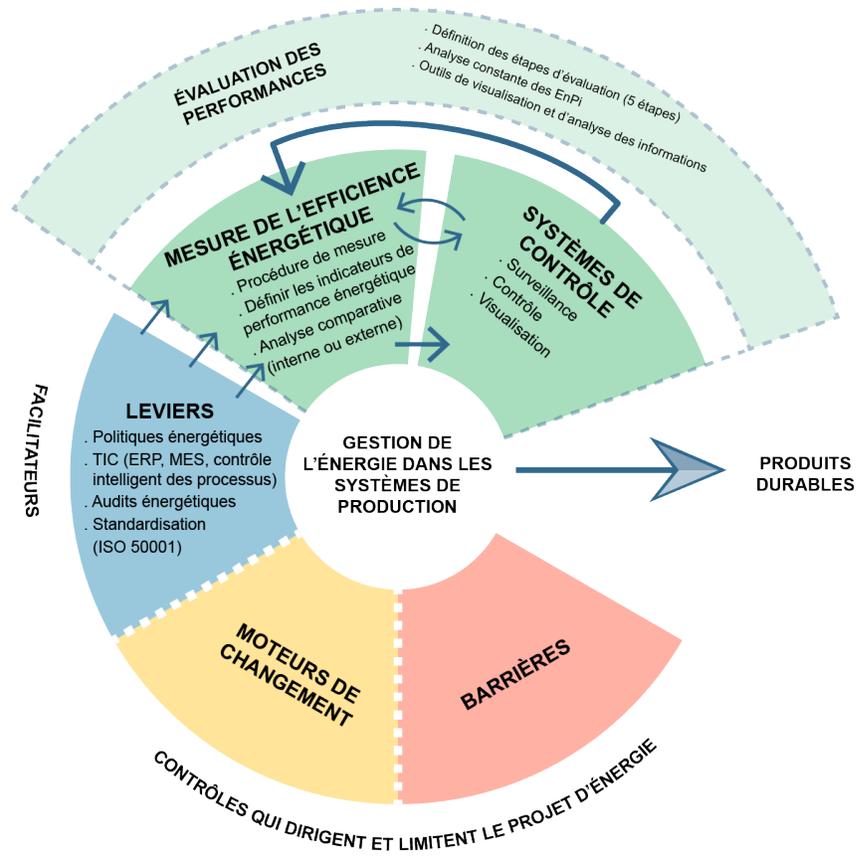


Figure 2. Éléments clés de la GE dans les systèmes de production

### 3.3.3.1 Les moteurs de changement et les barrières

Les moteurs de changement mettent en évidence les motivations des entreprises pour améliorer l'efficacité énergétique, grâce à l'adoption de meilleures pratiques, services et technologies énergétiquement efficaces. Ceux-ci influencent aussi l'organisation et la prise de décisions pour faire face aux barrières existantes qui entravent la transition énergétique (Trianni *et al.*, 2016). Selon les auteurs, les moteurs de changement peuvent être classés en quatre catégories : réglementaires, économiques, d'information et de formation. D'un autre côté, les barrières ralentissent et limitent le mouvement des entreprises cherchant à améliorer l'efficacité énergétique de leurs opérations. Cagno *et al.* (2013) ont développé une taxonomie dans laquelle l'origine de la barrière par rapport à l'entreprise peut être interne ou externe. Les auteurs ont présenté une liste de 27 barrières classées dans les catégories suivantes : économiques, comportementales, manque de sensibilisation, liées aux compétences, information, organisation et technologie. Par conséquent, avant de mener des projets d'efficacité énergétique dans les usines de production, l'identification et l'évaluation des moteurs de changement et des barrières semble essentielle afin d'avoir des systèmes de production moins énergivores et des politiques énergétiques réussies (May *et al.*, 2017).

### 3.3.3.2 *Mesure de l'efficacité énergétique*

La mesure de l'efficacité énergétique est la base pour contrôler la consommation d'énergie dans les processus de production, ce qui permet d'établir des décisions d'amélioration en fonction de ce qui a été observé et d'identifier les potentiels d'optimisation grâce à une surveillance constante de l'efficacité énergétique (Bunse *et al.*, 2011). Actuellement, la mesure des données énergétiques peut aller d'une mesure manuelle à des systèmes de mesure entièrement automatisés. D'après Dörr *et al.* (2013), la procédure de mesure commence par la définition et l'évaluation de la situation réelle, puis le plan d'action d'amélioration est ensuite défini. Dans le même ordre d'idées, Thiede *et al.* (2012) ont proposé d'évaluer et de mesurer la consommation d'énergie d'une entreprise en dressant un portfolio de chaque équipement en termes de puissance, de temps de fonctionnement et de consommation d'énergie estimée. La génération de données crée un aperçu de la consommation d'énergie et permet de déterminer les indicateurs de performance (Dörr *et al.*, 2013) nécessaires pour évaluer et suivre la performance des systèmes énergétiques (May *et al.*, 2017). La norme ISO 50001 (ISO, 2018) les définit comme des indicateurs de performance énergétique (EnPI). Les EnPI peuvent différer d'une entreprise à l'autre et peuvent ensuite être utilisés pour l'analyse comparative et le contrôle de la consommation d'énergie des entreprises (Javied *et al.*, 2015). Cette analyse comparative peut être utilisée au sein des entreprises pour évaluer périodiquement les progrès de la GE dans les systèmes de production ou à l'externe avec d'autres entreprises qui ont des processus et machines similaires, afin de comparer la performance énergétique des opérations et des équipements (Kent, 2018).

### 3.3.3.3 *Systèmes de contrôle*

La surveillance de l'efficacité énergétique semble par ailleurs nécessaire pour atteindre une meilleure GE dans les systèmes de production, puisqu'elle permet aux décideurs de voir les possibilités d'amélioration, de surveiller l'utilisation de l'énergie et d'observer les résultats de leurs décisions. Par conséquent, dans cette phase, les gestionnaires peuvent déterminer si les objectifs énergétiques sont atteignables ou non (May *et al.*, 2013) et identifier les processus les plus énergivores (Bunse *et al.*, 2011). De ce point de vue, les principaux consommateurs d'énergie industriels, qu'ils soient électriques, thermiques, chimiques ou mécaniques, doivent être identifiés, suivis et analysés en temps réel, afin d'augmenter l'efficacité énergétique dans les systèmes de production. Pour ce faire, Vikhorev *et al.* (2013) proposent un cadre de GE qui permet de surveiller la performance énergétique à tous les niveaux d'un système de production, alors que Vijayaraghavan et Dornfeld (2010) offrent une approche qui permet une surveillance de l'énergie à tous les niveaux d'une organisation. Enfin, Hopf et Müller (2015) ont proposé une approche de gestion visuelle basée sur des cartes de données énergétiques pour visualiser la consommation d'énergie des systèmes industriels.

### 3.3.3.4 *Évaluation des performances*

Pour mener à bien l'évaluation des performances, cinq étapes clés doivent être considérées : surveillance, mesure, analyse et évaluation, audit interne et revue de gestion (ISO, 2018). Les actions que les entreprises

déploient pour superviser les trois premières étapes peuvent être simples ou très complexes selon la taille de chaque organisation et la configuration de chaque processus. D'autre part, l'audit interne est un levier qui assure que le système de GE se conforme aux exigences et objectifs de l'organisation, ainsi qu'aux normes applicables (e.g. ISO 50001). La revue de gestion détermine si le système de GE reste efficace et évalue si les objectifs établis doivent être modifiés (Field et Safari, 2019) ou s'il est nécessaire de lancer des actions correctives et préventives. Avec la génération de données de consommation d'énergie, l'utilisation d'indicateurs de performance énergétique et les outils de visualisation et d'analyse des informations, la base de référence pour évaluer la performance énergétique des processus est alors établie (Dörr *et al.*, 2013).

#### 3.3.3.5 Leviers

Les leviers soutiennent le système de GE, car ils accélèrent et facilitent la transition des organisations vers une production plus durable d'un point de vue énergétique. Les leviers peuvent être des supports importants au niveau stratégique dans la phase de planification et au niveau opérationnel dans les processus de contrôle, de mesure et d'évaluation de la performance énergétique. Premièrement, les politiques énergétiques élaborées par la haute direction aident à définir des objectifs et des cibles énergétiques qui visent à améliorer la consommation d'énergie, à réduire les émissions environnementales et à réduire les coûts. Ensuite, les audits énergétiques assurent que le système de GE suit les objectifs et les buts établis (Gopalakrishnan *et al.*, 2014) et identifient les domaines où des améliorations sont nécessaires et où les objectifs n'ont pas été atteints. Un troisième levier, la norme ISO 50001, est conçue pour obtenir des résultats mesurables en matière d'efficacité énergétique et de consommation d'énergie, dans le but d'améliorer la performance énergétique d'une organisation (ISO, 2018). Finalement, les technologies de l'information et de la communication (TIC) aident à réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre grâce à la mesure et au contrôle en temps réel du comportement énergétique (Vikhorev *et al.*, 2013; May *et al.*, 2017). En plus, ceux-ci facilitent l'évaluation de la performance de l'efficacité énergétique, ce qui génère un meilleur contrôle des processus (May *et al.*, 2013).

#### 3.3.4 Intégration énergétique dans la structure organisationnelle

Un système de GE efficace implique un cadre organisationnel clair et bien défini dès le départ (Dörr *et al.*, 2013). Un tel cadre dépend de différents facteurs tels que la taille de l'entreprise, le type de secteur industriel, le nombre d'employés, les différents types d'énergie utilisés, etc. (Gordić *et al.*, 2010). Le poste de gestionnaire de l'énergie est crucial, car il aura un rôle de facilitateur, de conseiller, d'expert et de gestionnaire de projets énergétiques (Kent, 2018). Cela étant dit, la définition de la structure interne est un élément clé dans la formation des cadres organisationnels de l'énergie, car dans cette première étape, les dirigeants sont choisis, les responsabilités sont déléguées, les départements sont formés et les tâches sont définies pour les personnes qui seront impliquées (Javied *et al.*, 2019).

### 3.3.5 Modèles de maturité de la GE

Lors de la mise en œuvre d'un plan stratégique, il est difficile de déterminer la portée des objectifs si l'état initial de la situation est inconnu. La connaissance de la position de l'entreprise par rapport à ses problèmes les plus représentatifs permettra à la haute direction de déployer des plans d'action efficaces et bien orientés. Dans ce contexte, les modèles de maturité énergétiques d'après Introna *et al.* (2014) permettent à toute entreprise d'évaluer facilement et de manière indépendante son niveau de maturité énergétique. Cette évaluation permet aussi de créer un premier schéma de la situation actuelle de l'entreprise et de déterminer le point de départ du plan de GE. De même, du point de vue des auteurs, la maturité dans le domaine de la GE dépend des bonnes pratiques énergétiques de chaque entreprise, des technologies durables employées et de la façon dont chaque entreprise gère ses besoins énergétiques. À cet égard, Introna *et al.* (2014) ont développé un modèle de maturité qui analyse les enjeux clés de la gestion de la consommation d'énergie, conformément à la norme ISO 50001. Cependant, il existe d'autres modèles avec des approches, des dimensions et des structures différentes (voir Jovanović et Filipović, 2016; Kent, 2018).

## 3.4 Portrait de la GE

Les ressources financières nécessaires pour obtenir une certification ou pour embaucher des consultants externes qui aident à définir la base de la structure énergétique d'une organisation, peuvent être des barrières économiques, surtout pour les petites et moyennes entreprises (Bunse *et al.*, 2011). Pour cette raison, il ne faut pas oublier qu'un système de GE peut être basé sur la norme ISO 50001 ou il peut s'agir d'un système interne conçu par n'importe quelle entreprise (Kent, 2018; Field et Safari, 2019). Ainsi, dans cette section, les trois principaux axes qui ont émergé de la revue de littérature sont liés dans une image conceptuelle illustrant les principaux piliers d'un système de GE dans les systèmes de production. La Figure 3 montre les principales caractéristiques de chaque élément et la manière dont ils sont interreliés.

La première dimension de l'image conceptuelle correspond à l'évaluation initiale du degré de maturité des entreprises. La relation qu'elle entretient avec les deux autres dimensions est directe, car la connaissance de la magnitude des problèmes permettra de déterminer les ressources, les outils, les procédures et le personnel nécessaires pour mettre de l'avant le plan d'action. En d'autres mots, le niveau de développement de chacun des éléments clés de la GE sera crucial pour la croissance efficace de l'organisation (Introna *et al.*, 2014).

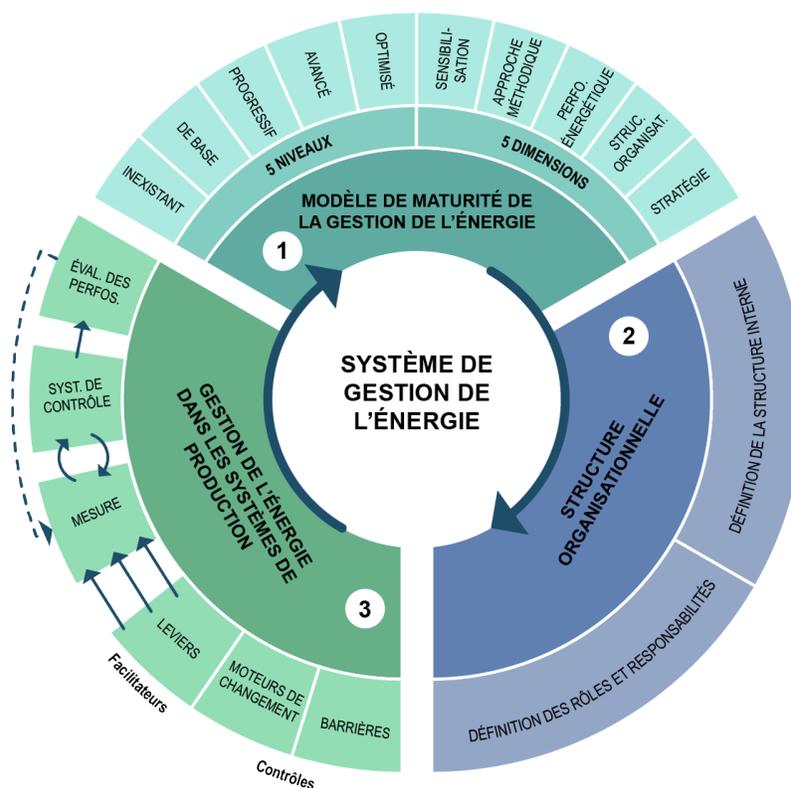


Figure 3. Portrait conceptuel d'un système de GE

Par ailleurs, la dimension de la structure organisationnelle est fondamentale dans ce cycle, car les équipes construites pour faire face aux enjeux énergétiques doivent partager la vision de leurs dirigeants et posséder les outils nécessaires leur permettant de mesurer, contrôler, évaluer et mettre en œuvre avec succès le système de GE. La formation, les compétences et les qualités de chaque membre de l'équipe contribueront en synergie à l'amélioration de la performance énergétique de l'organisation (Kent, 2018) et de son niveau de maturité. De même, sans l'existence d'un système d'information (structures TIC) permettant de visualiser avec précision les informations critiques et essentielles des opérations, la structure organisationnelle sera inefficace (Dörr *et al.*, 2013). Pour cette raison, une rétroaction constante à tous les niveaux organisationnels permettra de suivre de près les résultats de chaque élément du système de GE. Enfin, au cœur de la troisième dimension se trouvent les éléments clés qui permettent d'améliorer la performance énergétique des systèmes de production d'une entreprise. Premièrement, les moteurs de changement et les barrières stimuleront ou ralentiront le niveau de maturité organisationnelle. La mesure de l'efficacité énergétique permettra une visualisation transparente des flux énergétiques au sein des opérations (Richert, 2017) et aidera à identifier des secteurs pouvant être optimisés (May *et al.*, 2017) grâce à l'utilisation des EnPIs qui fourniront des informations périodiques sur la

performance énergétique des processus (Gopalakrishnan *et al.*, 2014). D'autre part, les systèmes de contrôle et de surveillance aideront à identifier les processus les plus énergivores à travers différentes interfaces graphiques (Vikhorev *et al.*, 2013) montrant la consommation d'énergie en temps réel grâce à l'utilisation de dispositifs et de capteurs intelligents (May *et al.*, 2013). Ces systèmes permettront de comprendre les profils d'utilisation de l'énergie et de réduire son utilisation dans les processus de fabrication (Vijayaraghavan et Dornfeld, 2010). De même, l'assurance d'une performance énergétique optimale sera seulement possible en tenant compte des méthodes appropriées d'évaluation (Bunse *et al.*, 2011) et de la participation active de toute l'équipe. Finalement, les leviers, en tant que mécanismes de poussée, amélioreront la croissance et la performance de l'ensemble du système de GE à tous les niveaux organisationnels. En l'absence de l'un de ces éléments, il est fort probable que les changements énergétiques ne perdureront pas ou ne généreront pas les résultats escomptés.

### **3.5 Conclusion**

Pour atteindre les cibles mondiales en matière de développement durable et pour combattre efficacement les problèmes énergétiques actuels, les organisations sont tenues de neutraliser l'utilisation inefficace de l'énergie dans leurs opérations à travers de bonnes pratiques qui génèrent une valeur industrielle durable. Ainsi, elles doivent restructurer leur culture organisationnelle et l'ériger sur les dimensions de la durabilité pour rentabiliser la consommation d'énergie. Dans ce contexte, les systèmes de GE dans les processus de production sont des propulseurs de changement qui permettent d'augmenter l'efficacité énergétique des opérations, de préserver les ressources et de réduire l'empreinte carbone. Le travail mené dans cette recherche a exploré la littérature dans le but d'identifier et de lier, dans une image conceptuelle, les éléments clés de la GE dans les systèmes de production. La revue de littérature a révélé qu'un système de GE se développe en plusieurs étapes. La première étape identifie à travers une analyse de maturité initiale l'amplitude du problème énergétique et aide les décideurs à définir les ressources, les outils et le personnel à déployer pour mener à bien les plans d'action. La seconde étape aborde la structure organisationnelle qui doit être construite en fonction de l'envergure des objectifs énergétiques de l'organisation, de sa taille et des ressources disponibles. La dernière étape se centralise sur la mesure, le contrôle, l'évaluation et la mise en œuvre du système de GE. Les trois étapes fournissent aux organisations un cadre de GE montrant les dimensions sur lesquelles elles doivent travailler pour améliorer la performance énergétique de leurs opérations. De même, l'applicabilité du portrait énergétique dépendra de divers facteurs clés de succès tels que les stratégies énergétiques à court, moyen et long terme, l'existence d'une unité de gestion de l'énergie, le suivi de la performance énergétique des opérations ainsi que des audits énergétiques. La présence de tels facteurs tout au long du processus de mise en œuvre du système de GE peut ainsi faciliter l'atteinte des objectifs énergétiques des organisations.

Dans une recherche future, il serait intéressant d'étudier l'évolution de la maturité énergétique d'une entreprise par rapport à la dimension de la structure organisationnelle, étant donné que la participation active de toutes les personnes impliquées dans le processus de changement favorise la croissance énergétique progressive de l'organisation. Nonobstant, la mise en œuvre de tout système énergétique commençant par l'approbation de la haute direction d'une entreprise, le leadership des décideurs et leur motivation à vouloir changer les choses semble la véritable clé du progrès.

### 3.6 Références

- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 667-679.
- Cagno, E., Worrell, E., Trianni, A., & Pugliese, G. (2013). A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 290-308.
- Carvalho, N., Chaim, O., Cazarini, E., & Gerolamo, M. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 21, 671-678.
- Chryssolouris, E. L. K. E. (2006). *Manufacturing Systems: Theory and Practice*. Springer-Verlag New York, XXVI, 606.
- Dörr, M., Wahren, S., & Bauernhansl, T. (2013). Methodology for Energy Efficiency on Process Level. *Procedia CIRP*, 7, 652-657.
- Duflou, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Kellens, K. (2012). Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals*, 61(2), 587-609.
- Field, A., & Safari, a. O. R. M. C. (2019). - ISO 50001 - A strategic guide to establishing an energy management system.
- Gopalakrishnan, B., Ramamoorthy, K., Crowe, E., Chaudhari, S., & Latif, H. (2014). A structured approach for facilitating the implementation of ISO 50001 standard in the manufacturing sector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 154-165.
- Gordić, D., Babić, M., Jovičić, N., Šušteršič, V., Končalović, D., & Jelić, D. (2010). Development of energy management system – Case study of Serbian car manufacturer. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2783-2790.
- Hopf, H., & Müller, E. (2015). Providing energy data and information for sustainable manufacturing systems by Energy Cards. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 36, 76-83.
- Introna, V., Cesarotti, V., Benedetti, M., Biagiotti, S., & Rotunno, R. (2014). Energy Management Maturity Model: an organizational tool to foster the continuous reduction of energy consumption in companies. *Journal of Cleaner Production*, 83, 108-117.
- IEA 2007. *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 emission*.

- ISO. (2018). ISO 50001: 2018, Energy management systems.
- Javied, T., Deutsch, M., & Franke, J. (2019). A model for integrating energy management in lean production. *Procedia CIRP*, 84, 357-361.
- Javied, T., Rackow, T., & Franke, J. (2015). Implementing Energy Management System to Increase Energy Efficiency in Manufacturing Companies. *Procedia CIRP*, 26, 156-161.
- Jovanović, B., & Filipović, J. (2016). ISO 50001 standard-based energy management maturity model – proposal and validation in industry. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2744-2755.
- Kent, R. (2018). Introduction to energy management. In *Energy Management in Plastics Processing* (pp. 3-32).
- May, G., Stahl, B., Taisch, M., & Kiritsis, D. (2017). Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1464-1489.
- May, G., Taisch, M., & Kelly, D. (2013). Enhanced Energy Management in Manufacturing through Systems Integration. In *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 7525-7530). New York: IEEE.
- Menghi, R., Papetti, A., Germani, M., & Marconi, M. (2019). Energy efficiency of manufacturing systems: A review of energy assessment methods and tools. *Journal of Cleaner Production*, 240.
- Richert, M. (2017). An energy management framework tailor-made for SMEs: Case study of a German car company. *Journal of Cleaner Production*, 164, 221-229.
- Salonitis, K., & Ball, P. (2013). Energy Efficient Manufacturing from Machine Tools to Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*, 7, 634-639.
- Schönsleben, P., 2007. *Integral Logistics Management. Operations and Supply Chain Management in Comprehensive Value-added Networks*, third ed. Auerbach, Boca Raton, FL.
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536-541.
- Thiede, S., Bogdanski, G., & Herrmann, C. (2012). A Systematic Method for Increasing the Energy and Resource Efficiency in Manufacturing Companies. *Procedia CIRP*, 2, 28-33.
- Trianni, A., Cagno, E., Marchesani, F., & Spallina, G. (2016). Classification of drivers for industrial energy efficiency and their effect on the barriers affecting the investment decision-making process. *Energy Efficiency*, 10(1), 199-215.
- Vijayaraghavan, A., & Dornfeld, D. (2010). Automated energy monitoring of machine tools. *CIRP Annals*, 59(1), 21-24.
- Vikhorev, K., Greenough, R., & Brown, N. (2013). An advanced energy management framework to promote energy awareness. *Journal of Cleaner Production*, 43, 103-112.

## **Chapitre 4 : Évaluation des pratiques de gestion de l'énergie dans l'industrie forestière**

*L'article intitulé « Évaluation des pratiques de gestion de l'énergie dans l'industrie forestière » est inséré dans cette section du mémoire. Il a été soumis le 27 novembre 2020 à la conférence « CIGI QUALITA : Conférence Internationale Génie Industriel QUALITA » et présenté à la 14<sup>e</sup> édition de cette conférence le 6 mai 2021 à Grenoble, France. La version publiée est identique à la version présentée dans ce mémoire.*

## 4.1 Résumé

Le secteur forestier est l'une des industries les plus énergivores dans plusieurs pays et bien qu'elle produise parfois sa propre énergie à partir de biomasse, elle continue d'émettre des quantités importantes de gaz à effet de serre. Pour cette raison, cette étude a analysé les pratiques de gestion de l'énergie (GE) pour cette industrie. Une revue de littérature a permis d'identifier différents cadres d'analyse de la GE et d'établir une structure d'évaluation basée sur ces méthodologies. L'étude du profil énergétique de l'industrie forestière a ensuite été réalisée à travers cinq dimensions : utilisation de l'énergie dans le secteur forestier, contrôle de la transition énergétique, incitatifs, structure organisationnelle et GE au niveau opérationnel. Les résultats de l'étude montrent que les programmes de GE et les investissements dans les technologies écoénergétiques ont le potentiel d'accélérer la transition énergétique de l'industrie forestière, visant à établir une économie sobre en carbone dans les années à venir. Ceux-ci se sont également avérés être des mécanismes importants pour réduire la consommation d'énergie de plusieurs entreprises de ce secteur.

## **4.2 Abstract**

The forest sector is one of the most energy intensive consumers in many countries and although it often produces its own energy from biomass, it continues to emit significant amounts of greenhouse gas emissions. For this reason, this study analyzed energy management practices in the forestry sector. A literature review first led to the identification of different energy management frameworks and to the establishment of an evaluation structure based on these methodologies. The energy profile of the forest industry was then carried out through five dimensions: energy use in the forestry sector, energy transition control, incentives, organizational structure and energy management at the operational level. This study has shown that energy management programs and investments in energy efficient technologies have the potential to accelerate the energy transition of the forest industry that aims to establish a low carbon economy in the years to come. These have also proven to be important mechanisms for reducing the energy consumption of several companies in this sector.

### 4.3 Introduction

Partout dans le monde, les stratégies énergétiques sont au cœur des intérêts des gouvernements et des grandes organisations, car leur développement contribue à la lutte contre le réchauffement planétaire. Depuis 1980, les sources d'énergie sont devenues plus accessibles et interchangeables, mais combiné à la croissance démographique et économique, l'utilisation de l'énergie a contribué à une augmentation des émissions de carbone de la planète de 52% au cours des 25 dernières années (National Energy Board, 2019).

Dans ce contexte, l'industrie forestière apparaît comme une grande consommatrice d'énergie, en raison du sous-secteur des pâtes et papiers qui est l'une des cinq industries les plus énergivores au monde (Andersson & Thollander, 2019). Pour réduire son empreinte écologique, ce secteur doit donc s'appuyer sur des stratégies et des politiques énergétiques lui permettant d'atteindre les objectifs de sa transition énergétique, qui un peu partout dans le monde progressent vers une réduction de l'utilisation des sources d'énergie fossiles et la valorisation du potentiel énergétique de la biomasse forestière. Toutefois, l'industrie forestière doit aussi concevoir des alternatives lui permettant d'améliorer son efficacité énergétique et sa rentabilité à court terme, en réduisant ses coûts d'exploitation liés au gaspillage d'énergie. À cet égard, la gestion de l'énergie (GE) et l'amélioration de l'efficacité énergétique sont des composantes qui doivent continuer à être développées (Ressources Naturelles Canada [RNCa], 2019a) pour améliorer la compétitivité de l'industrie forestière et ainsi tendre vers un avenir énergétique durable.

Cet article vise à analyser dans une perspective d'ensemble, les pratiques énergétiques de l'industrie forestière et à établir les critères d'évaluation nécessaires pour permettre à cette industrie d'explorer ses enjeux énergétiques, ses meilleures pratiques de GE et ses opportunités d'amélioration. Pour atteindre cet objectif, une revue de la littérature a permis d'examiner la chaîne de valeur de l'industrie forestière, ses secteurs d'activités, sa situation énergétique actuelle et l'importance de la GE dans cette industrie. Par la suite, sur la base de différentes méthodologies et cadres d'analyse de la GE trouvés dans la littérature, des axes d'évaluation pertinents ont été établis et ont permis d'analyser le contexte énergétique de l'industrie forestière dans différents pays du monde. Les résultats de l'étude montrent que le niveau de maturité énergétique des industries forestières varie considérablement d'un pays à l'autre. De même, cet article identifie différents vecteurs stratégiques importants favorisant la transition énergétique de cette industrie. Cette recherche révèle aussi que les technologies écoénergétiques, les systèmes de GE et la maintenance des équipements sont des facteurs clés permettant aux entreprises de ce secteur d'augmenter leur potentiel d'économie d'énergie de manière significative et durable.

Cet article décrit, à la section 2, la revue de la littérature pertinente à l'étude. La méthodologie de recherche est ensuite détaillée à la section 3. La section 4 présente l'analyse énergétique comparative de l'industrie forestière dans le monde. L'article se termine par une brève conclusion.

## **4.4 Revue de la littérature**

Cette recherche s'intéressant à l'industrie forestière, il apparaît d'abord nécessaire de se familiariser avec son mode de fonctionnement. D'un point de vue général, selon Sandberg *et al.* (2014), le secteur forestier peut être classé en deux activités principales, soit l'industrie forestière et l'industrie des produits du bois. D'une part, l'industrie forestière comprend la foresterie et l'exploitation forestière, la fabrication de pâtes et papiers, la fabrication de produits en bois et l'exploitation de la biomasse forestière. D'autre part, l'industrie des produits du bois est liée aux panneaux, aux meubles, aux poutrelles, etc. D'un autre côté, bien qu'il s'agisse d'un secteur à forte intensité énergétique, principalement en raison de l'industrie des pâtes et papiers, sa capacité à produire sa propre électricité à partir de la bioénergie a considérablement réduit sa dépendance aux combustibles fossiles, ce qui a entraîné une baisse constante de ses émissions de GES ces dernières années (RNCAN, 2020). Malgré tout, son rôle comme émetteur de GES reste majeur.

### **4.4.1 Industrie des pâtes et papiers**

Les entreprises de ce sous-secteur transforment les matières végétales ligneuses en une grande variété de pâtes, papiers et cartons (Adès, 2010). De ce fait, les usines de pâtes et papiers intègrent une grande variété de procédés différents lors de la fabrication de leurs produits (voir Bajpai, 2016b). Ces procédés consomment une grande quantité d'énergie et les plus énergivores sont la mise en pâte et le séchage du papier. D'un autre côté, l'ère des médias électroniques a provoqué un effondrement rapide des marchés du papier journal, du papier d'impression et d'écriture (Ministère des Ressources naturelles et de la faune [MRNF], 2012). À l'échelle mondiale, plusieurs fermetures d'usines de papier d'impression et d'écriture ont eu lieu (RNCAN, 2019b). Pour améliorer sa rentabilité et sa compétitivité, l'industrie doit poursuivre ses efforts pour réduire ses coûts de fabrication. L'amélioration de l'efficacité énergétique est un moyen important pour y arriver, puisque l'énergie représente jusqu'à 15% de ses coûts opérationnels totaux (Bajpai, 2016a). Bien que des progrès en matière de conservation de l'énergie soient observés, la GE dans les systèmes de production demeure un élément clé à mettre en valeur. À cet égard, la GE doit être une composante présente dans les stratégies de développement de cette industrie.

### **4.4.2 Fabrication de produits du bois**

Le sous-secteur de la fabrication des produits du bois est composé de différents domaines d'activité visant à transformer le bois en produits finis. Les principales activités de ce sous-secteur sont les scieries, les usines de panneaux et les usines de deuxième et de troisième transformation (MRNF, 2012). Les scieries sont l'axe central

de ce sous-secteur, puisqu'elles sont en charge d'effectuer la première transformation de la matière première pour la transformer en bois de sciage ou bois d'œuvre. Après la transformation, la matière première traitée est fournie aux usines de panneaux et aux usines de deuxième et de troisième transformation. Les scieries fournissent également des copeaux à l'industrie des pâtes et papiers et des sous-produits à l'industrie de la cogénération (MRNF, 2012). D'autre part, les scieries transforment les billes de bois en bois d'œuvre à l'aide de diverses opérations qui nécessitent des équipements qui consomment beaucoup d'énergie. De plus, l'énergie électrique utilisée représente une part importante de la consommation totale d'énergie et des coûts d'exploitation. Dans leur étude, Gopalakrishnan *et al.* (2012) mettent en relief que le manque de connaissances sur les avantages qu'une efficacité énergétique accrue pourrait apporter aux scieries entraîne des coûts opérationnels élevés.

#### 4.4.3 GE dans l'industrie

La GE se concentre principalement sur l'amélioration de la performance énergétique d'une organisation, dans le but d'améliorer la productivité, de réduire l'empreinte carbone et d'éliminer les coûts associés au gaspillage d'énergie, tandis que les systèmes de GE sont des instruments permettant d'établir des politiques énergétiques et des objectifs énergétiques, ainsi que des processus et des procédures pour atteindre ces objectifs (ISO, 2018). Malgré le fait que les systèmes de GE sont peu coûteux, les entreprises se concentrent souvent uniquement sur la mise en œuvre de technologies écoénergétiques (Johansson et Thollander, 2018), oubliant que la GE dans les systèmes de production permet de conscientiser le personnel sur l'utilisation de l'énergie (Thollander *et al.*, 2020a). Dans ce contexte, Bunse *et al.* (2011) établissent qu'au niveau opérationnel, la GE est constituée de différentes phases où l'efficacité énergétique doit être mesurée, surveillée et fréquemment évaluée à l'aide d'indicateurs de performance énergétique (KPIs). De même, les auteurs soulignent l'importance des technologies de l'information et des normes (e.g. ISO 50001) comme incitatifs.

Dans la littérature, plusieurs études dressent le portrait énergétique de différents secteurs industriels en se basant sur des dimensions clés de la GE. Hossain *et al.* (2020) ont analysé les meilleures pratiques énergétiques de l'industrie du ciment au Bangladesh, à travers un questionnaire qui a pris en compte plusieurs éléments clés de la GE. Une étude similaire a été menée par Hasan *et al.* (2018) dans l'industrie du fer et de l'acier dans le même pays. De leur côté, Abdelaziz *et al.* (2011) ont défini que l'efficacité énergétique industrielle peut être améliorée grâce à des pratiques de GE, la mise en œuvre de nouvelles technologies et l'élaboration de politiques énergétiques. Cependant, dans la littérature, il existe très peu d'études analysant les pratiques et les enjeux énergétiques de l'industrie forestière. À titre d'exemple, Lawrence *et al.* (2019) ont récemment analysé l'état de maturité énergétique de l'industrie suédoise des pâtes et papiers, en mettant l'accent sur les moteurs de changement et les barrières de la GE. Pour cette même industrie, Andersson et Thollander (2019) ont analysé le niveau de développement des indicateurs de performance énergétiques, où les résultats ont montré que le

faible développement de ces indicateurs est dû au manque de ressources, de connaissances et de compétences. Dans la prochaine section, une description des grandes étapes qui ont permis de mener à terme la recherche est présentée.

## 4.5 Méthodologie

Afin d'évaluer le profil énergétique de l'industrie forestière, le présent travail a été divisé en trois étapes. De façon générale, la recherche a suivi la stratégie de recherche du cercle herméneutique, car elle permet d'explorer de manière flexible et itérative les aspects les plus importants du sujet à l'étude et d'ajuster le contenu de la recherche au fur et à mesure de la découverte de nouvelles informations. Par conséquent, les bases de données *Engineering Village*, *Web of Science*, *ScienceDirect* et *IEEE Xplore* ont servi de support à la revue scientifique. Dans la phase de collecte des données, l'étude a tenu compte des articles publiés de 2010 à 2020. Les références pertinentes tirées de ces articles, même datant des années précédentes, ont également été prises en compte.

La première étape a consisté à effectuer une revue de la littérature décrivant la chaîne de valeur de l'industrie forestière, analysant le contexte énergétique de ses sous-secteurs les plus importants et discutant de l'importance de la GE dans les systèmes de production. Par la suite, la deuxième étape a consisté à identifier les critères d'évaluation nécessaires à la réalisation de la recherche et à développer un cadre d'analyse qui a permis de dresser l'étude comparative énergétique de l'industrie forestière. Afin de déterminer les axes du cadre d'analyse utilisé dans le présent travail, l'équation de recherche a été définie comme suit : ("*energy management practices*" or "*energy management*") and "*industries*" and "*manufacturing*" and "*framework*". L'étude des articles trouvés s'est ensuite faite de manière inductive, c'est-à-dire que les axes du cadre d'analyse ont été déterminés après avoir examiné de manière exhaustive les articles sélectionnés. Par conséquent, à l'issue de cette analyse et en se basant sur les méthodologies et cadres de la GE utilisés par Hossain *et al.* (2020), Abdelaziz *et al.* (2011) et Bunse *et al.* (2011), il a été possible de déterminer cinq axes clés d'évaluation qui ont par la suite permis de dresser le portrait énergétique de l'industrie forestière : utilisation de l'énergie dans le secteur forestier, contrôle de la transition énergétique, incitatifs, structure organisationnelle et GE au niveau opérationnel. Dans la troisième étape de la recherche, en fonction du cadre d'analyse dégagé, l'étude comparative de l'état énergétique de l'industrie forestière a été effectuée en évaluant les deux sous-secteurs les plus énergivores (l'industrie des pâtes et papiers et l'industrie de la fabrication de produits du bois). Étant donné que les bases de données mentionnées précédemment contiennent peu d'information sur les meilleures pratiques de la GE dans l'industrie forestière, des rapports et publications du gouvernement, des études de cas de même que des sites web d'organisations et d'agences spécialisées dans la GE ont également été consultés. Au final, toutes ces étapes de la revue littéraire ont permis de dresser le portrait énergétique de l'industrie forestière par l'entremise d'un cadre d'analyse rassemblant les concepts clés de la GE.

## 4.6 Portrait énergétique de l'industrie forestière

Dans cette section, l'analyse du profil énergétique de l'industrie forestière est présentée, basée sur cinq axes d'évaluation dégagés d'une revue de la littérature. La Figure 4 dévoile les axes d'évaluation de cette étude sous la forme d'un cadre d'analyse dimensionnel qui montre la manière dont ceux-ci sont interreliés. Ces axes sont détaillés ci-après.

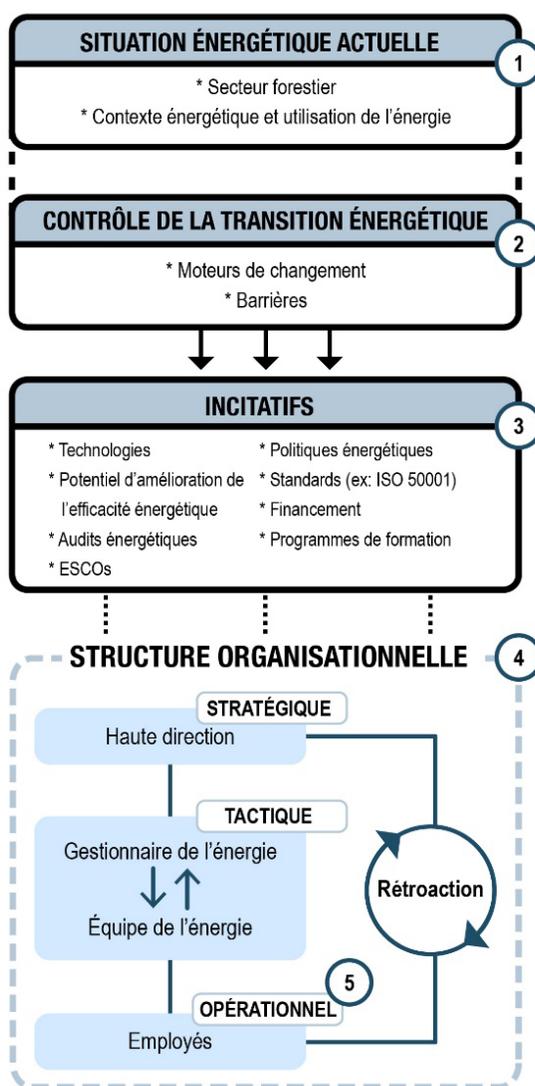


Figure 4. Cadre d'analyse dimensionnel des pratiques de GE dans l'industrie forestière

#### 4.6.1 Situation énergétique de l'industrie forestière : Utilisation de l'énergie

Dans l'industrie des pâtes et papiers, l'électricité et le gaz naturel sont les sources d'énergie les plus utilisées, selon le type de procédé pour produire la pâte. Le procédé chimique nécessite une grande quantité d'énergie thermique sous la forme de vapeur, tandis que le procédé mécanique nécessite de grandes quantités d'électricité (Thollander *et al.*, 2020b). À son tour, l'électricité alimente tous les équipements des usines, tandis que le gaz naturel produit la vapeur et l'air chaud nécessaire aux processus de production (Bajpai, 2016a). D'autre part, de l'électricité peut être produite à partir de la biomasse résiduelle générée dans les processus de production. Il s'agit principalement de boues, de liqueur noire, de déchets de bois et d'écorces. L'industrie des pâtes et papiers produit également de l'électricité et de la chaleur à partir de systèmes de cogénération et certaines usines possèdent leur propre centrale hydroélectrique (Adès, 2010). Étant donné que la biomasse est considérée comme neutre en carbone (CO<sub>2</sub>), sa valorisation énergétique contribue à réduire les émissions de GES émises par l'industrie. En revanche, dans la fabrication du papier, le séchage est une activité très énergivore. D'énormes quantités de vapeur sont utilisées dans ce processus et le peu d'électricité utilisé sert à alimenter des pompes. Les processus les plus énergivores dans les usines de pâtes et papiers sont la production de pâte et le séchage du papier (Bajpai, 2016b). Il est important de mentionner que la consommation d'énergie dans les différentes industries de pâtes et papiers à travers le monde peut varier en fonction des procédés utilisés, de la taille de l'usine, de la technologie utilisée, des prix des combustibles, des pratiques de GE, etc. (voir Bajpai, 2016b). Au Canada, 62% de la consommation totale d'énergie de ce sous-secteur provient de la biomasse (Gouvernement du Canada, 2020). Ailleurs dans le monde, cette consommation issue de la biomasse représente plus de 65% aux États-Unis (EIA, 2011), 55,2% en Autriche (Posch *et al.*, 2015) et 96% en Suède (Swedish Forest Industries Federation [SFID], s.d.). D'autre part, dans le sous-secteur canadien de production de bois d'œuvre, la biomasse représente 54,4% de l'énergie totale utilisée, tandis que l'électricité représente 25,6% et le gaz naturel 14,2%. (Nyboer, J., et Bennett cité dans Quesada-Pineda *et al.*, 2015). En revanche, en 2016, des scieries suédoises étaient quasi exemptes d'hydrocarbures, ce qui montre que ce pays est en voie de devenir l'un des premiers à éliminer les combustibles fossiles de ses processus de production (SFID, s.d.).

#### 4.6.2 Contrôle de la transition énergétique : Les moteurs de changement et les barrières

De manière générale, les moteurs de changement représentent les motivations des entreprises à vouloir améliorer leur efficacité énergétique, tandis que les barrières bloquent ces aspirations. Dans la littérature, une analyse réalisée en Suède dans l'industrie des pâtes et papiers a analysé en détail les principaux moteurs et barrières de ce sous-secteur à travers un questionnaire réalisé auprès de 29 entreprises du pays (Lawrence *et al.*, 2019). Dans leur étude, les auteurs ont déterminé que les facteurs économiques axés sur « la réduction des coûts énergétiques » sont les principaux moteurs de la GE dans ce sous-secteur, tandis que l'une des barrières

les plus importantes était liée à la connaissance, dont la « grande complexité des processus de production ». D'autre part, dans une entreprise de pâtes et papiers de l'ouest du Canada, selon l'étude de cas menée par *Clean Energy Ministerial* [CEM] (2016a), « l'urgent besoin de l'usine de réduire les coûts a été un facteur de motivation essentiel » qui coïncide avec les résultats présentés par Lawrence *et al.* (2019). Aussi, la collaboration externe avec le gouvernement, le désir d'être plus compétitif, l'ambition du personnel et les audits externes ont été d'autres moteurs qui ont soutenu cette entreprise canadienne lors de la mise en place de son système de GE. Ses barrières étaient principalement liées à la faible disponibilité des capitaux et au manque d'intérêt pour l'efficacité énergétique étant donné que les cadres supérieurs ignoraient les bénéfices à tirer de l'implantation d'un système de GE. Par ailleurs, dans une entreprise chilienne de pâtes et papiers évaluée par CEM (2018), les motivations de cette usine étaient plutôt de nature réglementaire, car l'entreprise cherchait à avoir une stratégie énergétique à long terme qui lui permettrait d'être plus compétitive et d'avoir une image plus écologique. L'une des barrières les plus difficiles pour cette entreprise sud-américaine fut la complexité et la diversité de ses processus. En Autriche, les usines de pâtes et papiers sont également confrontées à une barrière qui pourrait être qualifiée d'énergie renouvelable limitée, car la topographie du pays les empêche d'élargir leur production d'énergie au-delà de la biomasse (Posch *et al.*, 2015).

#### 4.6.3 Incitatifs

Toute la documentation consultée autour de la GE semble par ailleurs mettre en relief la nécessité de prendre en compte la présence d'incitatifs pour favoriser un virage durable et de tels leviers peuvent prendre plusieurs formes.

##### 4.6.3.1 Technologie

L'utilisation de la biomasse est devenue une pierre angulaire de l'industrie forestière, car elle offre des avantages énergétiques que les autres secteurs manufacturiers ne possèdent pas. Les industries de ce secteur qui disposent d'une infrastructure moderne leur permettant d'être plus autonomes énergétiquement se concentrent actuellement sur la réduction de leur consommation d'énergie et l'augmentation de la production d'énergie (Bajpai, 2016b). Dans les usines des pâtes et papiers, des améliorations technologiques permettent d'atteindre ces deux objectifs. Dans une analyse composée de divers scénarios, Fleiter *et al.* (2012) ont évalué 17 technologies différentes pour les pâtes et papiers et concluent que les technologies présentant le plus grand potentiel d'économie d'énergie s'avéraient la récupération de chaleur dans les usines de papier et l'utilisation de technologies innovantes de séchage du papier. Cependant, Bajpai (2016a) mentionne qu'après quelques tentatives initiales pour introduire des nouvelles technologies de séchage, la R&D dans ce domaine n'a plus progressé. Dans l'analyse de Fleiter *et al.* (2012), après un sondage auprès de certains représentants allemands de ce sous-secteur, les coûts élevés liés à l'acquisition de nouvelles technologies se sont révélés être une barrière économique pour l'industrie. Les industriels ont établi à deux ans le délai maximal de récupération

acceptable pour les investissements liés à l'amélioration de l'efficacité énergétique. D'autre part, en Suède il y a des initiatives en cours de développement visant à éliminer le peu d'énergie fossile utilisé par l'industrie forestière, qui sert dans les fours à chaux des usines de pâtes et papiers et en moindre quantité dans la production de papier. Plusieurs usines ont déjà investi dans des alternatives leur permettant d'utiliser des granules de bois et d'autres biocarburants au lieu de l'huile fossile dans les fours à chaux (SFID, s.d.). Dans l'industrie forestière canadienne, il existe actuellement de nombreuses technologies nouvelles qui permettent la création d'une grande variété de biocarburants à partir de la biomasse forestière, tels que les procédés de gazéification, de carbonisation et de torréfaction, ainsi que la pyrolyse et les liquides de transport. De même, les systèmes de cogénération permettent de produire de l'électricité et de la chaleur simultanément, ce qui rend les installations moins énergivores. Toutefois, certaines de ces technologies n'ont pas encore atteint un stade mature de commercialisation (MRNF, 2012). D'autre part, l'avenue de la bioénergie vise à développer des bioraffineries intégrées et diversifiées produisant de la pâte, du papier, des produits chimiques, de la bioénergie, des biocarburants, etc. (Bajpai, 2016a). À cet égard, pour l'industrie du sciage et des pâtes et papiers, le développement de ces technologies émergentes est l'occasion de transformer les résidus de bois pour les utiliser à des fins énergétiques, afin d'améliorer l'efficacité énergétique de plusieurs entreprises du secteur (MRNF, 2012).

#### *4.6.3.2 Potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique*

La première étape du déploiement de toute initiative d'amélioration énergétique commence par la création d'un programme de GE stratégique et bien ciblé. Comme mentionné précédemment, un système de GE permet aux organisations d'augmenter leur efficacité énergétique et leur compétitivité grâce à une surveillance continue de la consommation d'énergie (Bajpai, 2016c). Également, en plus de produire des résultats rapidement, les coûts de mise en œuvre ont régulièrement des retours sur investissement de moins de deux ans tout en générant des économies continues (RNCAN, 2019a). À titre d'exemple, dans une usine de pâtes et papiers située dans l'ouest du Canada, le coût de mise en œuvre seul du système de GE basé sur le cadre ISO 50001 a eu un retour sur investissement de moins d'un an, et ce, sans tenir compte des coûts des projets d'économie d'énergie (CEM, 2016a). De même, les systèmes de GE correctement implantés peuvent générer des économies d'énergie considérables. À titre d'exemple, dans une usine indonésienne de pâtes et papiers CEM (2016b), suite à l'implantation d'un système de GE, l'usine a obtenu des économies d'énergie totales d'environ 15,2%, ce qui équivaut à une économie d'énergie de 428,834 GJ. Grâce à son système de GE, l'entreprise a réalisé des économies d'énergie annuelles de 1,6 millions USD. Par ailleurs, selon l'étude de cas CEM (2016a), l'usine canadienne de pâtes et papiers sous étude a déclaré avoir eu une réduction de 5,6% de sa consommation d'électricité après avoir mis en place son système de GE basé sur la norme ISO 50001, ce qui s'est traduit par une économie d'énergie cumulée de 181 GWh en trois ans. Les systèmes de GE semblent donc faire leur preuve. Néanmoins, sans un investissement important dans des technologies écoénergétiques, sans l'existence

de bonnes pratiques de GE (Johansson & Thollander, 2018) et sans l'entretien adéquat des équipements et des installations, seules des économies d'énergie limitées peuvent être réalisées. Dans ce contexte, les investissements dans des systèmes de cogénération ont permis à des entreprises européennes de pâtes et papiers de produire près de la moitié de l'énergie électrique qu'elles consomment (Bajpai, 2016c). En Suède, Thollander *et al.* (2020b) illustrent quelques exemples de mesures d'efficacité énergétique mises en œuvre dans l'industrie des pâtes et papiers en rapport avec les systèmes de pompage. D'autres moyens d'économiser de l'énergie dans cet industrie sont le recyclage du papier et l'utilisation de papier recyclé, l'utilisation de moteurs et de systèmes d'éclairage plus efficaces, l'utilisation de technologies innovantes de séchage du papier, l'installation de variateurs de fréquence, la mise à jour des compteurs d'acquisition de données énergétiques, ainsi que les mesures de conservation de l'énergie axées sur la modernisation des anciennes usines et sur l'utilisation de processus et machines moins énergivores (voir Bajpai, 2016c ; Fleiter *et al.*, 2012 ; CEM, 2018 ; Bajpai, 2016a). Du côté de l'industrie de la fabrication des produits du bois, les opérations des scieries nécessitent l'utilisation de moteurs électriques lourds et d'équipements au gaz naturel tels que des chaudières. Les moteurs électriques sont utilisés pour alimenter la plupart des équipements des installations et sont donc les plus grands utilisateurs finaux d'énergie dans une scierie, ce qui en fait des candidats parfaits pour évaluer leur potentiel d'économie d'énergie (Gopalakrishnan *et al.*, 2012). Pour leur part, Wengert et Meyer (1992) ont révélé dans leur étude plus de 75 moyens économiques de réduire la consommation d'énergie dans les scieries sans affecter la production. Certaines de ces recommandations se concentrent sur les moteurs électriques, les systèmes d'éclairage, les compresseurs, le sciage, les chaudières, les fours, les systèmes CVC et l'utilisation de la cogénération pour produire de l'électricité interne. De leur côté, Gopalakrishnan *et al.* (2012) ont développé un outil d'analyse permettant aux scieries de comparer leur consommation d'énergie par rapport à une référence énergétique indiquant la consommation d'énergie optimale requise dans les opérations. La différence entre la consommation d'énergie actuelle et la valeur de référence représente les économies d'énergie potentielles. De ce fait, l'identification des possibles opportunités d'amélioration est la première étape pour évaluer la maturité énergétique d'une organisation.

#### **4.6.3.3 Audits énergétiques**

En tant que supports fondamentaux de tout système de GE, les audits énergétiques périodiques assurent l'amélioration continue de l'efficacité énergétique d'un procédé, d'une organisation ou d'un groupe industriel (Thollander *et al.*, 2020a). Ces audits se concentrent sur l'analyse de la consommation d'énergie et identifient les domaines où des améliorations potentielles sont nécessaires et où les objectifs n'ont pas été atteints. L'évaluation de la performance énergétique et le suivi des activités d'efficacité énergétique nécessitent que l'utilisation finale de l'énergie soit mesurée. Le moyen le plus efficace pour y parvenir consiste à utiliser des systèmes de mesure et de surveillance de l'énergie (Johansson & Thollander, 2018). Les grandes entreprises ont parfois besoin que des audits soient réalisés par un auditeur énergétique certifié (Thollander *et al.*, 2020a).

Dans le secteur forestier, des audits internes et externes ont permis à plusieurs entreprises du sous-secteur des pâtes et papiers de différentes régions du monde d'identifier des opportunités d'amélioration, de mettre en place des contrôles opérationnels, de mieux utiliser les actifs existants, d'analyser leur consommation d'énergie, d'établir des projets d'investissement et de vérifier si leurs activités étaient toujours consistantes avec les exigences de leurs systèmes de GE (voir CEM, 2016a ; CEM, 2016B ; CEM, 2018). D'un autre côté, dans le sous-secteur de la fabrication de produits du bois, Wengert et Meyer (1992) soulignent que l'audit énergétique est aussi la première étape pour générer des économies d'énergie dans les scieries.

#### ***4.6.3.4 Entreprises de services énergétiques***

Les entreprises qui ont besoin d'avoir une vue d'ensemble plus objective et concrète de leur situation énergétique actuelle, ainsi que celles qui n'ont pas les compétences et le personnel nécessaires pour réaliser des audits énergétiques, peuvent recourir à la sous-traitance de services externes proposés par les entreprises de services énergétiques appelées ESCOs (Johansson & Thollander, 2018). Ces entreprises peuvent offrir divers services-conseils en énergie, tels que des audits énergétiques et l'identification de mesures d'efficacité énergétique (Thollander *et al.*, 2020a). Grâce à ces entreprises de services énergétiques, différentes industries du secteur forestier ont pu avoir une vue d'ensemble réaliste et complète de leur profil énergétique, former leur personnel interne et identifier les potentiels d'amélioration énergétique de leurs installations (voir CEM, 2016a ; CEM, 2016B ; CEM, 2018).

#### ***4.6.3.5 Politiques énergétiques, standards et financement***

Les politiques énergétiques déterminées par une entité gouvernementale sont souvent axées sur la résolution des problèmes de changement climatique et sur le développement énergétique. Les politiques énergétiques mises sur pied à l'interne sont quant à elles plus axées sur le déploiement de plans stratégiques permettant aux organisations d'améliorer leur efficacité énergétique et de réduire leurs émissions de GES à long terme (Abdelaziz *et al.*, 2011). Au Canada, il existe un programme de GE industrielle promu par RNCAN qui vise à accélérer la transition énergétique industrielle du pays. Ce programme gouvernemental offre des systèmes d'information de GE, fait la promotion de la GE industrielle par la mise en œuvre de la norme ISO 50001 et fournit un financement aux entreprises souhaitant mettre en œuvre cette norme et réaliser des évaluations énergétiques ou d'autres projets de GE (RNCAN, 2019a). De plus, le gouvernement supporte jusqu'à 50 % du coût, jusqu'à concurrence de 40 000\$ CA. À titre d'exemple, l'entreprise canadienne de pâtes et papiers évaluée dans le cas d'études (CEM, 2016a) a réussi à mettre en œuvre son système de GE basé sur la norme ISO 50001 avec le soutien et le financement de ce programme gouvernemental. En Suède, toutes les usines de pâtes et papiers ont été certifiées avec un système de GE normalisé en 2005, appelé le programme pour améliorer l'efficacité énergétique dans les industries à forte intensité énergétique (PFE). Parmi les usines suédoises de pâtes et papiers, la plupart ont par la suite mis en œuvre un système de GE basé sur la norme

ISO 50001 (Andersson & Thollander, 2019). Les objectifs énergétiques actuels du secteur forestier suédois résident dans l'élimination progressive des sources d'énergie fossiles et dans la croissance de sa bioéconomie (Swedish Forest Industries Federation, s.d.), tandis que le secteur forestier canadien, en divisant ses objectifs, se concentre sur la valorisation de la biomasse forestière, cherche à stimuler l'innovation de nouveaux produits et procédés, ainsi qu'à exploiter des nouvelles technologies numériques (MRNF, 2012). D'un autre côté, les politiques internes doivent avoir des objectifs clairs et transparents puisqu'elles expriment l'engagement d'une entreprise à accroître son efficacité énergétique et à réduire son impact environnemental (Gordic *et al.*, 2014). Dans ce contexte, il semble que la réussite de ces politiques dans l'industrie forestière dépendra des cadres supérieurs, puisque ceux-ci seront chargés d'assurer la disponibilité des ressources et d'aligner l'ensemble de l'organisation avec les objectifs énergétiques établis (voir par exemple Gordic *et al.*, 2014).

#### 4.6.4 Structure organisationnelle

La coordination des activités d'un programme de GE au sein d'une organisation nécessite un leader qui identifie les besoins énergétiques actuels et qui poursuit sans cesse les objectifs énergétiques établis dans la politique interne de l'entreprise. Le gestionnaire d'énergie est donc appelé à développer les stratégies, à gérer les projets énergétiques et à garder motivées les troupes. Gordic *et al.* (2014) décrivent dans leur étude une liste détaillée des rôles que joue régulièrement un gestionnaire d'énergie lors de la mise en œuvre d'un système de GE. Selon les auteurs, dans l'industrie du meuble, étant donné qu'il s'agit d'une industrie non énergivore composée régulièrement de petites et moyennes entreprises, un seul coordinateur énergétique suffit. À l'inverse, selon un entretien réalisé par Stenqvist *et al.* (2011) avec 8 entreprises suédoises appartenant au sous-secteur des pâtes et papiers, la complexité des procédés des usines, la technologie utilisée pour convertir et distribuer l'énergie, les différentes sources d'énergie utilisées dans les différentes opérations et le grand nombre d'employés qui peut être présent (généralement de 500 à 1000 employés), sont des facteurs qui mènent plutôt à un comité ou à une équipe d'énergie multifonctionnelle, composée de plusieurs représentants de différents départements de l'entreprise qui soutiennent activement le gestionnaire d'énergie ( Stenqvist *et al.* (2011) ; Gordic *et al.* (2014) ; CEM (2016B) ; CEM (2018)). La dernière position dans la structure organisationnelle est occupée par les employés qui connaissent mieux que quiconque le fonctionnement des équipements, leurs problèmes et la manière dont ceux-ci peuvent économiser de l'énergie. Leurs idées doivent toujours être soutenues et mises en valeur par le gestionnaire de l'énergie. Leur motivation et leur engagement envers les objectifs de l'entreprise en dépendront (Gordic *et al.*, 2014). De plus, un bon moyen de stimuler le changement dans toute la structure organisationnelle est par l'entremise de formations et de cours de sensibilisation axés sur la GE. Selon Abdelaziz *et al.* (2011), il existe généralement deux cours de GE industrielle. Le premier est axé sur les ingénieurs de l'entreprise et les personnes directement impliquées dans le programme énergétique et le second est donné de manière générale dans toute l'organisation à travers des programmes universitaires internes. Selon CEM

(2016a), pour l'entreprise canadienne de pâtes et papiers à l'étude, « Energy University est un élément important de la formation des employés » et « comporte un volet obligatoire de sensibilisation à l'énergie pour tous les employés et entrepreneurs ». D'autres entreprises de pâtes et papiers ont également adopté des programmes de formation et de communication dans leurs installations, comme l'illustrent Stenqvist *et al.* (2011) et CEM (2016b).

#### 4.6.5 GE au niveau opérationnel

Après la mise en œuvre des mesures énergétiques définies dans le plan d'actions, l'étape suivante consiste à évaluer la performance énergétique des améliorations à travers un système de mesure, de contrôle et d'analyse des données qui permet de traiter les informations afin de définir des actions correctives si nécessaire (Gordic *et al.*, 2014). Selon l'étude de Stenqvist *et al.* (2011), 5 des 8 usines de pâtes et papiers interrogées disposaient de compteurs à lecture automatique pour traiter les données en temps réel, à partir d'appareils de mesure chargés d'évaluer constamment la consommation d'électricité et de vapeur des équipements. Les données étaient transférées sur l'intranet des entreprises. Selon la taille de chaque usine, entre 20 et 80 appareils de mesure étaient nécessaires pour mesurer la consommation d'électricité et de vapeur. Une fois les données énergétiques collectées, celles-ci étaient combinées avec les données de production pour établir la consommation spécifique d'énergie (qui est un indicateur de performance permettant d'évaluer l'efficacité énergétique des systèmes). Selon Thollander *et al.* (2020a), la SEC est définie comme l'utilisation d'énergie primaire divisée par le nombre de produits pendant une période donnée. Dans l'étude de cas CEM (2016a), pour surveiller et suivre la performance énergétique des systèmes, l'équipe énergie a utilisé un tableau de bord qui leur a permis, avec l'utilisation de différents indicateurs de performance, de comparer la performance énergétique de l'usine de pâtes et papiers mois par mois, d'années en années. Par contre, ils ont surveillé la SEC uniquement au niveau de l'usine. À titre d'exemple, ils ont mesuré la consommation spécifique d'énergie de l'usine en MWh / tonne et celle des procédés de pâte et papier en kWh / tonne. Ils ont également évalué l'énergie nette consommée dans toute l'usine (MWh). Les indicateurs économiques qu'ils ont utilisés évaluaient les coûts de l'électricité et des combustibles fossiles utilisés. Dans le cas de l'usine de pâtes et papiers indonésienne (CEM, 2016b), à travers un diagramme de Pareto, l'équipe énergie a d'abord identifié les principaux consommateurs d'énergie de l'usine. Après les avoir identifiés, ils ont analysé les données historiques et ont déterminé que la corrélation entre le niveau de production et l'énergie consommée dans les processus était suffisamment élevée pour prévoir la consommation d'énergie future. Par conséquent, pour analyser la performance énergétique de leurs opérations, ils ont comparé la consommation d'énergie prévue avec la consommation d'énergie réelle. L'écart entre le réel et l'estimation correspondait aux économies d'énergie. Ainsi, au total, ils ont utilisé deux indicateurs de performance pour évaluer la performance énergétique de leurs opérations, le premier étant l'indice d'intensité énergétique (EII) pour analyser la différence entre la

consommation d'énergie réelle et la consommation prévue, et le second étant la SEC, c'est-à-dire la consommation d'énergie divisée par le niveau de production (GJ / Tonne). Par ailleurs, dans une étude réalisée en Suède par Andersson & Thollander (2019), après avoir mené une enquête auprès de 28 usines de pâtes et papiers, les auteurs ont constaté que 93% disposaient d'indicateurs de performance d'énergie pour mesurer l'efficacité énergétique totale de leurs sites, et 93% avaient également des indicateurs de performance pour surveiller les processus de production les plus énergivores. Cependant, la plupart des usines ne semblaient pas surveiller les indicateurs de performance au niveau des processus. Alors que des études comme celle d'Ammara *et al.* (2016) apportent une contribution importante au niveau du développement des indicateurs de performance dans les usines de pâtes et papiers, il semble qu'il y ait tout de même encore du chemin à faire puisque le développement de ceux-ci est régulièrement entravé par le manque de ressources, qui dans l'étude d'Andersson & Thollander (2019) est considéré comme la plus grande barrière énergétique. Finalement, du côté du sous-secteur de la fabrication de produits du bois, Johnsson *et al.* (2019) fournissent une liste d'indicateurs de performance pour surveiller l'efficacité énergétique d'une scierie entière et de ses deux processus les plus énergivores (le sciage et le séchage du bois). Les auteurs soulignent que l'indicateur de performance le plus utilisé dans une scierie est la quantité d'énergie utilisée par m<sup>3</sup> de produits sciés (kWh / m<sup>3</sup>).

#### 4.6.6 Discussion des résultats

Suite à l'étude de la situation énergétique de l'industrie forestière, il a été possible de constater que le degré de maturité énergétique de cette industrie variait considérablement d'un pays à l'autre. En Europe, la Suède dépend de moins en moins des sources d'énergie fossiles pour alimenter ses opérations, étant un pays quasiment exempt d'hydrocarbures (SFID, s.d.), alors que l'industrie forestière canadienne, malgré ses politiques énergétiques qui cherchent à tirer de plus en plus profit de la biomasse forestière, continue à recourir aux combustibles fossiles (MRNF, 2012). À cet égard, selon Bajpai (2016c), le Japon, la Corée, la France et la Suède semblent être les pays les plus avancés en termes d'économie d'énergie dans ce secteur industriel. Concernant le contrôle vers la transition énergétique du secteur forestier, dans les exemples analysés, il semble que la réduction des coûts énergétiques soit l'une des principales motivations pour gérer l'énergie des opérations (Lawrence *et al.*, 2019), tandis que le manque de capital et la complexité des processus sont les principales barrières dans le sous-secteur des pâtes et papiers (voir CEM, 2016a ; CEM, 2018). En ce qui concerne les incitatifs, l'utilisation de la biomasse forestière résiduelle et les systèmes de cogénération sont des vecteurs stratégiques qui mobilisent la transition énergétique de cette industrie dans le monde (Fleiter *et al.*, 2012). Ainsi, ces derniers sont des technologies présentant un grand potentiel énergétique pour l'industrie forestière. Néanmoins, l'acquisition de nouvelles technologies nécessite des investissements, ce qui représente une barrière économique pour cette industrie. D'un autre côté, parmi les différentes manières de générer des économies d'énergie, les systèmes de GE se sont distingués pour avoir été des instruments offrant des

avantages environnementaux, économiques et sociaux aux entreprises du secteur forestier qui les ont mis en œuvre (voir CEM, 2016a ; CEM, 2016b ; CEM, 2018). De même, les technologies écoénergétiques émergentes seront des éléments clés à privilégier afin d'avoir des systèmes énergétiques durables au sein de cette industrie (MRNF, 2012). Le recours à des audits dans l'industrie forestière s'est par ailleurs avéré une approche porteuse, car ceux-ci ont permis à plusieurs entreprises du secteur d'identifier leurs opportunités d'amélioration et de s'assurer que leurs systèmes de GE restaient conformes à leurs politiques et objectifs énergétiques établis. Aussi, des politiques énergétiques consistantes et bien définies ont permis à l'industrie forestière d'augmenter son efficacité énergétique et de réduire son empreinte écologique. Dans le cas de l'Amérique du Nord et de l'Asie, il semble nécessaire de mettre en œuvre des politiques énergétiques plus strictes et consistantes leur permettant d'atteindre leurs objectifs énergétiques à long terme (Bajpai, 2016c). Dans le cas du Canada, les programmes offerts par son gouvernement symbolisent déjà des soutiens importants qui encouragent et financent les initiatives énergétiques de l'industrie forestière de ce pays (RNCan, 2019a). Lorsqu'on jette un œil à la dimension de la structure organisationnelle, le rôle joué par le gestionnaire d'énergie a été déterminant pour toutes les entreprises forestières ayant mis en place un système de GE, car ce joueur important a favorisé positivement l'atteinte des objectifs énergétiques et le succès des politiques énergétiques internes. Les programmes de formation se sont également révélés essentiels pour sensibiliser le personnel des organisations. Au niveau opérationnel, le manque d'indicateurs de performance pour les processus, particulièrement dans les usines de pâtes et papiers, semble avoir freiné un traitement efficace des données énergétiques. De même, bien que la consommation de certains produits dans ce secteur ait considérablement diminué ces dernières années et du fait que ces circonstances l'ont rendu un secteur moins productif, moins énergivore et moins polluant, son rôle comme émetteur de GES reste encore majeur. Pour cette raison, le moyen le plus tangible d'améliorer la compétitivité, la rentabilité et l'empreinte écologique de cette industrie, sans affecter davantage sa productivité et sa croissance économique, repose sur le recours à des approches de GE offrant des avantages au niveau de la dimension sociale, économique et environnementale de chaque organisation. Finalement, bien que le cadre d'évaluation développé dans cette recherche ait servi à analyser le profil énergétique de l'industrie forestière, il apparaît suffisamment générique pour être exploité comme outil d'analyse diagnostic dans d'autres secteurs industriels.

## **4.7 Conclusion**

L'industrie forestière, en tant que grande consommatrice et productrice d'énergie, doit poursuivre ses efforts pour améliorer son efficacité énergétique et réduire encore plus ses émissions de GES. Bien que ses progrès en matière de conservation de l'énergie soient dignes de mention, la GE dans les systèmes de production est un élément clé qu'il faut que l'industrie sache mettre en valeur afin d'améliorer sa rentabilité et son efficacité énergétique sur le long terme. Grâce à l'utilisation d'un cadre d'analyse dimensionnel de la GE développé dans

cette recherche, il a été possible de mener à bien l'étude du profil énergétique de l'industrie forestière dans le monde. Les résultats de cette analyse ont permis de constater que cette industrie est en pleine transition énergétique, que sa bioéconomie se développe à grande vitesse, que sa transition vers des sources d'énergie plus neutres en carbone sera possible grâce aux technologies émergentes visant à exploiter tout le potentiel énergétique de la biomasse forestière. Toutefois, sans l'existence de bonnes pratiques de GE et d'un programme de GE bien défini, son potentiel d'efficacité énergétique risque de demeurer limité. Enfin, le fait qu'il y ait des pays dans cette industrie plus développés d'un point de vue économie d'énergie que d'autres, montre que de nouvelles mesures, politiques et stratégies énergétiques seront encore nécessaires pour garantir un avenir plus durable.

Dans une recherche future, il serait pertinent de réaliser des études statistiques plus approfondies qui suivent les mêmes bases d'analyse que ce travail, afin de créer une image plus précise du degré de maturité énergétique des différentes industries forestières dans le monde. De cette façon, il deviendrait possible de mieux préciser les raisons pour lesquelles les pratiques énergétiques de cette industrie sont hétérogènes et mettre en lumière la direction vers laquelle orienter la transition énergétique de ce secteur. Une telle étude permettrait également d'analyser de quelle façon l'industrie forestière évolue en termes d'exploitation numérique de l'information, puisqu'il semble y avoir un besoin de collecter, traiter et gérer plus efficacement les données énergétiques.

## 4.8 Références

- Abdelaziz, E. A., Saidur, R., & Mekhilef, S. (2011). A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 150-168.
- Adès, J. (2010). L'impact du cadre réglementaire fédéral de réduction d'émissions de gaz à effet de serre de 2007 sur les choix des sources d'énergie de l'industrie québécoise des pâtes et papiers, Université Laval, Québec.
- Ammara, R., Fradette, L., & Paris, J. (2016). Equipment performance analysis of a Canadian Kraft mill. Part I: Development of new key performance indicators (KPI). *Chemical Engineering Research and Design*, 115, 160-172.
- Andersson, E., & Thollander, P. (2019). Key performance indicators for energy management in the Swedish pulp and paper industry. *Energy Strategy Reviews*, 24, 229-235.
- Bajpai, P. (2016a). General Background. In *Pulp and Paper Industry* (pp. 1-8).
- Bajpai, P. (2016b). Pulp and Paper Production Processes and Energy Overview. In *Pulp and Paper Industry* (pp. 15-49).
- Bajpai, P. (2016c). Future Perspectives. In *Pulp and Paper Industry* (pp. 253-256).
- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 667-679.

- Clean Energy Ministerial (2016a). Catalyst paper case study. Accès le 16/09/2020, [https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2018-12/Catalyst\\_Canada.pdf](https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2018-12/Catalyst_Canada.pdf)
- Clean Energy Ministerial (2016b). PT Indah Kiat Pulp & Paper case study. Accès le 16/09/2020, [https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2018-12/PT%20IKPP-%20Tangerang\\_Indonesia.pdf](https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2018-12/PT%20IKPP-%20Tangerang_Indonesia.pdf)
- Clean Energy Ministerial (2018). CMPC case study. Accès le 16/09/2020, <http://www.cleanenergyministerial.org/initiative-clean-energy-ministerial/2018-energy-management-leadership-awards>
- EIA, 2011. International Energy Outlook 2011. U.S. Energy Information Administration (EIA). American Forest & Paper Association (AF&PA). 2012.
- Fleiter, T., Fehrenbach, D., Worrell, E., & Eichhammer, W. (2012). Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. *Energy*, 40(1), 84-99.
- Gopalakrishnan, B., Mardikar, Y., Gupta, D., Jalali, S. M., & Chaudhari, S. (2012). Establishing Baseline Electrical Energy Consumption in Wood Processing Sawmills for Lean Energy Initiatives: A Model Based on Energy Analysis and Diagnostics. *Energy Engineering*, 109(5), 40-80.
- Gordic, D., Babic, M., Jelic, D., Koncalovic, D., & Vukasinovic, V. (2014). Integrating energy and environmental management in wood furniture industry. *ScientificWorldJournal*, 2014, 596958.
- Gouvernement du Canada (2020). "Forest bioeconomy, bioenergy and bioproducts." Accès le 16/09/2020, <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/forests-forestry/forest-industry-trade/forest-bioeconomy-bioenergy-bioproducts/13315>
- Hasan, A. S. M. M., Hoq, M. T., & Thollander, P. (2018). Energy management practices in Bangladesh's iron and steel industries. *Energy Strategy Reviews*, 22, 230-236.
- Hossain, S. R., Ahmed, I., Azad, F. S., & Monjurul Hasan, A. S. M. (2020). Empirical investigation of energy management practices in cement industries of Bangladesh. *Energy*, 212.
- ISO. (2018). ISO 50001: 2018, Energy management systems.
- Johansson, M. T., & Thollander, P. (2018). A review of barriers to and driving forces for improved energy efficiency in Swedish industry– Recommendations for successful in-house energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 618-628.
- Johnsson, S., Andersson, E., Thollander, P., & Karlsson, M. (2019). Energy savings and greenhouse gas mitigation potential in the Swedish wood industry. *Energy*, 187.
- Lawrence, A., Nehler, T., Andersson, E., Karlsson, M., & Thollander, P. (2019). Drivers, barriers and success factors for energy management in the Swedish pulp and paper industry. *Journal of Cleaner Production*, 223, 67-82.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (2012). Stratégie 2012-2017 pour transformer l'industrie québécoise des produits forestiers. Accès le 16/09/2020, <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/entreprise/strategie-developpement-2012-2017.pdf>
- National Energy Board, 2019. Canada's Energy Transition. Récupéré le 16/09/2020 sur <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/canada-energy-future/canada-energy-transition/cndsngtrnstmstn-eng.pdf>

- Posch, A., Brudermann, T., Braschel, N., & Gabriel, M. (2015). Strategic energy management in energy-intensive enterprises: a quantitative analysis of relevant factors in the Austrian paper and pulp industry. *Journal of Cleaner Production*, 90, 291-299.
- Quesada-Pineda, H., Wiedenbeck, J., & Bond, B. (2015). Analysis of electricity consumption: a study in the wood products industry. *Energy Efficiency*, 9(5), 1193-1206.
- Ressources naturelles Canada (2019a). Energy Efficiency in Canada: Report to parliament under the energy efficiency act. Accès le 16/09/2020, <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/www/pdf/publications/emmc/parliament17-18.pdf>
- Ressources naturelles Canada (2019b). Cahier d'information sur la forêt 2018-2019. Accès le 16/09/2020, <https://scf.nrcan.gc.ca/publications?id=39506>
- Ressources naturelles Canada. (2020). L'état des forêts au Canada : Rapport annuel 2019. Accès le 16/09/2020, <https://scf.nrcan.gc.ca/publications?id=40085>
- Sandberg, D., Vasiri, M., Trischler, J., & Öhman, M. (2014). The role of the wood mechanical industry in the Swedish forest industry cluster. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29(4), 352-359.
- Stenqvist, C., Nilsson, L. J., Ericsson, K., & Modig, G. (2011). Energy management in Swedish pulp and paper industry - the daily grind that matters. Paper presented at the 10th eceee summer study - energy efficiency first: the foundation of a low-carbon society, France.
- Swedish Forest Industries Federation (s.d.). "Roadmap for fossil free competitiveness Forest Sector." Accès le 01/10/2020, <https://www.forestindustries.se/news/publications-and-reports/>
- Thollander, P., Karlsson, M., Rohdin, P., Wollin, J., & Rosenqvist, J. (2020a). Energy management. In *Introduction to Industrial Energy Efficiency* (pp. 239-257).
- Thollander, P., Karlsson, M., Rohdin, P., Wollin, J., & Rosenqvist, J. (2020b). Industrial energy systems. In *Introduction to Industrial Energy Efficiency* (pp. 33-47).
- Wengert, G. & Meyer D. (1992). Energy at the sawmill: Conservation and cost reduction. *Forestry Facts*, 61.

## **Chapitre 5 : Development of an energy monitoring and control interface for the forest products industry**

*L'article intitulé « Development of an energy monitoring and control interface for the wood products manufacturing industry » est inséré dans cette section du mémoire. Il a été soumis le 8 mai 2021 à la conférence « IEOM : Industrial Engineering and Operations Management » et sera présenté à la 4<sup>e</sup> édition européenne de cette conférence en mode virtuel du 2 au 5 août 2021 à Rome, Italie. La version publiée est identique à la version présentée dans ce mémoire.*

## 5.1 Résumé

La transition vers des systèmes avancés d'analyse de données reposant sur des approches de l'Industrie 4.0 conduit à des pratiques de gestion de l'énergie dans tous les secteurs industriels, créant des systèmes de production plus écoénergétiques et durables. Ainsi, en mettant en œuvre des systèmes de surveillance et de contrôle de l'énergie basés sur ces principes, il est possible d'identifier les opportunités potentielles d'amélioration énergétique à tous les niveaux organisationnels et d'analyser toute variation du comportement énergétique des processus de production à l'aide d'indicateurs de performance énergétique. Dans cette optique, cet article propose une interface de tableau de bord énergétique intégrant divers indicateurs de performance énergétique et méthodes de contrôle statistique, pour suivre, contrôler et évaluer la consommation d'électricité dans les processus de production des scieries. Grâce à une étude de cas et à des ensembles de données synthétiques, la consommation d'électricité des principaux processus de production d'une scierie canadienne a été évaluée à l'aide de cette interface interactive. Avec ce tableau de bord énergétique, il a été possible de développer un processus de prise de décision plus fluide et intuitif pour tous les niveaux organisationnels, d'évaluer les coûts énergétiques, d'établir des relations entre les niveaux de production et l'énergie consommée, de suivre les économies d'énergie, de faire des prévisions énergétiques et de fixer des objectifs énergétiques pour des améliorations futures. Il s'agit d'un outil pratique qui montre en détail le profil énergétique opérationnel d'une organisation.

## **5.2 Abstract**

The transition to advanced data analysis systems that rely on Industry 4.0 approaches is driving energy management practices across all industrial sectors, creating more energy efficient and sustainable production systems. Hence, by implementing energy monitoring and control systems based on these principles, it is possible to identify potential energy improvement opportunities at all organizational levels and to analyze any variation in the energy behavior of manufacturing processes using energy performance indicators. With this in mind, this article proposes an energy dashboard interface that integrates various energy performance indicators and statistical control methods, to monitor, control, and evaluate electricity consumption in sawmill manufacturing processes. Through a case study and synthetic datasets, the electricity consumption of the main manufacturing processes of a Canadian sawmill was evaluated using this interactive interface. With this energy dashboard, it was possible to develop a more fluid and intuitive decision-making process for all organizational levels, evaluate energy costs, establish relationships between production outputs and energy consumed, map energy savings, make energy predictions, and set energy targets for future improvements. This is a practical tool that shows in detail the operational energy profile of an organization.

### 5.3 Introduction

Over the last few years, the fight against global warming, mainly caused by the increase in greenhouse gas emissions, has grown in importance among governments and organizations around the world. In this global emergency, according to the Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2014), a more efficient use of energy is one of the key factors for mitigating global warming. In this context, the industrial sector plays a highly important role since it represents between 25% and 50% of the world's final energy consumption (Thollander et al., 2020). Fortunately, industry 4.0 foundations lie in digital transformation and the creation of more intelligent and interconnected production systems (Müller et al., 2019). Currently, these are an avenue that is not only allowing companies to be more efficient and agile in their manufacturing planning processes, but it is also allowing them to have better energy control systems, focused on drawing the real picture of their energy consumption profiles (Shrouf et al., 2014). Therefore, the energy management (EM) approaches and the concepts and technologies that are driving the fourth industrial revolution, such as the use of smarter energy meters, engineering analysis methods and control tools, enable manufacturing plants to improve their energy efficiency and reduce their CO<sub>2</sub> emissions (Campo et al., 2018; Shrouf et al., 2014).

From this perspective, in the forestry sector, industry 4.0 has been approached in a heterogeneous way since, in the last decades, sensor and remote sensing technologies have been discussed, investigated, and developed more deeply than any other 4.0 dimension in this industry (Müller et al., 2019). Consequently, advanced data analysis to facilitate decision-making appears to be an area with little progress in this sector, which makes it difficult to interpret energy consumption patterns and implement efficient EM practices. Regarding the energy profile of this sector, the energy trend around the world has changed since biomass and electricity have been predominant sources of energy in recent years. Hence, considering that the development of new technologies based on bioenergy has been growing progressively (e.g. boilers, kiln drying, cogeneration systems, etc.), the forest products sector must now focus its attention on reducing and managing its electricity consumption through the implementation of efficient energy strategies, as it represents about 25% of its total energy use (Quesada-Pineda et al., 2015). In turn, the first action that this sector should take to deploy energy initiatives that allow it to have a more accurate picture of its energy profile, is to understand historical electricity consumption (Quesada-Pineda et al., 2015). Nevertheless, it seems that companies in this sector are not aware of it since in a study carried out in Serbia by Rajić et al. (2019), on 104 companies belonging to the forest products industry, the authors observed that energy managers lack the knowledge needed to implement techniques and tools for collecting information, processing data, and monitoring energy consumption trends. Besides, the second action to deploy energy strategies in this industry is to define energy performance indicators (EnPIs) (Johnsson et al., 2019), especially at the process level (Andersson and Thollander, 2019; Bunse et al., 2011). In addition, according to Benedetti et al. (2017), even when these indicators are defined, an adequate energy control and

monitoring system focusing on analyzing its evolution over time is often ignored or not considered, despite the fact that these energy information systems can be designed to provide the supporting information required to monitor the energy consumption patterns of a company and to track the performance of EM projects (Van Gorp, 2005).

Thus, in order to address the aforementioned wood industry gaps, the aim of this article is to develop a user-friendly energy dashboard interface that allows sawmills from the forest products sector to manage and control the electricity data of their manufacturing processes at different organizational levels, to clearly identify their major energy efficiency issues, and to have a more efficient decision-making process. To achieve this goal, a literature review first made it possible to identify the main EnPIs used at different organizational levels in this sector, and then, to determine the statistical control tools necessary to analyze their behavior. Subsequently, using a synthetic dataset based on the real monthly electricity and production data of a Canadian sawmill, these indicators and statistical control methods were tested on a simulated energy control system created for this study. Finally, through the use of Microsoft Power BI software, it was possible to design and build the energy dashboard and to apply it to a case study in which its functionality and user interface were evaluated. Hence, this dashboard interface allows decision makers from this industry to integrate EM approaches with new ways of processing and analyzing information in an industry 4.0 environment. It also offers a wide variety of control tools to evaluate the energy performance in sawmill production processes in great detail. Its interactive design makes it easy to use and its implementation is simple if sawmills possess the information required to exploit it. The structure of the article is as follows. Section 2 outlines the literature review. The research methodology is then detailed in section 3. Section 4 presents the energy dashboard interface and its applicability through a case study. The article ends with a brief conclusion.

## **5.4 Literature Review**

Considering that the energy dashboard interface presented in this research was developed specifically for the forest products sector, the following sections describe the fundamental EM concepts and tools associated with this study.

### **5.4.1 EM practices in the forest products industry**

Overall, efficient energy use in the manufacturing industry allows companies to remain competitive and sustainable as it reduces their economic and environmental impacts related to energy consumption (Thollander et al., 2020). However, as stated by Johnsson et al. (2019) and Quesada-Pineda et al. (2015), only a few studies have evaluated energy efficiency measures in the forest products industry even if in some works, such as Gopalakrishnan et al. (2005), their development and implementation were proven crucial to reduce wood processing costs and improve the company's competitiveness. Johnsson et al. (2019) also emphasized that the

lack of information related to the specific energy use in sawmill operations makes it difficult for decision makers to determine which processes have the highest energy efficiency potential. On the other hand, regarding the use of energy control systems and EnPIs in this sector, in a survey conducted by Espinoza et al. (2011) on 188 American sawmills, 63 percent of the sawmills surveyed claimed to have been working on energy efficiency improvements, while only 8.6 percent declared to have energy baselines and EnPIs to effectively monitor and control energy performance in operations on a continual basis. More recently, guided by their interest in determining the current situation regarding the application of EM practices in the Serbian wood industry, Rajić et al. (2019) were able to highlight that only 15.38% of the 104 companies they interviewed were involved in finding opportunities for energy improvement. They found that in general, within this industry, the appropriate decision support mechanisms to control energy consumption were unknown. Contributing to the development of these control systems and based on lean principles, Gopalakrishnan et al. (2012) developed an analysis tool that allows sawmills to compare their electricity consumption against an energy benchmark indicating the optimal energy consumption required in operations. In this way, companies could better understand their energy consumption patterns and the intrinsic relationship between energy use and production parameters. For their part, Johnsson et al. (2019) recently investigated the currently applied and potentially viable key EnPIs in the Swedish forest products industry, highlighting that to estimate the energy efficiency potential of this industry and deploy strategic energy measures, their development is first necessary. Hence, energy efficiency must be measured, monitored, and frequently evaluated using EnPIs in order to have a successful EM system (Bunse et al., 2011).

#### 5.4.2 EnPIs and its application to the forest products industry

In recent years, the great concern to reduce carbon emissions and improve energy efficiency in manufacturing processes prompted industrial companies to become more engaged in understanding their energy issues and created the need to develop EnPIs capable of showing them an extensive picture of their current energy performance (Bunse et al., 2011) at a given time. Thus, these indicators are essential to successfully implement effective energy saving measures, track their progress, and define future energy performance targets (Johnsson et al., 2019) which represent what an organization hopes to attain when managing its energy consumption (Van Gorp, 2005). In the same way, these EnPIs can be classified according to the scale (work unit, work center, plant) and organizational decisional level at which they will be used (May et al., 2013). Likewise, the EnPIs calculated and analyzed in the work units are used to analyze in detail the energy behavior of the manufacturing processes and their subsystems, while the EnPIs employed at a strategic level are mostly used by top management in order to understand the overall financial performance of the entire EM system (Benedetti et al., 2017). So, as established by Bunse et al. (2011), the nature of these indicators can be physical (process level)

or economical (aggregated level). Figure 5 shows the way in which the nature of these indicators is integrated into the different decisional levels of an organization.



Figure 5. Distribution of EnPIs at different decisional levels of an organization

On the other hand, before conceiving these EnPIs, it is necessary to consider the boundaries in which they will operate, in other words, the areas of the organization requiring energy performance control. Morvay and Gvozdenac (2008) defined them as Energy Costs Centers (ECC) which are according to their definition « business segments (i.e. departments, areas, units of equipment or single equipment) where activities or production volume are quantifiable and where a significant amount of energy is used ». Therefore, EnPIs have to be defined according to the different ECC established in each organization and their deployment will depend on the access to information, organizational structure configuration, and particular needs of each company (Benedetti et al., 2017). In this context, given that throughout the company, there are different users who require different information, it is necessary to determine how this information has to be organized (Tokola et al., 2016), how much detail it should have, and how it will be used, since the EnPIs for top management are different than those used in production. Thus, once the ECC and users have been defined, the next step is to choose the type of indicator for each level of the organization. In this context, the EnPIs can be very diverse since they will be used for different purposes and by different users. In their simplest form, these can be measurements or ratios between two values while in their most complex form, these can be engineering models (Andersson and Thollander, 2019). At the strategic level, the energy cost (\$), the specific energy cost (\$ / kWh), and the total electricity consumption (kWh) are examples of simple values that are relatively easy to obtain with the electricity bill. Energy Intensity (EI) is an economic indicator also used at an aggregated level (Andersson and Thollander, 2019) and for the accountable ECCs, this is simply the ratio of energy consumption to a monetary value, such as the cost of energy in a given period of time (Bunse et al., 2011). At the operational level, for managers it is also useful to know the maximum energy consumption in a certain period of time since it gives them a graphical representation of the critical energy consumption patterns in the processes. Similarly, for production processes, the Specific Energy Consumption (SEC) is a physical indicator that is expressed as the ratio between the number of units produced and the corresponding amount of energy consumed over a defined period of time (Morvay and Gvozdenac, 2008). For the forest products industry, SEC is commonly expressed as the amount of energy

consumed per m<sup>3</sup> of sawn goods for an entire sawmill (kWh/m<sup>3</sup>). For companies in this sector, as mentioned by Johnsson et al. (2019), it is an easy indicator to manage since the amount of energy supplied to the sawmill and the production volumes are usually readily available. In their study, the authors also provide a comprehensive list of performance indicators for monitoring the energy efficiency of an entire sawmill and its two most energy-intensive processes (sawing and drying of wood). In other studies such as the one carried out by Gopalakrishnan et al. (2012), SEC can also be expressed as the ratio between the electrical energy consumption and the production volume in thousand board feet (kWh/Mbf). Thus, SEC can be a very practical indicator since it is easy to understand. However, it is also approximate (Gordic et al., 2014) as it does not reveal the intrinsic relationship between energy use and production level variations. Statistical models and control tools have to be used for this purpose.

### 5.4.3 Statistical control tools

As previously discussed, the indicator typology becomes more complex, going from the strategic level (where ratios are commonly used) to the operational level (where statistical control tools are required to determine with greater precision the true energy behavior in operations). However, before employing these analysis methods, system data must be measured and collected. It should be of high quality and ideally obtained on a continuous basis to ensure accurate and reliable analysis (Gordic et al., 2014). This information can be obtained from utility bills, measuring instruments, sub-meters, information systems (e.g. ERP), historical data, etc. (Gordic et al., 2014; Morvay and Gvozdenac, 2008; Van Gorp, 2005). Likewise, collected data can be acquired from the whole plant or each ECC. Subsequently, a mathematical model could use this information to establish an energy baseline against which the collected data will be compared (Van Gorp, 2005). Therefore, to provide continuous control and better management of all the collected data, companies need an energy control system to analyze and detect changes in their energy and economic performance over a given period. Currently, various data analysis tools can be integrated into the energy control system, such as graphical methods, statistical tools, regression analysis, residual analysis, CUSUM analysis (cumulative sum of differences), control charts, etc. (see Benedetti et al., 2017; Gordic et al., 2014; Morvay and Gvozdenac, 2008; Van Gorp, 2005). The following subsections will explain in more detail some of the most important statistical tools that were used in this study for different users and levels.

#### 5.4.3.1 Regression analysis

This tool evaluates how a dependent variable (energy) is related to the independent one (production) within the system. According to Morvay and Gvozdenac (2008), the relationship between these two variables for most industries is represented linearly, which means that energy plotted against production will generate a straight line that will be represented by the following equation:

$$E = a * P + b$$

where E represents the dependent variable (energy), P is the independent one (production), and a and b are constants that have to be calculated for each data set using the “least square method”. As mentioned by the authors, once this linear equation is calculated with a spreadsheet software, it can be used to calculate the energy baseline against which the current measured values will be compared. The baseline equation’s correlation coefficient indicates the strength of association that exists between production and energy with a value above 0.7 being an acceptable confidence level (Greenwald and Wallace, 2007). If the correlation coefficient is lower, data from another period should be chosen to find the baseline equation. Thus, in terms of analysis, it is more advisable to create a baseline through a mathematical model that emphasizes the true energy behavior in operations (obtained from the collected data) instead of using a baseline that is just a constant value such as the SEC (Benedetti et al., 2017). Furthermore, by substituting the production values in the regression equation, it will be possible to forecast how much energy would have been used in the period being evaluated according to the equation obtained. As mentioned by Morvay and Gvozdenac (2008), if the difference between the current measured values and the predicted ones is calculated, a residual value will be obtained (commonly known as energy savings). Then, by calculating the cumulative sum of these differences through the “CUSUM method”, it will be possible to obtain the total amount of energy savings over an observed period of time (Benedetti et al., 2017).

#### 5.4.3.2 Target line equation and residual analysis

As explained above, the baseline equation represents the relationship between energy and production over the evaluated data set. However, to draw the target equation for future improvements, data from periods with the best energy performance should be used to set the desired energy efficiency (Greenwald and Wallace, 2007). Therefore, a new regression equation is obtained from the chosen target period and used to calculate the difference between the measured values ( $E_i$ ) and the new predicted ones ( $E'_i$ ). With the residual values obtained, according to Morvay and Gvozdenac (2008), a standard error of estimate (control limits) can be calculated with the following equation:

$$S_{EE} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - E'_i)^2}{n - 2}}$$

where  $S_{EE}$  represents the upper and lower limits and n represents the number of periods being analyzed. Thus, through a scatter diagram, the residual values can be plotted against their respective production levels, and then the lower and upper limits can be drawn in order to identify periods with excessive variation that are not meeting the target. Given that, with the new target line, the correlation values will be very close to 1, it is recommended

by Morvaj and Gvozdenac (2008) to set the upper and lower limit to  $3 \times S_{EE}$ . An application of this tool will be shown in the case study section.

#### **5.4.3.3 CUSUM Map and Energy control matrix**

At the strategic and tactical levels, the energy performance and energy savings progress can be assessed on a monthly basis through a CUSUM map for each ECC integrated into the company's energy analysis. This tool will show the areas or ECC's that are contributing to the energy objectives and those that are negatively impacting the energy performance of the plant. According to Greenwald and Wallace (2007), this is a way to collectively analyze the positive and negative energy trends of the whole company. On the other hand, the Energy control matrix tool proposed by Benedetti et al. (2017) reports energy and economic performances at a strategic level on a monthly basis. Basically, the columns of this table show the monthly percent variation of the total current energy costs of the whole plant with respect to its baseline values of the previous year. It also exhibits two secondary indicators that help determine how the energy performance of each ECC and general variations in energy costs affect the total performance of the whole company in a given period. Thus, the first one shows the percent variation of the current energy consumption of all ECCs with respect to their baseline values (CDI) and the second one refers to the percent variation of current energy costs against those of the previous year (cDI). This tool was adapted and used in this study and all its variables, nomenclature, equations, and specific details can be consulted in the work carried out by Benedetti et al. (2017). Therefore, to achieve a more fluid decision-making process at all organizational levels, all of these energy indicators and energy control tools should be integrated into a dashboard (Tokola et al., 2016) that allows each user to effectively monitor variations in energy consumption, set energy goals or analyze energy savings. In the next section, the research methodology will be described.

## **5.5 Methodology**

In order to develop an energy dashboard interface that integrates various EnPIs and statistical control methods to allow sawmills to monitor and control their electrical energy consumption at various organizational levels, this work was divided into four main steps. In terms of literature, the bibliographic databases that served as support to identify the main concepts linked to this work were Engineering Village, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink and IEEE Xplore. Regarding the data collection phase, the study considered articles published from 2010 to 2020. However, because the research was conducted following the hermeneutical circle analysis criteria, relevant references obtained from these articles and other papers older than the established limit were also considered. In relation with the research boundaries, it is important to emphasize that the dashboard developed in this work is completely focused on analyzing and monitoring the electrical energy consumption in a sawmill. However, it could be adapted to analyse other energy sources as well. That being said, the first step focused on conducting a literature review of the forest products sector's energy context in order to identify its

EM practices and the way in which this sector controls and monitors its energy consumption. In the second phase, the scientific literature was explored again in order to identify the main types of EnPIs and statistical models used in the manufacturing industry and in the forest products sector to monitor energy performance. For each bibliographic database consulted, the research equation established to identify the EnPIs and statistical tools used in the manufacturing industry was the following: "energy performance indicators" and "energy management" and "manufacturing", while for the forest products sector it was defined as follows: ("energy performance indicators" or "energy management" or "energy savings") and forest products industry. Afterwards, the most relevant articles for the study were identified and inductively, after analyzing the selected articles, the EnPIs and statistical models employed in the present work were defined one by one. Once identified, these were classified according to their nature and the different organizational levels at which they will be deployed to control energy performance. Therefore, based on the work carried out by Benedetti et al. (2017), Gordic et al. (2014), Morvaj and Gvozdenac (2008), Van Gorp (2005), as well as Greenwald and Wallace (2007), it was possible to determine five widely used statistical control tools to monitor the energy performance in manufacturing processes at different organizational levels: regression analysis, CUSUM method for evaluating energy savings, residual analysis, CUSUM map, and energy control matrix. Furthermore, the indicator typology chosen in this study becomes more complex when progressing from the strategic level to the operational level (going from simple values or ratios to statistical control tools). The methodology proposed by Benedetti et al. (2017) helped identify the most important criteria when deploying an energy control system within an organization. In the third phase, the real monthly electricity and production data of a Canadian sawmill were analysed, organised, processed, and later transformed into a synthetic dataset with similar statistical properties, but different values, in order to protect the company's private information. After having generated the synthetic data and having organized and classified them according to the different end users and organizational levels that were going to use them, these were stored in Excel databases. Finally, in the fourth and last phase, with the use of Microsoft Power BI software, this information was integrated with the statistical methods and EnPIs found in the scientific literature, their corresponding measures and calculations were established and, as a result, it was possible to build the energy dashboard interface for the Canadian sawmill and validate its application through a case study that will be presented in detail in the following section.

## **5.6 Case study**

The methodology described above made it possible to gather all of the necessary elements to evaluate and test the energy dashboard interface functionality through a case study applied to a Canadian sawmill. As mentioned earlier, the data presented in this section are only illustrative and serve as a support for the development of the research, since they were synthetically created from the real information of the studied sawmill. Therefore, to protect the company's identity and respect its privacy, no further details of its organizational structure or its

business model will be given. Similarly, as already discussed, the study only focused on analyzing the electricity consumption in the main sawmill's production processes. Hence, according to Gopalakrishnan et al. (2012), a typical sawmill configuration includes debarking, sawing, edging, trimming, drying, planing and waste chipping processes. The manufacturing operations start with the debarking process where the bark is removed from the wooden logs that come from the forest. Then, in the sawing process, the debarked logs are sawn and transformed into lumber according to different dimensions and specifications. The edging process consists of eliminating the irregular edges and imperfections on the sawn pieces, while the trimming process consists of squaring the ends of the lumber to form uniform flat ends. For its part, the drying process is responsible for reducing the moisture content of the lumber. Subsequently, in the planing process, the required lumber thickness is obtained and its surface is smoothed. Finally, the chipping process takes advantage of all the wood waste from the production processes to produce wood chips, considered a valuable byproduct for this sector. As for the energy profile of the forest products industry in Canada, according to the Government of Canada (2021), from 2015 to 2019 this sector consumed on average 139,677,827 GJ, which makes it an important energy consumer. In relation to its total energy consumption, biomass represents 54.4% of the total energy used, while electricity represents 25.6% and natural gas 14.2% (Nyboer, J., and Bennett cited in Quesada-Pineda et al., 2015). Regarding the case study boundaries, according to the energy and production data obtained from the Canadian sawmill, only the debarking, sawing, drying, and planing processes were used in order to assess the functionality of the energy dashboard interface, and together with the whole plant, these were defined as the main ECCs of the case study. Thus, since operations in a sawmill require the use of large electric motors which are used to run the equipment from the aforementioned processes and since these are the largest energy consumers in a typical sawmill according to Gopalakrishnan et al. (2012), an energy dashboard interface is key for evaluating energy efficiency and energy consumption patterns in wood processing operations.

With respect to the information used to develop the energy dashboard interface, energy and production data were obtained for the month of February, 2020. The electricity consumption data were obtained through the sawmill's energy meters for all of the evaluated ECCs. However, for the production information, the company's global production volume was not available but they had data from the sawing and planing processes. Therefore, the energy data for the debarking and drying processes only served to calculate the percentage they represent in relation to the total electricity consumption of the sawmill, but not to determine the SEC or to perform statistical analyses that are more complex and that require production variables. On the other hand, to calculate the total monthly electricity consumption of the whole plant, the energy values of the four processes were added. Over a period of 29 days, the sum included only 25 days since the monthly measurements began on day 3 and there were 2 days in which the energy data for all the processes were incomplete. For the debarking and drying processes, the total monthly energy consumption was found over 25 days as well. However, all the energy analyses carried out in the sawing and planing processes were based on 18 days since there was no production

in these areas on 9 days and 2 days had incomplete energy data, as mentioned above. Therefore, on the energy dashboard interface for these two processes, the monthly analyses begin on February 3. In addition to the information obtained, in order to extend the analysis of the study and demonstrate the functionalities of the CUSUM map and energy control matrix, it was necessary to generate additional fictitious values that no longer correspond to the Canadian sawmill, but that maintain the same statistical properties. The method used to generate this additional data will be explained in the next section. However, in practice, the baseline values have to be calculated through statistical models that interrelate electricity consumption with production levels or other variables that affect the way in which electricity is consumed.

The EnPIs created for the case study were the same as those found in the scientific literature and their level of application, their corresponding ECC, the users linked to them, their control modalities, the information related to these (e.g. production volumes), and the sources of information from which they can be obtained are presented in Table 1. Likewise, of all the indicators shown, only the first three are of an economic nature and the rest are physical indicators to use in the sawmill operations. Similarly, as the global production volumes of the Canadian sawmill were not available and only the total electricity consumption of the whole plant was known, the possible energy indicators at the tactical level were not represented in Table 1. Ultimately, once the synthetic data were integrated with the EnPIs and statistical control tools, it was possible to build the energy dashboard interface for the case study. Regarding the construction of the energy dashboard interface, it was built with Microsoft Power BI software and its development was carried out in multiple phases. In the first place, the synthetic data that had already been organized in Excel databases were integrated with the EnPIs and the different selected statistical control methods. Then, their corresponding calculations were made according to the equations of each mathematical model. In parallel, while the measurements and mathematical relationships were being created, the most relevant visualizations and dynamic graphics such as pie charts, scatter charts, area charts, visualization cards, date slicers, dynamic tables, and KPI indicators were used to facilitate the analysis of the information and to highlight changes and anomalies in the energy performance of operations. Once the mathematical relationships were developed, templates were created to design the way in which the information was going to be presented and distributed at each organisational level. In total, an interface with 2 pages was created for the strategic level (energy control matrix, CUSUM map) while for the operational level, more specifically for the sawing and planing processes, another interface was created with 4 pages (general monthly results, regression analysis, CUSUM analysis, and creation of energy targets).

Table 1. Overview of EnPIs created to evaluate energy performance in a sawmill at different organizational levels together with their main characteristics.

Indicator	Decisional level	ECC	Indicator users	Control tools	Related data	Information source	
Total energy cost (\$)	Strategic	Whole plant	Top management / Energy manager	Energy dashboard interface / Energy control matrix	Total energy consumption	Electricity bill / Energy metering systems / sub-meters	
Specific cost of energy (\$/kWh)					Total energy cost		
Energy intensity (kWh/\$)							
Total energy consumption (kWh)	Tactical	Whole plant	Energy manager	Energy dashboard interface / Energy control matrix / Regression analysis / CUSUM analysis / Residual analysis / CUSUM map	Global production volume / External temperature	Electricity bill / Energy metering systems / sub-meters	
Debarking process energy consumption (kWh)	Operational	Debarking process	Energy manager / Production manager	Energy dashboard interface / Energy control matrix / Regression analysis / CUSUM analysis / Residual analysis / CUSUM map	Production volumes	Energy metering systems / sub meters	
Sawing process energy consumption (kWh)		Sawing process					
Drying process energy consumption (kWh)		Drying process					
Planing process energy consumption(kWh)		Planing process					
Maximum daily energy consumption (kWh)		Sawmill production processes					Energy dashboard interface
SEC (kWh/m <sup>3</sup> ) or (kWh/Mbf)							Energy dashboard interface / Regression analysis / CUSUM analysis / CUSUM map
Predicted energy consumption "Baseline" (kWh)							Energy dashboard interface / CUSUM analysis / CUSUM map
Energy savings (kWh)							
Predicted energy consumption "Target" (kWh)							
Energy target (kWh)							Energy dashboard interface / Residual analysis

### 5.6.1 Strategic level analysis

To determine how the energy control matrix could be used at the strategic level on a monthly basis, additional monthly values were generated for the 4 processes and the whole plant. Since the data for February 2020 and 2019 had already been calculated for the operational level, the generated data covered from March 2019 to January 2020. It was also necessary to create values for the total monthly consumptions from February 2018 to January 2019 to calculate baseline values. Finally, since confidentiality reasons prevented access to the sawmill's electricity bills, the EnPIs used to analyze the current economic performance of the whole plant for the February 2020 period were calculated from the synthetic energy data of the Canadian sawmill and the current tariff of its energy provider. This tariff specifies that the first 210,000 kWh consumed in the month must be billed at \$CA 0.0503/kWh and what is consumed after this limit must be billed at \$CA 0.0373/kWh. Power costs are also stipulated in the tariff but they were not considered in this study. For the case study, all of these costs had to be calculated, but in reality, these could easily be obtained from the electricity bill. Therefore, to exemplify the use of the energy dashboard interface, the upper part of Figure 6 shows the plant's total electricity consumption and the three strategic economic indicators shown in Table 1 (simple values and ratios) that give a global perspective of the total energy costs in the evaluated period. The energy control matrix is shown below and the third column (EC % var Whole plant indicator) shows the monthly percent variation of the plant's current total energy costs with respect to its baseline values of the previous year. Dynamic conditional formatting allows the user to understand at first glance where the percent variations are above zero (in red) indicating a decrease in performance and those below (in green) showing improvement. In this example, the general economic performance of the sawmill improved considerably between the periods of October 2019 and February 2020, but between April 2019 and September 2019, the company's energy performance decreased continuously due

to the sawing and drying processes. From columns 4 to 8, the CDI % var indicator shows the monthly percent variation of the current energy consumption for each sawmill process with respect to the baseline values of the previous year, and CDI % var TOTAL represents the sum of the percent variations of the 4 processes. The cDI % var indicator shows the percent variation of current energy costs of all the ECCs versus those of the previous year. In this case, this indicator remains constant with a value of 0.81% in all periods because energy tariffs did not change in the periods that were evaluated. Finally, as mentioned by Benedetti et al. (2017), on the same row, the sum of the percent variations of all the CDIs being analyzed and the cDI will not give the exact value of the EC % var Whole plant indicator since all these values interact with each other. Therefore, as suggested by the authors, it is necessary to create another indicator (RESIDUAL % var) that measures this interaction.

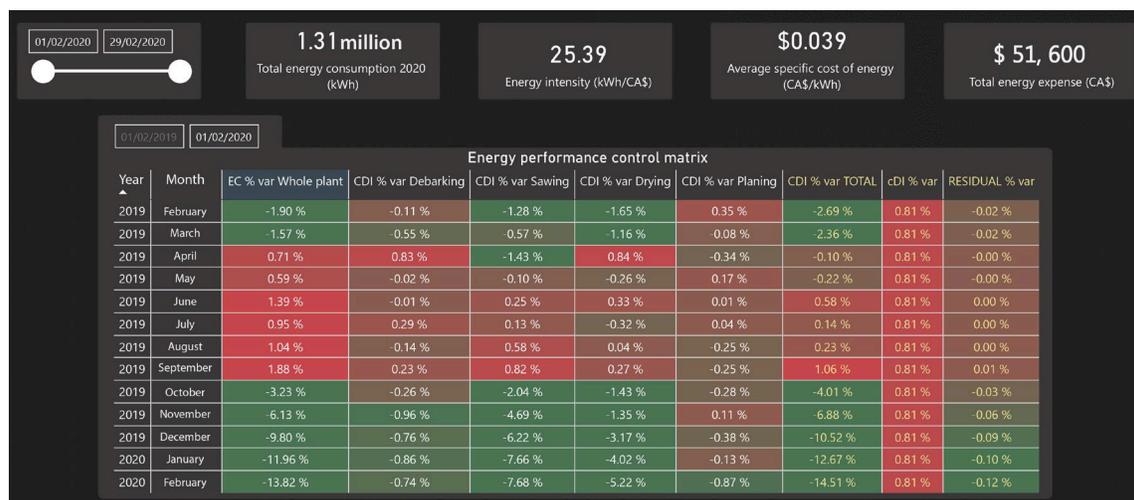


Figure 6. Economic EnPIs and Energy control matrix

For the CUSUM map shown in Figure 7, the same generated data for 2018, 2019, and 2020 created for the energy control matrix were used to find the differences between actual values and baseline values and determine the monthly energy savings. Figure 7 reveals that, for this case study, the cumulative energy savings of the sawmill from February 2019 to October 2019 were 121,315.31 kWh. Each visualization card is conditionally formatted to highlight negative values in green (energy savings) and positive values in red (electricity consumption higher than the forecasted baseline values). Figure 7 shows that the cumulative sum of the electricity consumption of the debarking process was 3774.52 kWh more than predicted, which indicates a poor energy performance in this process. However, the sawing and drying processes had significant improvements in October 2019, which is easily visible when analyzing their respective area graphs. For all area charts, a date slicer that dynamically changes the analysis dates can be found at the top, which makes it easier to interpret the results. Thus, the CUSUM map is a tool that automatically relates the energy savings of each ECC and allows to quickly analyze the general energy performance trends of the sawmill.



Figure 7. CUSUM map for the whole plant and related ECCs

### 5.6.2 Operational level analysis

As mentioned before, additional generic total values had to be created for the 4 processes and the whole plant for the month of February 2019 in order to make an annual comparison against the 2020 values that were synthetically obtained from the real data of the Canadian sawmill. Figure 8 shows the general energy portrait of the sawmill. In the upper part, the first two indicators show the total electricity consumption of the whole plant for the periods of February 2019 and 2020, while on the right two indicators measure the difference between these two values in kWh and percent variation, to analyze if energy performance improved or worsened. All the energy indicators in this interface are simple, easy to read, and dynamic. The total electricity consumption in kWh for each process is on the left side. A pie chart shows the main energy consumers in the sawmill together with their corresponding electricity consumption percentages. Here, the sawing process is the most energy intensive process with 54.21% of the total electricity use in the whole plant.

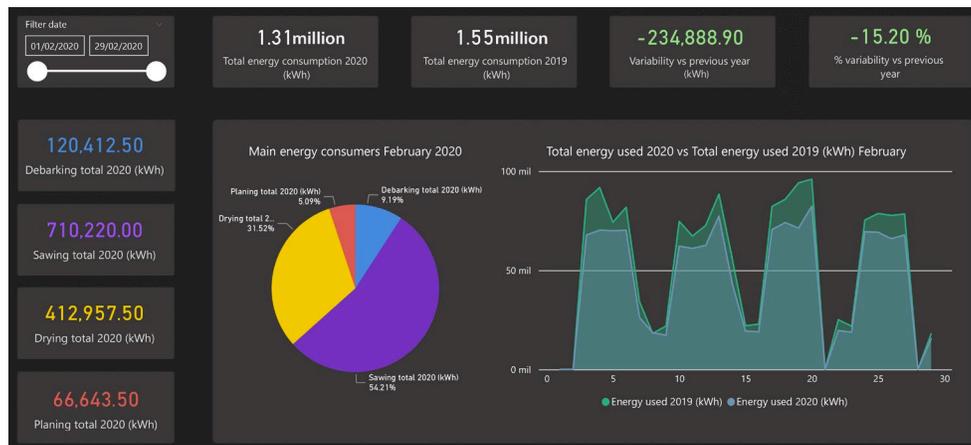


Figure 8. Sawmill energy portrait (operational level)

Hence, to analyze the energy behavior of this process in detail, based on a period of 18 days, the regression analysis (Figure 9) associated the production volumes (m<sup>3</sup> of sawn products) with the electricity consumption (kWh) that were recorded during February 2020, to determine the linearity that exists between both variables. Therefore, the scatter diagram shows the production volumes plotted against electricity consumption in a rather straight line, represented by the baseline equation shown at the top of Figure 9. Because the correlation coefficient between both variables is highly reliable (R<sup>2</sup>= 0.86), this equation was employed as a baseline to predict how much energy should have been used during the evaluated period. With Microsoft Power BI, it was possible to optimize the way in which this baseline equation is calculated, since it is much easier to determine the appropriate scenarios to predict energy consumption and set energy targets. In addition, the calculations are done automatically just by moving the date slicer or by selecting the desired points on the scatter plot. This interface also shows the SEC and the maximum electricity consumption, where it is possible to see that February 20 was the most energy-intensive day.

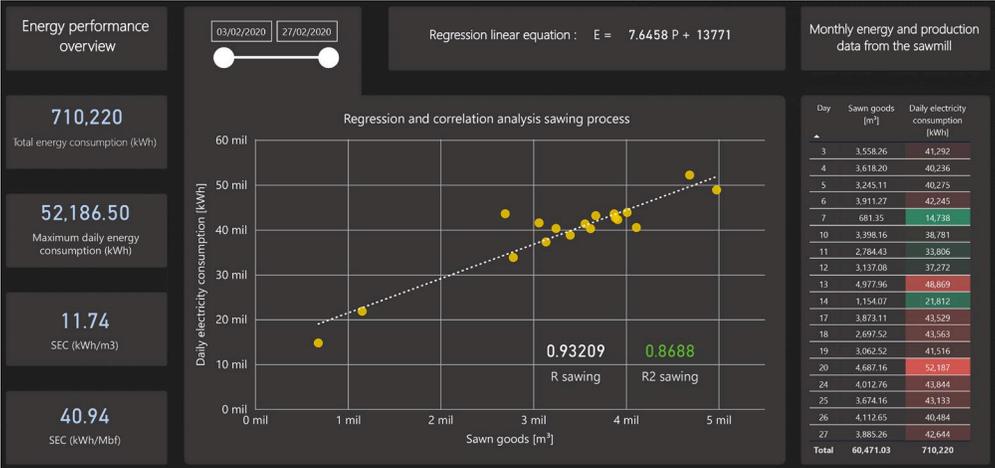


Figure 9. Regression analysis of the sawing process

Figure 10 shows the results of the CUSUM analysis obtained from the baseline equation which simply represents the cumulative sum of the differences between what was actually consumed and what was predicted with the baseline equation during the evaluated period. It shows that the energy behavior of the sawing process was very unstable. From February 18 to February 25, energy consumption was much higher than the predicted one which resulted in the loss of the energy savings that had been accumulated from February 3 to February 17. The CUSUM tool is very useful to verify energy performance improvements, detect energy anomalies, and validate energy savings.

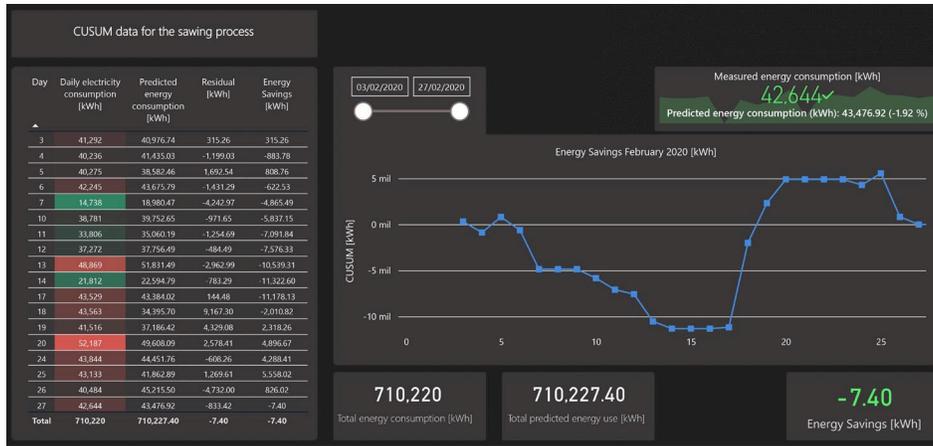


Figure 10. CUSUM analysis of the sawing process

Finally, in the residual analysis (Figure 11), a target equation that contains the three best energy performances of the month was defined. Then, the differences between the actual consumption and the new predicted ones were calculated (Energy target) and the  $S_{EE}$  value was estimated according to the equation established by Morvay and Gvozdenac (2008) to define the upper and lower control limits of the scatter diagram. The control limits were set at  $3 \times S_{EE}$  since the target line correlation was very close to 1. The table to the right in the figure highlights the difference between the total monthly energy use (daily electricity consumption) and the predicted one and gives the targeted monthly amount of energy that must be saved, which in the case of the sawmill example is 71,305.25 kWh. Likewise, the scatter diagram with the limits plotted reveals that the variations in energy use above the upper limit are quite high for 7 of the 18 days observed, and that the largest difference between measured values and predicted ones occurred on February 18, where the variation between the two was 13,243.44 kWh. Hence, this case study gives a specific example of what could be done when an energy dashboard interface is combined with appropriate statistical analysis tools and EnPIs.

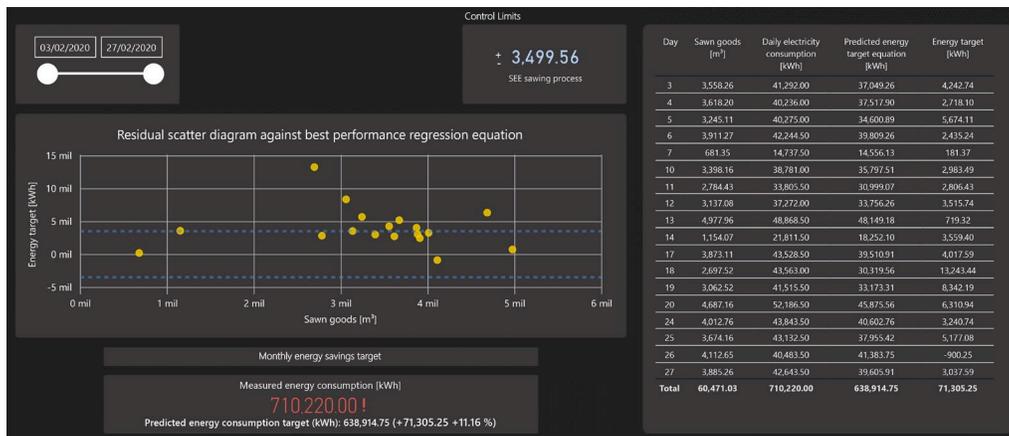


Figure 11. Residual analysis and target equation of the sawing process

## 5.7 Conclusion

Industry 4.0 approaches relying on intelligent and advanced data analytics environments are driving EM practices across all manufacturing sectors. A better understanding of the energy behavior in industrial operations is a key success factor to have energy efficient and sustainable production systems. Therefore, energy control systems are important to identify potential energy efficiency improvements and unexpected changes in energy performance that can be quantitatively analyzed at all organizational levels with EnPIs and statistical control tools. From this perspective, the work carried out in this article focused on developing an energy dashboard interface to analyze, with synthetic data sets, the electricity consumption patterns of the main manufacturing processes of a Canadian sawmill, through various integrated EnPIs and statistical control methods. The results obtained after applying this energy dashboard interface to the case study of the Canadian sawmill revealed that the operational controls and energy strategies to be deployed at all organizational levels will depend entirely on the type of information that can be accessed. Indeed, when numerical information systems feed the energy dashboard interface, it is possible to monitor and control electricity consumption patterns, identify excessive variations in energy use, detect anomalies, develop better decision-making, map processes energy savings, establish relationships between production outputs and consumed electricity, make predictions, and define energy targets for future improvements. However, when only the electricity bill is used, the analysis possibilities become limited and only rely on the analysis of simple and approximate EnPIs, which makes it difficult to understand the true nature of energy problems. Ultimately, the energy dashboard interface is an operational guide that supports decision-making with dynamic graphics and visualizations that make it easier to interact with information. However, only through deductive reasoning, knowledge of processes, and field experience will it be possible to draw effective conclusions for operational energy improvements. This energy interface can also be easily adapted and applied to other industrial sectors as long as they have the necessary information to exploit it. The application of this tool should continue to be validated in more sawmills and case studies to further improve its interface. In future research, other types of energy sources could be added to the interface to provide a complete picture of a sawmill's energy profile. It would also be pertinent to fully integrate the interface with the information systems to automate data processing and be easily shared through cloud systems at all organizational levels.

## 5.8 Références

- Andersson, E., & Thollander, P. (2019). Key performance indicators for energy management in the Swedish pulp and paper industry. *Energy Strategy Reviews*, 24, 229-235. doi:10.1016/j.esr.2019.03.004
- Benedetti, M., Cesarotti, V., & Introna, V. (2017). From energy targets setting to energy-aware operations control and back: An advanced methodology for energy efficient manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1518-1533. doi:10.1016/j.jclepro.2016.09.213

- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 667-679. doi:10.1016/j.jclepro.2010.11.011
- Campo, G. d., Calatrava, S., Cañada, G., Olloqui, J., Martinez, R., & Santamaria, A. (2018, 4-7 June 2018). IoT Solution for Energy Optimization in Industry 4.0: Issues of a Real-life Implementation. Paper presented at the 2018 Global Internet of Things Summit (GloTS).
- Espinoza, O., Buehlmann, U., & Bond, B. H. (2011). Energy and the US hardwood industry – part II: Responses to increasing prices. *BioResources*; Vol 6, No 4 (2011).
- Gopalakrishnan, B., Mardikar, Y., Gupta, D., Jalali, S. M., & Chaudhari, S. (2012). Establishing Baseline Electrical Energy Consumption in Wood Processing Sawmills for Lean Energy Initiatives: A Model Based on Energy Analysis and Diagnostics. *Energy Engineering*, 109(5), 40-80. doi:10.1080/01998595.2012.10531822
- Gopalakrishnan, B., Mate, A., Mardikar, Y., Gupta, D., & Plummer, R. (2005). Energy Efficiency Measures in the Wood Manufacturing Industry. *Proceedings ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*.
- Gordic, D., Babic, M., Jelic, D., Koncalovic, D., & Vukasinovic, V. (2014). Integrating energy and environmental management in wood furniture industry. *ScientificWorldJournal*, 2014, 596958. doi:10.1155/2014/596958
- GOUVERNEMENT DU CANADA (2021). Tableau 25-10-0025-01 Industries manufacturières, total annuel de la consommation énergétique de combustibles en gigajoules, 31-33 [Online]. Available: <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2510002501> [Accessed].
- Greenwald, R., Wallace K. (2007). Monitoring, Targeting and Reporting: a Pathway to Continuous Improvement in Energy Management. Paper presented at the Fifth Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Beijing, China.
- IPCC (International Panel for Climate Change), 2014. *Climate Change 2014. Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Fifth Assessment Report.
- Johnsson, S., Andersson, E., Thollander, P., & Karlsson, M. (2019). Energy savings and greenhouse gas mitigation potential in the Swedish wood industry. *Energy*, 187. doi:10.1016/j.energy.2019.115919
- May, G., Taisch, M., Prabhu, V. V., & Barletta, I. (2013, 2013//). Energy Related Key Performance Indicators – State of the Art, Gaps and Industrial Needs. Paper presented at the *Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains*, Berlin, Heidelberg.
- Morvay, Z. K., & Gvozdenac, D. D. (2008). *Applied Industrial Energy and Environmental Management*. Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons.
- Müller, F., Jaeger, D., & Hanewinkel, M. (2019). Digitization in wood supply – A review on how Industry 4.0 will change the forest value chain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 206-218. doi:10.1016/j.compag.2019.04.002
- Quesada-Pineda, H., Wiedenbeck, J., & Bond, B. (2015). Analysis of electricity consumption: a study in the wood products industry. *Energy Efficiency*, 9(5), 1193-1206. doi:10.1007/s12053-015-9417-4

- Rajić, M. N., Maksimović, R. M., Milosavljević, P., & Pavlović, D. (2019). Energy Management System Application for Sustainable Development in Wood Industry Enterprises. *Sustainability*, 12(1). doi:10.3390/su12010076
- Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014, 9-12 Dec. 2014). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. Paper presented at the 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.
- Thollander, P., Karlsson, M., Rohdin, P., Wollin, J., & Rosenqvist, J. (2020). Introduction. In *Introduction to Industrial Energy Efficiency* (pp. 1-13).
- Tokola, H., Gröger, C., Järvenpää, E., & Niemi, E. (2016). Designing Manufacturing Dashboards on the Basis of a Key Performance Indicator Survey. *Procedia CIRP*, 57, 619-624. doi:10.1016/j.procir.2016.11.107
- Van Gorp, J. C. (2005). Using Key Performance Indicators To Manage Energy Costs. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 25(2), 9-25. doi:10.1080/10485230509509683

## 5.9 Biographies

**Thomas Hernández** obtained his bachelor's degree in mechanical engineering at Instituto Politécnico Nacional de México. He is currently pursuing a MSc degree in industrial engineering at Université Laval (Canada), focusing on sustainable development and energy management practices applied to the forestry sector.

**Nadia Lehoux** is professor of industrial engineering at Université Laval in Quebec, Canada. Her expertise encompasses logistics and production planning models.

**Louis Gosselin** is professor of mechanical engineering at Université Laval (Canada). His research aims at improving the energy performance and sustainability of a wide variety of systems, processes, and plants.

# **Chapitre 6 : GE dans l'industrie des produits du bois : modèle d'évaluation basé sur la facture d'électricité et les pratiques d'efficacité énergétique du secteur**

Le présent chapitre vise à exposer la dernière partie du projet de maîtrise par l'entremise d'un scénario alternatif où seule la facture d'électricité est accessible pour évaluer la performance énergétique opérationnelle d'une scierie. De même, cette analyse vient compléter la troisième étape du projet de recherche qui consistait à évaluer les actions et stratégies énergétiques possibles pouvant être menées en fonction de la quantité d'informations auxquelles une scierie peut accéder. L'article 3, qui a été exposé dans le chapitre précédent, a présenté le scénario des scieries ayant un accès complet aux données énergétiques de leurs processus de production. À cet égard, ce dernier chapitre vise à présenter différentes stratégies énergétiques, outils et modèles d'évaluation permettant une analyse de la performance énergétique opérationnelle d'une scierie lorsque seule la facture d'électricité est disponible. Le chapitre sera divisé de la façon suivante. La première section comprendra la méthodologie qui a été suivie pour identifier les différents outils d'analyse utilisés dans cette étude. La deuxième section montrera l'application de chacun des outils proposés dans une étude de cas fictive. La troisième section se terminera par une brève conclusion.

## **6.1 Méthodologie**

Étant donné que ce chapitre est une extension du troisième article et que son objectif principal est de montrer les différentes alternatives et méthodes pouvant être utilisées lorsque l'accès à l'information est limité, cette section abordera et décrira les concepts clés de la GE associés à cette étude. De même, puisque les différents indicateurs de performance énergétique utilisés dans ce chapitre ont déjà été analysés et décrits dans le chapitre précédent, il a été jugé pertinent de ne pas les décrire dans cette section.

### **6.1.1 Revue de la littérature**

Une revue de la littérature a d'abord été réalisée afin d'identifier différentes stratégies, indicateurs de performance énergétique et méthodes permettant d'analyser la performance énergétique d'une organisation lorsque l'accès à l'information est restreint. Grâce à la documentation scientifique disponible sur la GE et son application dans le secteur forestier, il a été possible d'identifier 3 outils pouvant être utilisés lorsque seule la facture d'électricité est disponible pour évaluer la performance énergétique d'une organisation. Le premier outil comprend un indice d'efficacité énergétique permettant d'évaluer, d'analyser et de comparer la performance énergétique de plusieurs scieries faisant partie d'un même groupe industriel. Par la suite, sur la base de différentes études et modèles de maturité de GE trouvés dans la littérature, il a été possible de développer un

outil d'analyse comparative permettant d'évaluer le niveau de maturité énergétique d'une organisation, ses meilleures pratiques de GE adoptées ainsi que ses opportunités d'amélioration. Enfin, une dernière consultation de la littérature scientifique a permis de créer un carnet de bord générique dans lequel il est possible d'identifier différentes mesures d'efficacité énergétique pouvant être mises en œuvre au niveau opérationnel dans une scierie afin d'améliorer sa performance énergétique. La Figure 12 résume les outils conçus dans ce chapitre. D'autre part, les sections suivantes décrivent plus en détail les principaux concepts et outils de GE qui ont été utilisés dans cette étude.

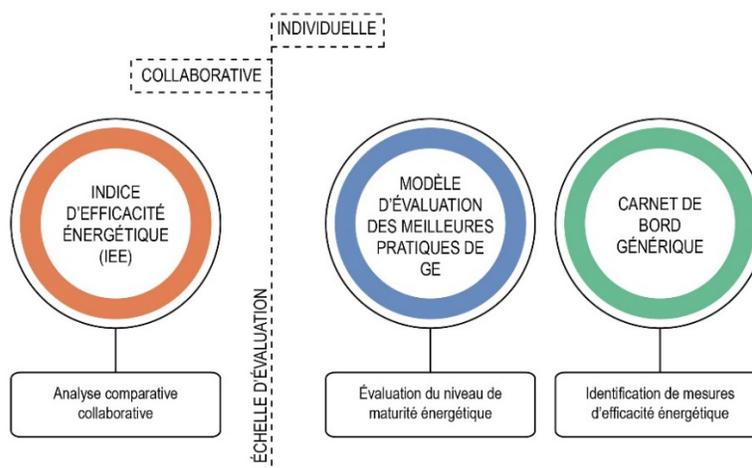


Figure 12. Outils conçus pour évaluer la performance énergétique lorsque seule la facture d'électricité est disponible

### 6.1.1.1 Analyse comparative

Tout d'abord, le principe d'analyse comparative repose sur le fait qu'aucune entreprise n'est complètement parfaite. Par conséquent, l'objectif principal de ce type d'analyse réside dans l'identification et la mise en œuvre des meilleures pratiques pour améliorer la performance organisationnelle en termes de coût, de productivité, de qualité, de performance énergétique, etc. (Kiran, 2017; Thollander et al., 2020d). En revanche, parmi les différentes analyses comparatives existantes, seule l'analyse comparative de type financière, opérationnelle et collaborative a été utilisée pour cette étude. La première permet de comparer les résultats financiers d'une entreprise pour évaluer sa performance globale et sa rentabilité. La seconde consiste à identifier et à évaluer l'ensemble des activités, processus et pratiques impactant la performance opérationnelle d'une entreprise, tels que ses procédures, ses indicateurs existants, ses politiques actuelles, etc., afin de trouver des opportunités d'amélioration. La dernière analyse compare collectivement les meilleures pratiques entre les entreprises d'un même groupe industriel (Kiran, 2017). D'autre part, en ce qui concerne les analyses comparatives visant à évaluer la performance énergétique de diverses organisations, la plupart se concentrent sur l'évaluation de la consommation d'énergie à tous les niveaux de décision d'une organisation, ce qui nécessite l'installation de

compteurs d'énergie intelligents, une ressource rare pour de nombreuses petites et moyennes entreprises. Cependant, même si l'accès aux données énergétiques est limité, il est toujours possible de réaliser une analyse comparative simple comme celle proposée par la *European Commission* (2009). Pour mener à bien cette analyse comparative, il est nécessaire de connaître la consommation spécifique d'énergie (SEC), laquelle peut être exprimée comme le ratio entre le nombre d'unités produites et la quantité d'énergie correspondante consommée sur une certaine période de temps (Morvay et Gvozdenac, 2008). À partir de cet indicateur, l'IEE peut être déterminé pour surveiller la performance énergétique d'un système, d'un processus ou d'une installation. Pour calculer l'IEE, il suffit de diviser la SEC de référence ( $SEC_{ref}$ ) par la SEC actuelle de l'ensemble de l'installation ou du processus actuellement surveillé. La  $SEC_{ref}$  représente une valeur de référence des années précédentes. L'IEE peut être calculé avec l'équation suivante:

$$IEE = \frac{SEC_{ref}}{SEC}$$

Ainsi, lors de l'évaluation de cet indicateur, si l'efficacité énergétique s'améliore, la valeur de l'IEE augmente, tandis que la valeur de la SEC diminue (*European Commission*, 2009). Ainsi, l'avantage de l'IEE est qu'au niveau de l'usine, cet indicateur n'a besoin que de deux données (la consommation totale d'énergie et les volumes de production de l'ensemble de l'usine), qui sont des informations normalement accessibles par n'importe quelle scierie.

#### ***6.1.1.2 Modèle d'évaluation basé sur les meilleures pratiques de GE***

Dans un scénario avec peu d'accès à l'information, où la facture d'électricité ne permet pas de déterminer les causes faisant varier le comportement énergétique opérationnel, il devient nécessaire pour les organisations d'avoir un dossier complet de leurs pratiques énergétiques adoptées et des actions possibles pouvant les aider à améliorer leur performance énergétique. En d'autres termes, il faut qu'elles reconnaissent quelles actions et directions peuvent augmenter progressivement leur niveau de maturité énergétique, jusqu'à atteindre leurs objectifs visés (Introna et al., 2014). Selon Neuhauser (2004), les modèles de maturité permettent aux organisations d'évaluer le degré de maturité de divers aspects de leurs processus par rapport à différents critères de référence. De même, selon Introna et al. (2014), la maturité dépend des capacités d'une entreprise à gérer plus efficacement son énergie et repose sur l'adoption de meilleures pratiques opérationnelles et l'utilisation de technologies écoénergétiques. À cet égard, une pratique de GE peut être considérée comme une technique, une méthode, une procédure, une routine ou un protocole qu'une entreprise emploie pour améliorer sa performance énergétique (Trianni et al., 2019). Dans ce contexte, il s'est avéré nécessaire de développer un modèle d'évaluation basé sur les meilleures pratiques de GE, permettant aux scieries de mieux comprendre leur état de maturité énergétique actuel et d'identifier leurs opportunités d'amélioration.

Afin de façonner le modèle d'évaluation, il a d'abord été nécessaire de définir et de caractériser les pratiques de GE présentes dans l'industrie, dans le but de donner une image complète et détaillée des actions contribuant à l'amélioration de la performance énergétique d'une organisation. Pour cette raison, le Tableau 2 compile divers travaux retrouvés dans la littérature qui ont permis d'identifier différentes pratiques de GE largement utilisées dans l'industrie. Par ailleurs, de façon à évaluer les pratiques de GE au sein d'une organisation, il est nécessaire de leur attribuer certaines caractéristiques supplémentaires tel qu'illustré dans le Tableau 3. Ces caractéristiques permettront de connaître plus de détails sur leur état actuel de développement, la fréquence à laquelle elles sont adoptées et les niveaux de l'organisation où elles sont déployées. De la même manière, il sera possible d'identifier quelles dimensions de la GE sont améliorées grâce à l'application de ces pratiques.

Tableau 2. Liste de références des pratiques de GE

#	Pratique de GE	Références
1	Analyse des politiques et réglementations énergétiques	(Abdelaziz et al., 2011) (May et al., 2017)
2	Définition des objectifs énergétiques	(Gordic et al., 2014) (CEM, 2016a)
3	Budget des projets énergétiques	(Kaman, 2002)
4	Création d'un cadre organisationnel de l'énergie (définition des rôles et responsabilités)	(Gordić et al., 2010) (Stenqvist et al., 2011) (Javied et al., 2019)
5	Sous-traitance d'entreprises de services énergétiques	(Thollander et al., 2020a)
6	Utilisation de programmes de financement externe	(RNCAN, 2019a) (Kindström and Ottosson, 2016)
7	Mise en place de procédures de GE au niveau opérationnel	(Benedetti et al., 2017)
8	Niveau d'accès à l'information (acquisition de données énergétiques)	(Van Gorp, 2005) (Morvay et Gvozdenac, 2008) (Gordic et al., 2014)
9	Existence de registres des projets énergétiques déjà réalisés	(Norland and Lind, 2001)
10	Audit énergétique	(Wengert et Meyer, 1992) (Gopalakrishnan et al., 2014) (Thollander et al., 2020a)
11	Intégration de la facette énergétique dans les activités de maintenance	(Norland and Lind, 2001) (Kaman, 2002)
12	Conception d'installations et de bâtiments écoénergétiques	(Norland and Lind, 2001)

Tableau 2. Liste de références des pratiques de GE (*suite*)

#	Pratique de GE	Références
13	Intégration de la facette énergétique dans la planification des opérations	(Shrouf and Miragliotta, 2015)
14	Autoproduction d'énergie renouvelable	(Fleiter et al., 2012) (Shrouf and Miragliotta, 2015) (Bajpai, 2016c)
15	Approvisionnement en énergie verte	(Wengert et Meyer, 1992) (MRNF, 2012)
16	Mise en place de pratiques d'amélioration continue pour améliorer l'efficacité énergétique	(Norland and Lind, 2001) (Kaman, 2002) (Lyon et al., 2014)
17	Arrêt des équipements lorsqu'ils ne sont pas utilisés	(Wengert et Meyer, 1992) (Lyon et al., 2014)
18	Analyse comparative	(Andersson et al., 2018) (Morvay et Gvozdenac, 2008)
19	Définition des EnPIs dans l'organisation	(Morvay et Gvozdenac, 2008) (Bunse et al., 2011) (Johnsson et al., 2019)
20	Attribution des EnPIs pour chaque membre de l'équipe de GE	(Gordic et al., 2014) (May et al., 2013) (Benedetti et al., 2017)
21	Estimation et analyse des coûts énergétiques	(Norland and Lind, 2001) (Morvay et Gvozdenac, 2008) (Stenqvist et al., 2011)
22	Mesure de la consommation d'énergie	(Bunse et al., 2011) (Dörr et al., 2013) (Benedetti et al., 2017)
23	Mesure de l'impact des GES	(Johnsson et al., 2019)
24	Suivi, contrôle et évaluation de la performance énergétique	(Morvay et Gvozdenac, 2008) (Benedetti et al., 2017) (Gordic et al., 2014)
25	Fréquence d'évaluation des résultats du programme d'efficacité énergétique	(Morvay et Gvozdenac, 2008) (Benedetti et al., 2017)
26	Mise en place d'un système de GE	(Gopalakrishnan et al., 2014) (Gordic et al., 2014) (Bajpai, 2016c)

Tableau 2. Liste de références des pratiques de GE (*suite*)

#	Pratique de GE	Références
27	Formations et cours de sensibilisation axés sur la GE	(Abdelaziz et al., 2011) (CEM, 2016a) (Stenqvist et al., 2011)
28	Participation du personnel à l'amélioration de l'efficacité énergétique	(Norland and Lind, 2001) (Gordic et al., 2014)
29	Récompenses pour les collaborateurs impliqués dans le programme d'énergie	(Norland and Lind, 2001) (Gordic et al., 2014)
30	Diffusion des objectifs et des résultats énergétiques au sein de l'organisation	(Shrouf and Miragliotta, 2015)
31	Participation à des événements externes concernant l'efficacité énergétique	(Norland and Lind, 2001)

Tableau 3. Caractéristiques associées aux pratiques de GE

Caractéristiques des pratiques de GE	Type de caractéristique	Description
Dimension	Stratégie / planification	Pratiques de GE favorisant le processus de planification stratégique des projets énergétiques.
	Mise en œuvre / opération	Pratiques énergétiques orientées vers une approche technique et dont l'objectif est d'améliorer l'efficacité énergétique des processus de production.
	Contrôle de la performance énergétique	Pratiques axées sur la surveillance, le contrôle, la comparaison et la gestion de la performance énergétique des opérations et des organisations.
	Structure organisationnelle	Pratiques cherchant à intégrer les différents niveaux de la structure organisationnelle aux projets de GE.
	Culture	Pratiques impliquant un changement de culture et de paradigmes au sein de l'organisation en faveur de l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Tableau 3. Caractéristiques associées aux pratiques de GE (*suite*)

Caractéristiques des pratiques de GE	Type de caractéristique	Description
Phases de développement	Phase initiale	La pratique n'est pas encore adoptée. Elle est en phase de planification et de développement.
	Phase de test	La pratique est en phase d'analyse et de suivi. L'organisation évalue les résultats obtenus pour identifier des opportunités d'amélioration.
	Phase opérationnelle	La pratique a été déployée dans l'organisation. Elle est pleinement opérationnelle.
	Phase de révision	La performance et les résultats de la pratique sont réévalués pour analyser les progrès et déterminer si des changements majeurs doivent être apportés.
	Phase de restructuration	La pratique actuelle est obsolète et ne répond plus aux objectifs et ambitions énergétiques de l'entreprise. Il est nécessaire de la mettre à jour.
Fréquence d'adoption	Instantanément	La pratique est réalisée lorsqu'il y a un événement imprévisible nécessitant d'une action immédiate pour résoudre un problème énergétique.
	Base continue / Quotidiennement / Hebdomadaire / Mensuel / Annuellement	La pratique peut être adoptée à différentes fréquences, en fonction des objectifs et des engagements convenus par les membres de l'équipe d'énergie.
Niveau organisationnel d'application	Processus	Pratique appliquée dans un processus opérationnel spécifique de l'entreprise.
	Département	Pratique déployée dans un certain département ou secteur de l'organisation.
	Usine	Pratique visant à améliorer la performance énergétique de l'ensemble de l'usine.

La première caractéristique présentée dans le Tableau 3 correspond aux dimensions de la GE. Celles-ci ont été définies selon le cadre de GE présenté par Schulze et al. (2016). Les cinq dimensions couvrent un domaine différent de l'organisation et représentent les éléments essentiels devant être développés simultanément dans un programme de GE pour atteindre les objectifs énergétiques définis au sein de chaque entreprise. D'autre part, la phase de développement permet d'analyser l'état actuel de la pratique de GE et donne une indication rapide de son niveau de progression au sein de l'organisation. Les deux dernières caractéristiques permettent de vérifier la fréquence à laquelle ces pratiques sont adoptées et d'observer les différents niveaux de

l'organisation dans lesquels elles sont appliquées (Trianni et al., 2019). Dans la section suivante, une application de ces caractéristiques sera présentée en détail.

Un dernier aspect important qui a été pris en compte lors de l'élaboration du modèle d'évaluation basé sur l'adoption des meilleures pratiques de GE concerne les bases de référence ou les niveaux de maturité nécessaires pour comparer les progrès des pratiques de GE adoptées au sein d'une organisation. Par conséquent, afin de définir ces bases de référence, il a été nécessaire d'explorer et de consulter la littérature scientifique liée aux modèles de maturité énergétique et aux pratiques de GE. À l'issue de la consultation et après avoir sélectionné les articles pertinents pour l'étude, sur la base des méthodologies et des modèles de maturité utilisés par Jin et al. (2021), Trianni et al. (2019), ainsi que celui de Kent (2018), il a été possible de déterminer 4 niveaux de maturité représentant la base de référence sur laquelle ont été comparées les pratiques de GE adoptées dans une scierie fictive de l'étude de cas du présent chapitre. À titre d'exemple, le niveau de maturité 1 indique que la pratique de GE évaluée n'a pas encore été adoptée au sein de l'organisation. À l'opposé, le niveau 4 représente le plus haut degré de maturité pouvant être atteint, ce qui montre qu'une entreprise est continuellement impliquée dans la promotion de procédures, politiques et pratiques de GE plus efficaces. De ce fait, le Tableau 4 montre les niveaux de maturité qui ont été créés pour chacune des pratiques de GE décrites dans le Tableau 2.

#### ***6.1.1.3 Techniques et mesures pour améliorer l'efficacité énergétique au niveau opérationnel dans le secteur des produits du bois***

Pour optimiser l'efficacité énergétique, il est nécessaire d'identifier, de quantifier et de conserver tous les aspects influençant la performance énergétique d'une organisation au niveau opérationnel (*European Commission*, 2009). Cela permet aux entreprises d'avoir une vue d'ensemble des causes pouvant affecter leur performance énergétique au sein de leurs opérations. De même, une fois identifiés, selon les critères de chaque entreprise, il sera possible de hiérarchiser ces aspects en fonction du niveau d'impact qu'elles ont sur la performance énergétique. Dans ce contexte, la *European Commission* (2009) a dressé une liste exhaustive des meilleures mesures et techniques disponibles pouvant être adoptées au niveau opérationnel pour améliorer la performance énergétique des systèmes de production d'une organisation. Parmi les mesures d'économie d'énergie les plus prometteuses présentées figurent les systèmes de cogénération, l'utilisation de moteurs électriques plus efficaces, les systèmes à air comprimé, les systèmes de pompage, les systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement de l'air, l'éclairage et l'utilisation de diverses technologies d'économie d'énergie. D'autre part, dans une autre étude menée par Trianni et al. (2014), les auteurs ont également présenté un vaste cadre de mesures d'efficacité énergétique, montrant les coûts de mise en œuvre pour chaque mesure, le temps de retour moyen sur investissement et les avantages environnementaux associés à chaque mesure.

Tableau 4. Niveaux de maturité pour évaluer les progrès des pratiques de GE

#	Mesures d'efficacité énergétique	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
1	Analyse des politiques et réglementations énergétiques	Aucun intérêt existant	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Politique énergétique interne informelle et non documentée</li> <li>. Politique visant à se conformer aux exigences minimales des réglementations applicables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Politique énergétique interne bien établie et documentée</li> <li>. Analyse approfondie de la réglementation applicable</li> <li>. Politique énergétique traitée au niveau stratégique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Politique énergétique constamment mise à jour</li> <li>. Analyse approfondie de la réglementation applicable pour être pleinement conforme</li> <li>. Politique énergétique pleinement communiquée et bien connue en interne.</li> <li>. Politique énergétique largement reconnue par les parties prenantes</li> </ul>
2	Définition des objectifs énergétiques	Aucun objectif énergétique existant	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Objectifs énergétiques peu ambitieux en termes d'amélioration de la consommation d'énergie, d'économies d'énergie et de réduction des émissions de GES</li> <li>. Objectifs énergétiques informels et non documentés</li> <li>. Absence de plan spécifique pour les atteindre</li> <li>. Vision à court terme</li> <li>. Les exigences légales ou réglementaires sont la principale considération pour les définir</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Objectifs énergétiques ambitieux de consommation d'énergie, de gains énergétiques et d'émission de GES</li> <li>. Objectifs énergétiques, obligations et plans d'action bien définis et documentés</li> <li>. Existence d'un plan stratégique pour les atteindre</li> <li>. Vision à court et long terme</li> <li>. Objectifs communiqués en interne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Objectifs énergétiques strictes de consommation d'énergie, de gains énergétiques, d'émission de GES et de consommation des ressources</li> <li>. Objectifs déployés dans toutes les usines, unités d'affaires et divisions de l'entreprise</li> <li>. Objectifs définis sur la base d'analyses statistiques et comparatives</li> <li>. Objectifs définis et évalués stratégiquement à des intervalles planifiés</li> <li>. Vision à court et long terme</li> <li>. Forte implication de l'entreprise pour diffuser et communiquer les objectifs à l'ensemble de ses collaborateurs</li> </ul>
3	Budget des projets énergétiques	Aucun budget alloué aux projets de GE	Les investissements dans les projets d'énergie dépendent du budget général de l'entreprise	Budget spécifique alloué aux grands projets de GE	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Budget spécifique pour tous les investissements de GE</li> <li>. Budget stratégiquement analysé</li> </ul>
4	Création d'un cadre organisationnel de l'énergie (définition des rôles et responsabilités)	Rôles et responsabilités non définis	La GE est la responsabilité partielle de certains employés avec une autorité limitée	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Existence d'une équipe d'énergie</li> <li>. Les responsabilités et les rôles sont formellement attribués à l'équipe d'énergie par la haute direction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Existence d'un gestionnaire d'énergie avec les compétences nécessaires pour faire face aux problèmes énergétiques</li> <li>. Délégation claire des responsabilités au sein de l'équipe d'énergie</li> <li>. GE pleinement intégrée dans la structure organisationnelle</li> </ul>
5	Sous-traitance d'entreprises de services énergétiques	GE interne	Projets d'énergie partiellement externalisés	GE entièrement sous la responsabilité des sous-traitants	
6	Utilisation de programmes de financement externe	Aucun programme utilisé	Utilisés pour les investissements dans des projets d'énergie nécessitant un investissement élevé	Largement utilisés pour tous les projets de GE	
7	Mise en place de procédures de GE au niveau opérationnel	Aucun contrôle existant	Optimisation des procédures de GE entourant les équipements de production énergivores	Optimisation des procédures de GE pour tous les équipements de production	Optimisation des procédures de GE pour tous les équipements de l'usine
8	Niveau d'accès à l'information (acquisition de données énergétiques)	Aucune compilation de données énergétiques	Compilation des factures énergétiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Compilation des factures énergétiques</li> <li>. Données historiques, sous-compteurs</li> <li>. Base de données de la consommation d'énergie des équipements énergivores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Compilation des factures énergétiques</li> <li>. Données historiques, sous-compteurs, systèmes d'information, compteurs intelligents</li> <li>. Registre détaillé de tous les équipements consommant de l'énergie</li> <li>. Accès ouvert à l'information au sein de la compagnie</li> </ul>

Tableau 4. Niveaux de maturité pour évaluer les progrès des pratiques de GE (suite)

#	Mesures d'efficacité énergétique	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
9	Existence de registres des projets énergétiques déjà réalisés	Aucun registre existant	Documentation de tous les projets de GE	Base de données de tous les projets de GE	. Base de données de tous les projets de GE . Base de données de toutes les suggestions de projets de GE . Accès ouvert à l'information au sein de la compagnie
10	Audit énergétique	Aucun audit réalisé	Audits internes généraux sans preuves documentées	. Existence d'un programme d'audit interne . Les audits internes sont planifiés et documentés avec une procédure spécifique . Les auditeurs sont officiellement sélectionnés	. Audits effectués périodiquement et par des auditeurs compétents . Les non-conformités sont communiquées aux secteurs correspondants . Programmes d'audit programmés . Auditeurs internes et externes
11	Intégration de la facette énergétique dans les activités de maintenance	GE non considéré	Règles non spécifiques relativement à l'amélioration de la performance énergétique dans les activités de maintenance	La GE est formellement considérée dans les activités de maintenance pour améliorer la performance énergétique des processus de production	La GE est formellement considérée dans les activités de maintenance pour améliorer la performance énergétique des processus de production, des équipements et des installations
12	Conception d'installations et bâtiments écoénergétiques	Efficacité énergétique non considérée	Considération de l'efficacité énergétique dans la revue de certains secteurs des installations et des bâtiments	L'efficacité énergétique est un critère de design pour tous les nouveaux bâtiments	
13	Intégration de la facette énergétique dans la planification des opérations	La facette énergétique n'est pas considérée	Il n'y a pas de méthodes spécifiques prenant en compte l'impact énergétique des équipements les plus énergivores lors de la planification des opérations	L'impact énergétique des équipements les plus énergivores est considéré dans la planification des opérations	La facette énergétique est toujours prise en compte dans la planification des opérations
14	Autoproduction d'énergie renouvelable	Aucune production	. Exploitation des énergies renouvelables dans certains cas . Choix de projets d'énergie renouvelable avec le meilleur retour sur investissement . Intérêt pour le sujet	. Adoption intensive des énergies renouvelables . Production autonome d'énergie renouvelable . Pleine exploitation de toutes les possibilités . Engagement total	
15	Approvisionnement en énergie verte	Aucun approvisionnement	Énergies renouvelables utilisées occasionnellement	. Approvisionnement continu en énergie verte (p. ex. hydroélectricité, biogaz, biomasse, biocarburants, etc.) . Choix stratégique	
16	Mise en place de pratiques d'amélioration continue pour améliorer l'efficacité énergétique	Aucune activité considérée	. Périodiquement . Focus sur les zones à forte intensité énergétique	. Périodiquement (fréquence élevée, selon les opportunités) . Élargie à l'ensemble de la compagnie . Équipe dédiée	. État d'esprit d'amélioration continue . Suivi des meilleures pratiques de GE de l'industrie . Tous les employés peuvent suggérer des améliorations
17	Arrêt des équipements lorsqu'ils ne sont pas utilisés	Non considéré	Fait de manière sporadique selon les jugements des employés	. Pratique formalisée et communiquée . Pratique axée sur les équipements énergivores	. Pratique formalisée et communiquée . Largement adoptée dans tous les cas possibles
18	Analyse comparative	Il n'existe pas de pratiques d'analyse comparative	. Au niveau de l'usine . Annuellement . Basé sur les produits	. Au niveau de l'usine / externe . Considération des EnPIs et des meilleures pratiques énergétiques . Basé sur les produits . Mensuel et annuel	

Tableau 4. Niveaux de maturité pour évaluer les progrès des pratiques de GE (suite)

#	Mesures d'efficacité énergétique	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
19	Définition des EnPIs dans l'organisation	EnPIs non définis	Principalement des EnPIs économiques utilisés pour mesurer la performance énergétique globale de l'ensemble de l'usine	<ul style="list-style-type: none"> <li>. EnPIs économiques définis au niveau de la compagnie et de l'usine</li> <li>. EnPIs physiques pour analyser en détail le comportement énergétique des processus de fabrication et de leurs sous-systèmes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. EnPIs complexes basés sur des modèles statistiques</li> <li>. EnPIs économiques définis au niveau de la compagnie et de l'usine</li> <li>. EnPIs physiques pour analyser en détail le comportement énergétique des processus de fabrication, des sous-systèmes et des équipements</li> <li>. Les EnPIs sont revus et mis à jour périodiquement</li> </ul>
20	Attribution des EnPIs pour chaque membre de l'équipe de GE	EnPIs non définis	EnPIs inclus dans le tableau de bord du gestionnaire d'énergie	Tableaux de bord conçus pour surveiller la performance énergétique à tous les niveaux de l'organisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Institutionnalisation de EnPIs par unité d'affaires / division / fonction</li> <li>. Implication de tous les gestionnaires et du personnel</li> <li>. Evaluation stratégique</li> </ul>
21	Estimation et analyse des coûts énergétiques	Les coûts d'énergie sont considérés dans les dépenses indirectes	Les coûts d'énergie sont analysés par volume de production global, département, division	Les coûts d'énergie sont analysés par processus spécifique	
22	Mesure de la consommation d'énergie	Aucune mesure	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Consommation d'énergie de l'ensemble de l'usine</li> <li>. Suivi des factures énergétiques</li> <li>. Certaines ou toutes les sources d'énergie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Suivi des factures énergétiques</li> <li>. Toutes les sources d'énergie</li> <li>. Mesure de l'efficacité énergétique au niveau de l'usine et des processus de production</li> <li>. Systèmes de sous-comptage pour certains équipements énergivores et critiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Suivi des factures énergétiques</li> <li>. Toutes les sources d'énergie</li> <li>. Mesure de l'efficacité énergétique au niveau de l'usine et des processus de production</li> <li>. Compteurs d'énergie intelligents pour tous les équipements et processus de production critiques et énergivores</li> </ul>
23	Mesure de l'impact des GES	Aucune mesure	Mesure de l'impact environnemental de l'entreprise uniquement à des fins réglementaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Mesure détaillée de l'impact environnemental de l'entreprise en considérant plusieurs indicateurs</li> <li>. Définition de stratégies spécifiques d'action</li> </ul>	
24	Suivi, contrôle et évaluation de la performance énergétique	Aucun système de surveillance et de contrôle de l'énergie	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Focus sur les équipements énergivores</li> <li>. Le suivi, l'analyse et l'évaluation de la performance énergétique sont planifiés et documentés de manière informelle</li> <li>. Fréquence annuelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Focus sur tous les processus de production et les principaux consommateurs d'énergie</li> <li>. Les économies d'énergie et la variabilité de la performance énergétique sont périodiquement évaluées, documentés et communiqués en interne</li> <li>. Existence d'un système de contrôle de l'énergie</li> <li>. Fréquence annuelle et mensuelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Surveillance en temps réel</li> <li>. Les données énergétiques sont collectées automatiquement via le système d'information</li> <li>. Intégration du système de contrôle de l'énergie aux systèmes d'information pour obtenir des bilans énergétiques détaillés</li> <li>. Focus sur toutes les utilisations finales d'énergie</li> <li>. Analyse multi-niveaux (usine, département, produit, processus, source d'énergie, service final, etc.)</li> <li>. Les économies d'énergie et la variabilité de la performance énergétique sont fréquemment évaluées, documentés et communiqués en interne</li> </ul>

Tableau 4. Niveaux de maturité pour évaluer les progrès des pratiques de GE (suite)

#	Mesures d'efficacité énergétique	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
25	Fréquence d'évaluation des résultats du programme d'efficacité énergétique	Aucune évaluation	. Résultats d'efficacité énergétique communiqués au niveau stratégique . Fréquence annuelle et mensuelle	. Résultats d'efficacité énergétique communiqués à différents niveaux organisationnels : entreprise, unité d'affaires, division, fonction et processus . Fréquence annuelle, mensuelle ou quotidienne	
26	Mise en place d'un système de GE	Aucun système de GE adopté	Système de GE créé en interne pour améliorer la mise en œuvre des pratiques de GE	Système de GE établi sur la base des lignes directrices de la norme ISO 50001	. Le système de GE est certifié et répond aux exigences de la norme ISO 50001 . Le système de GE est entièrement intégré à la structure organisationnelle
27	Formations et cours de sensibilisation axés sur la GE	Aucun	Cours d'introduction et de sensibilisation à la GE destinés uniquement aux gestionnaires	. Cours d'introduction et de sensibilisation à la GE ouverts à tous les collaborateurs . Formation aux gestionnaires . Formation spécifique pour les collaborateurs ayant des rôles opérationnels	. Programme complet de sensibilisation à la GE pour tous les collaborateurs . Formation spécifique pour les gestionnaires, l'équipe d'énergie et les collaborateurs ayant des rôles opérationnels . Formation continue . Cours certifiés
28	Participation du personnel à l'amélioration de l'efficacité énergétique	Aucune communication interne sur le sujet	. Peu de propositions pour améliorer l'efficacité énergétique . Peu d'engagement de la part du personnel	. Personnel fortement impliqué dans les propositions d'amélioration . La participation active fait partie de la culture organisationnelle de l'entreprise	
29	Récompenses pour les collaborateurs impliqués dans le programme d'énergie	Aucune récompense	Existence de récompenses pour atteindre les objectifs énergétiques	. Existence de diverses récompenses pour favoriser l'engagement et la prise de conscience . Programme général de reconnaissance . Implication de tout le personnel	. Existence de diverses récompenses pour favoriser l'engagement et la prise de conscience . Programme de récompenses et de reconnaissance entièrement intégré à la structure organisationnelle . Implication de tout le personnel . Fait partie de la culture d'entreprise
30	Diffusion des objectifs et des résultats énergétiques au sein de l'organisation	Aucun marketing	Les rapports annuels et le site web de l'entreprise comprennent une section dédiée au développement durable et aux résultats énergétiques obtenus	. Diffusion des projets énergétiques mis en œuvre, communication des objectifs atteints et des plans futurs . Outils: rapports annuels de l'entreprise, site internet, réseaux sociaux, etc. . Campagnes publicitaires périodiques	
31	Participation à des événements externes concernant l'efficacité énergétique	Aucun intérêt existant	. Participation sporadique . Aucun engagement	. Participation continue aux événements de GE . Opportunité importante d'acquisition de connaissances et d'échange d'informations	

En ce qui concerne l'industrie des produits du bois, plusieurs études ont évalué les différentes manières d'économiser l'énergie dans une scierie. Selon les études menées par Wengert et Meyer (1992), Bond (2008), ainsi que celle de Lyon et al. (2014), les mesures présentant le plus grand potentiel d'amélioration énergétique pour ce secteur se retrouvent dans les systèmes de cogénération, les moteurs électriques, l'éclairage et les processus de production, principalement dans le processus de séchage. Ainsi, toutes les améliorations énergétiques liées à l'air comprimé ont le coût moyen de mise en œuvre le plus bas et un retour sur investissement de moins d'un an. Au contraire, les mesures d'économie d'énergie liées aux systèmes de cogénération, au processus de séchage, à l'utilisation de moteurs et de lampes plus efficaces sont les actions nécessitant des coûts de mise en œuvre plus élevés avec des retours sur investissement supérieurs à un an (Bond, 2008). Cependant, ces derniers génèrent les plus grands gains économiques et énergétiques pour ce secteur. À partir de cette dernière revue de la littérature qui s'est concentrée sur l'identification de différentes façons de générer des économies d'énergie au niveau opérationnel dans une scierie, il a été possible de créer un carnet de bord générique (Tableau 5) compilant une liste de différentes mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique pouvant être appliquées dans cette industrie. Ce carnet de bord générique sert de base à toute scierie souhaitant mettre en œuvre des actions d'amélioration énergétique au sein de ses installations et sert de guide pour évaluer toutes les causes susceptibles d'avoir un impact sur leur performance énergétique. Cet outil, en plus de deux autres présentés plus haut, a servi à l'analyse comparative fictive réalisée dans l'étude de cas qui sera abordé dans la prochaine section.

Tableau 5. Carnet de bord générique de mesures d'économie d'énergie dans une scierie

#	Mesures d'économie d'énergie dans une scierie	Références
<b>1</b>	<b>Chauffage, ventilation et conditionnement de l'air (CVCA)</b>	
	Isoler adéquatement les murs et la toiture	(Wengert et Meyer, 1992)
	Colmater les fuites d'air autour des fenêtres et des portes	(Wengert et Meyer, 1992)
	Entretien des filtres du système de climatisation	(Wengert et Meyer, 1992)
	Éteindre les systèmes de climatisation à la fin de la journée	(Wengert et Meyer, 1992)
	Éviter la surchauffe des zones de travail	(Wengert et Meyer, 1992)
<b>2</b>	<b>Éclairage</b>	
	Utiliser des lampes et des ballasts plus efficaces	(Gopalakrishnan et al., 2005) (Bond, 2008) (Olsson and Nilsson, 2013) (Lyon et al., 2014)
	Profiter de la lumière naturelle	(Wengert et Meyer, 1992)
	Peindre les murs d'une couleur claire pour un facteur de réflexion maximal	(Wengert et Meyer, 1992)
	Éteindre la lumière quand cela n'est pas nécessaire	(Wengert et Meyer, 1992) (Bond, 2008)

Tableau 5. Carnet de bord générique de mesures d'économie d'énergie dans une scierie (*suite*)

#	Mesures d'économie d'énergie dans une scierie	Références
<b>3</b>	<b>Moteurs électriques</b>	
	Remplacer les moteurs surdimensionnés par des modèles de taille optimale	(Wengert et Meyer, 1992) (Gopalakrishnan et al., 2012) (Lyon et al., 2014) (Trianni et al., 2014)
	Utiliser des moteurs électriques plus efficaces	(Wengert et Meyer, 1992) (Bond, 2008) (Gopalakrishnan et al., 2012) (Trianni et al., 2014)
	Utiliser des moteurs à vitesse variable	(Wengert et Meyer, 1992) (Gopalakrishnan et al., 2012) (Olsson and Nilsson, 2013) (Trianni et al., 2014) (Lyon et al., 2014)
	Arrêter les moteurs électriques lorsqu'ils restent inactifs pendant une longue période de temps	(Wengert et Meyer, 1992) (Olsson and Nilsson, 2013) (Lyon et al., 2014)
	Exécuter certaines opérations uniquement le week-end pour obtenir un tarif inférieur	(Wengert et Meyer, 1992)
	Remplacer les courroies trapézoïdales standards par des courroies dentées	(Gopalakrishnan et al., 2005) (Bond, 2008) (Gopalakrishnan et al., 2012) (Lyon et al., 2014)
<b>4</b>	<b>Compresseurs</b>	
	Utiliser de l'air à basse pression (réduire la pression de l'air comprimé au minimum requis)	(Wengert et Meyer, 1992) (Bond, 2008) (Lyon et al., 2014) (Trianni et al., 2014)
	Favoriser l'utilisation de petits compresseurs plutôt que de grands	(Wengert et Meyer, 1992)
	Maintenir les filtres d'admission d'air du compresseur propres	(Wengert et Meyer, 1992)
	Récupérer la chaleur des grands compresseurs pour la rediriger dans les endroits qui ont besoin de chaleur	(Wengert et Meyer, 1992)
	Arrêter le compresseur lorsque la ou les machines qu'il dessert sont arrêtées	(Wengert et Meyer, 1992)
	Réparer les fuites d'air	(Wengert et Meyer, 1992) (Bond, 2008) (Lyon et al., 2014)
	Éviter les purges automatiques de condensat, surtout en hiver (en général, un compresseur nécessite moins de purge en hiver car l'air est plus sec qu'en été)	(Wengert et Meyer, 1992)
	Remplacer les convoyeurs pneumatiques par des convoyeurs électriques	(Wengert et Meyer, 1992) (Bond, 2008)

Tableau 5. Carnet de bord générique de mesures d'économie d'énergie dans une scierie (*suite*)

# Mesures d'économie d'énergie dans une scierie	Références
<b>5 Sciage</b>	
Garder les dents et les lames affûtées	(Wengert et Meyer, 1992)
Dégeler les bûches gelées	(Wengert et Meyer, 1992)
Utiliser des lubrifiants appropriés	(Wengert et Meyer, 1992)
Mettre en place un programme de réduction des variations d'épaisseur du bois afin de réduire la consommation d'énergie pendant le séchage	(Bond, 2008)
Dans la mesure du possible, utiliser l'entraînement direct au lieu des engrenages et des courroies	(Wengert et Meyer, 1992)
<b>6 Chaudières</b>	
Protéger le bois de chauffage de la pluie ou de la neige	(Wengert et Meyer, 1992)
Ne pas surdimensionner une chaudière (les pertes de chaleur augmentent au fur et à mesure que la taille de la chaudière augmente)	(Wengert et Meyer, 1992)
Utiliser la chaudière la plus efficace possible	(Wengert et Meyer, 1992)
Réparer les fuites de vapeur	(Wengert et Meyer, 1992)
<b>7 Séchoirs</b>	
Réparer tous les trous, fissures et fuites dans la structure du séchoir et les portes du séchoir (en particulier au niveau des joints des murs et des panneaux de toit)	(Wengert et Meyer, 1992) (Bond, 2008)
Utiliser autant de séchage à l'air que possible pour réduire la quantité d'eau qui doit être évaporée dans le séchoir (trois jours de bon séchage à l'air peuvent réduire l'énergie d'évaporation de 20%)	(Wengert et Meyer, 1992) (Bond, 2008)
Construire des abris au-dessus des piles de bois de séchage pour éviter qu'elles soient mouillées par la pluie	(Wengert et Meyer, 1992)
Doublé l'isolation des murs, du sol et du toit réduira de moitié les pertes de chaleur par conduction	(Wengert et Meyer, 1992)
Réduire la vitesse du ventilateur lorsque le bois a une teneur en humidité inférieure à 20%	(Wengert et Meyer, 1992) (Bond, 2008)
Éviter de trop sécher le bois	(Wengert et Meyer, 1992)
Utiliser des ventilateurs à vitesse variable	(Bond, 2008)

Tableau 5. Carnet de bord générique de mesures d'économie d'énergie dans une scierie (*suite*)

#	Mesures d'économie d'énergie dans une scierie	Références
8	<b>Systèmes de cogénération</b>	(Wengert et Meyer, 1992) (Gopalakrishnan et al., 2005) (Bond, 2008)
	Produire une partie de l'électricité « à l'interne » au moment de la demande de pointe pour réduire la demande	(Wengert et Meyer, 1992)
9	<b>Energy audits</b>	(Wengert et Meyer, 1992) (Bond, 2008)
10	<b>Autre</b>	
	Assigner des compteurs électriques séparés pour l'usine et pour les bureaux	(Wengert et Meyer, 1992)

### 6.1.2 Simulation de l'étude

À l'étape précédente, un outil d'analyse comparative a été créé à partir de toutes les méthodes dégagées de la littérature. Afin de simuler son fonctionnement dans une étude de cas fictive, des données synthétiques d'électricité et de production pour l'ensemble de l'étude ont été créées à partir des données réelles de la même scierie canadienne évaluée au chapitre 5 du mémoire. Tout d'abord, le premier outil basé sur l'IEE a permis de comparer les performances énergétiques de 4 scieries fictives appartenant à un même groupe industriel. La première correspond à celle qui a été créée au chapitre 5 alors que les trois autres ont été créées avec d'autres données fictives. Par la suite, les deux autres outils ont été employés à titre d'exemple dans la première scierie afin d'évaluer de manière indépendante son niveau de maturité énergétique, ses pratiques de GE adoptées et ses opportunités d'amélioration en lien avec les mesures d'efficacité énergétique présentées dans le carnet de bord générique. Au final, la mise en commun des 3 outils dégagés de la littérature a donc permis de comparer, à travers un exemple fictif, les performances énergétiques, les initiatives et les bonnes pratiques de GE de plusieurs scieries d'un même groupe industriel, d'avoir un portrait complet de l'état actuel des pratiques de GE adoptées au sein de la première scierie et d'analyser ses domaines d'opportunités devant encore être développées afin de déterminer dans quelle direction elle doit mettre ses efforts pour améliorer sa performance énergétique. L'étude de cas présentera cette analyse fictive en détail dans la prochaine section.

## 6.2 Étude de cas

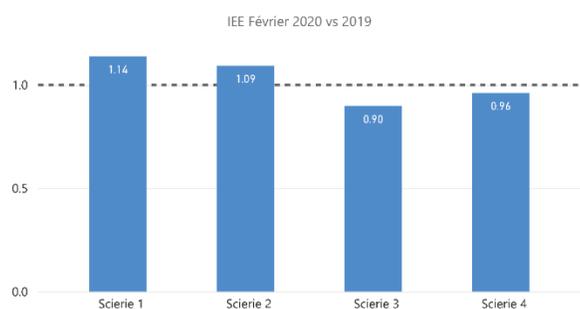
La méthodologie décrite ci-dessus a permis de rassembler les outils nécessaires pour comparer l'efficacité énergétique de diverses scieries et analyser de manière indépendante leurs pratiques de GE lorsqu'elles n'ont accès qu'à la facture d'électricité. Dans la première étape de l'étude de cas, les performances énergétiques des 4 scieries fictives créées pour cette étude ont été évaluées à l'aide de l'IEE. Étant donné que cet indicateur

utilise une valeur SEC actuelle et une de référence, pour la première scierie évaluée dans cette analyse comparative, les consommations d'électricité totales de février 2019 et 2020 qui avaient été calculées synthétiquement pour la scierie évaluée au chapitre 5 ont été réutilisées. Pour les 3 autres scieries, des valeurs synthétiques suivant la même distribution de ces données d'électricité ont été créées pour les mêmes périodes. Ainsi, des données de production globales pour les mois de février 2019 et 2020 ont été créées de manière générique pour les 4 scieries afin de calculer la SEC au niveau de l'usine, puisque ces informations n'étaient pas disponibles au chapitre 5. D'autre part, afin de ne pas complexifier l'analyse comparative et d'illustrer clairement la fonctionnalité des 3 outils proposés dans cette étude, les caractéristiques de chaque usine, les essences de bois transformées et les processus de production des 4 scieries sont considérés comme similaires. Par ailleurs, les EnPIs qui ont été utilisés pour cette étude de cas sont les mêmes que ceux présentés au chapitre 5 de ce mémoire. Du côté des indicateurs économiques qui ont servi à évaluer la performance énergétique des 4 scieries au niveau stratégique, il a été possible d'utiliser le coût total d'électricité (CA\$), le coût spécifique d'énergie (CA\$/kWh), l'intensité énergétique (kWh/CA\$) et l'indicateur EC % var utilisé dans la matrice d'énergie qui a été présentée dans le chapitre précédent et qui montre la variation mensuelle en pourcentage des coûts énergétiques totaux actuels de l'usine par rapport à ses valeurs de référence de l'année précédente. Concernant les indicateurs physiques, il a été possible d'utiliser la consommation totale d'électricité de l'ensemble de l'usine (kWh), la SEC (kWh/Mpmp) et l'IEE qui a permis d'évaluer les améliorations d'efficacité énergétique de chaque scierie. Au final, pour cette étude de cas, un outil d'analyse comparative basé sur l'IEE de chaque scierie a été développé, afin d'évaluer les améliorations de leurs performances énergétiques. De même, il a été possible de construire deux autres outils permettant aux scieries de suivre et d'évaluer leur niveau de maturité énergétique, leurs meilleures pratiques de GE adoptées et leurs opportunités d'amélioration liées aux mesures d'économie d'énergie présentées dans le carnet de bord.

### 6.2.1 Analyse comparative basée sur l'IEE

Avant de décrire la fonctionnalité de l'outil d'analyse comparative basé sur l'IEE, il faut souligner que pour calculer les coûts totaux d'électricité de chaque scierie, les mêmes tarifs d'électricité présentés dans l'étude de cas du chapitre précédent ont été utilisés. Cela étant dit, pour illustrer le fonctionnement de l'outil d'analyse comparative, la partie supérieure de la Figure 13 montre un graphique à barres où les performances énergétiques des 4 scieries fictives à l'étude sont comparées entre les mois de février 2019 et 2020 à l'aide de l'indicateur IEE. Tel que mentionné précédemment, la division entre la SEC ref 2019 et la SEC 2020 de chaque scierie permet d'obtenir la valeur IEE de chacune d'elle. À la lumière des résultats de cet exemple, il est possible de constater que, dans le cas de la scierie 1, l'efficacité énergétique en février 2020 s'est améliorée de 14% par rapport à l'efficacité énergétique enregistrée en 2019. Dans le cas de la scierie 2, celle-ci a également augmenté son efficacité énergétique de 9%. Cependant, dans les scieries 3 et 4, l'efficacité énergétique s'est détériorée

de 10% et 4% respectivement dans la même période. Par ailleurs, la seconde partie de la figure montre un tableau avec tous les EnPIs utilisés dans cette analyse. De la colonne 2 à la colonne 6, les indicateurs physiques pour chacune des scieries évaluées sont présentés. Dans le cas de l'indicateur IEE, pour faciliter la lecture des résultats, un format conditionnel a été appliqué où les valeurs supérieures à 1 (vert) indiquent une amélioration de l'efficacité énergétique tandis que les valeurs inférieures (rouge) indiquent une diminution. De même, de la colonne 7 à la colonne 11 se trouvent les indicateurs économiques utilisés pour les 4 scieries fictives. Ainsi, un format conditionnel a été appliqué à l'indicateur EC% var, mais dans ce cas, les pourcentages de variabilité supérieurs à 0 (en rouge) indiquent une diminution de la performance économique de l'entreprise tandis que ceux qui sont inférieurs (en vert) indiquent une amélioration. Par conséquent, l'objectif principal de l'IEE est de pouvoir suivre l'évolution de l'efficacité énergétique d'une usine au fil du temps. Dans le cas de la scierie 1, malgré le fait qu'il y ait eu des améliorations au niveau de sa performance énergétique, il n'est pas possible de déterminer avec ces résultats quelles actions, projets et activités ont occasionné cette amélioration. Pour cette raison, il est nécessaire d'évaluer individuellement ses pratiques de GE, son niveau de maturité énergétique et ses mesures d'économie d'énergie mises en œuvre au niveau opérationnel, afin de voir en détail son portrait énergétique. Une fois cette analyse individuelle effectuée, l'entreprise sera en mesure de partager ses expériences, ses meilleures pratiques de GE et ses initiatives avec les autres scieries.



Analyse comparative collaborative Février 2020 - 2019

Unités d'affaires	Consommation totale d'électricité 2020 [kWh]	Production globale 2020 [Mmpm]	SEC 2020 [kWh/Mmpm]	SECref 2019 [kWh/Mmpm]	IEE	Coût total d'électricité 2020 [C\$]	Coût total d'électricité 2019 [C\$]	EC% var	Coût spécifique d'énergie [C\$/kWh]	Intensité énergétique [kWh/C\$]
Scierie 1	1,310,233.50	15,295.93	85.66	97.45	1.14	51,601.71	59,878.53	-13.82 %	0.04	25.39
Scierie 2	1,321,133.70	14,391.90	91.80	100.28	1.09	52,008.29	57,264.98	-9.18 %	0.04	25.40
Scierie 3	1,334,327.70	13,050.90	102.24	91.71	0.90	52,500.42	52,490.98	0.02 %	0.04	25.42
Scierie 4	1,394,873.75	13,991.40	99.70	95.83	0.96	54,758.79	54,205.01	1.02 %	0.04	25.47

Figure 13. Analyse comparative collaborative

## 6.2.2 Évaluation des pratiques de GE et des mesures d'économie d'énergie

L'analyse comparative présentée précédemment et réalisée uniquement à partir des informations pouvant être obtenues à la lecture de la facture d'électricité a permis de constater que, dans le cas de la scierie 1, son efficacité énergétique s'est améliorée dans les périodes évaluées. Par conséquent, en prenant cette scierie comme référence et en se basant sur la liste des pratiques de GE dégagées de la littérature et les quatre niveaux

de maturité définis précédemment, il a été possible de dresser, pour cette scierie, un modèle d'évaluation permettant d'observer en détail ses pratiques de GE adoptées ainsi que le niveau de maturité énergétique de chacune (Tableau 6). Ce modèle présente une liste complète des pratiques de GE mises en œuvre dans la scierie et donne un bon aperçu de l'importance de la GE au sein de l'entreprise. Pour illustrer les caractéristiques de ce modèle, il faut d'abord mentionner que, sur les 31 pratiques de GE dégagées de la littérature, la scierie n'en a adopté que 23. Cela étant dit, dans le Tableau 6, la colonne 2 présente la liste complète des pratiques de GE. Dans les colonnes 3, 4, 5 et 6, il est possible d'observer les caractéristiques de chaque pratique de GE telles que les dimensions de la GE associées à chacune d'entre elles, les niveaux organisationnels dans lesquels celles-ci peuvent être déployées, la phase de développement permettant de déterminer l'état actuel de mise en œuvre de chaque pratique au sein de l'organisation et la fréquence à laquelle elles sont évaluées. Ensuite, la colonne 7 représente le niveau de maturité énergétique que la scierie 1 souhaitait atteindre pour chaque pratique de GE mise en œuvre. Dans certaines occasions, la scierie avait des objectifs très ambitieux, comme dans le cas de la mesure de la consommation d'énergie où elle avait pour but d'atteindre le niveau de maturité 4. Cependant, dans d'autres pratiques, elle était moins intéressée, comme c'est le cas de la participation à des événements liés à la GE, où elle s'est fixée l'objectif d'atteindre seulement le niveau de maturité 2. Par ailleurs, la colonne 8 montre le niveau de maturité actuel des pratiques de GE adoptées par la scierie 1. Grâce à ces deux bases de référence d'analyse comparative qui viennent d'être expliquées, il a été possible de mettre en évidence dans le graphique de la colonne 9 quelles sont les forces qui ont permis à cette scierie d'atteindre ses objectifs énergétiques et les domaines critiques qui l'ont empêché d'améliorer sa performance énergétique. En premier lieu, dans ce modèle d'évaluation, il est possible d'observer que les pratiques telles que le budget des projets énergétiques, l'adoption de programmes de financement externe, l'approvisionnement en énergie verte, la mise en œuvre de projets d'amélioration continue et la participation à des événements liées à la GE semblent être des activités bien maîtrisées. En second lieu, concernant les pratiques d'exploitation des énergies renouvelables et l'analyse comparative, il semble que la scierie 1 a dépassé les objectifs qu'elle s'était fixés, ce qui démontre un engagement et une implication de sa part pour ces deux activités. Enfin, toutes les autres activités sont des domaines critiques sur lesquels la scierie doit continuer à travailler pour améliorer son efficacité énergétique. En résumé, le graphique radar de la Figure 14 montre le niveau de maturité des dimensions de la GE de la scierie 1. Ces dernières correspondent à la moyenne arithmétique des pratiques de GE associées. À première vue, il est possible de remarquer que les domaines nécessitant le plus d'actions et d'améliorations sont ceux liés à la culture, à la structure organisationnelle et au contrôle de la performance énergétique, tandis que les plus développés sont la stratégie, la planification ainsi que la mise en œuvre et l'opération. Par conséquent, le modèle d'évaluation proposé permet de faire un état des lieux des pratiques de GE adoptées dans chaque scierie et souligne spécifiquement dans quels domaines des actions doivent être menées pour améliorer leur efficacité énergétique. De même, en complément de

l'analyse comparative, le carnet de bord peut également être utilisé pour sélectionner des mesures d'économie d'énergie permettant d'améliorer l'efficacité énergétique au niveau opérationnel. Pour chaque mesure mise en œuvre et avec un suivi approprié, il pourrait être possible de déterminer les gains économiques et énergétiques de chaque amélioration, d'enregistrer les coûts de mise en œuvre et de calculer le retour sur investissement pour chaque mesure adoptée. Étant donné que cette information n'était pas disponible dans cette étude de cas, il n'a pas été possible de représenter ces calculs.

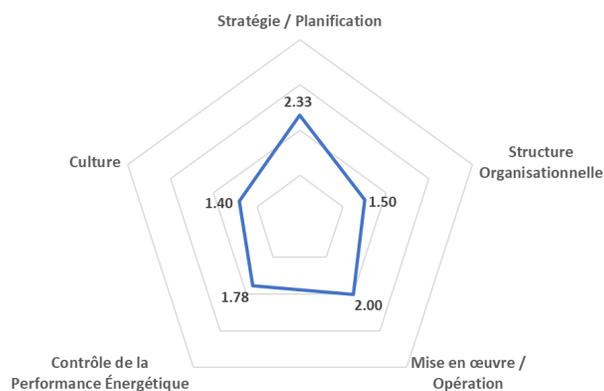
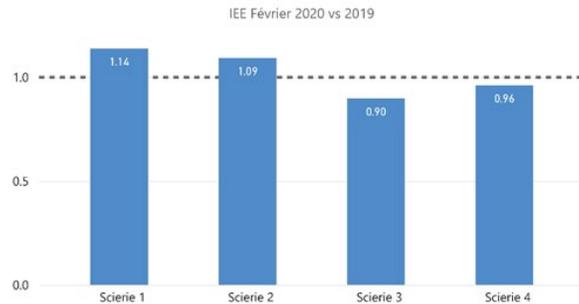


Figure 14. Niveau de maturité des dimensions de la GE (scierie 1)

Enfin, les informations présentées dans la Figure 15 sont illustratives et ont été générées afin de montrer comment les 3 outils proposés dans cette étude peuvent être intégrés pour faire une analyse comparative des 4 scieries fictives de cette étude de cas. Dans un premier temps, l'indicateur IEE montre la performance énergétique des 4 scieries entre les mois de février 2019 et 2020. De même, pour cet exemple illustratif, il a été considéré que toutes les scieries avaient déjà évalué individuellement le niveau de maturité de leurs pratiques de GE adoptées au sein de leurs organisations et que celles-ci avaient déjà un historique des améliorations d'efficacité énergétique qu'elles avaient mises en œuvre au niveau opérationnel au cours de la période d'évaluation. Par conséquent, dans la Figure 15, il est possible d'observer que du côté des pratiques de GE, chaque scierie présente ses points forts et ses points les plus critiques ainsi que ses opportunités d'amélioration. De même, il est possible d'observer les mesures d'économie d'énergie que chacune a mis en œuvre au niveau opérationnel pour améliorer son efficacité énergétique. Enfin, grâce à l'intégration des 3 outils, les scieries ont pu partager ensemble leurs meilleures pratiques de GE, leurs expériences, leurs initiatives prometteuses et leurs projets énergétiques internes qui leur ont permis d'améliorer leur efficacité énergétique. Cet exemple est très général et vise à montrer ce qui peut être fait lorsque seule la facture d'électricité est disponible. Avec plus d'informations et de détails spécifiques liés au mode de fonctionnement, à la structure organisationnelle, aux méthodes, aux processus et aux équipements de chaque scierie, il serait possible de réaliser une analyse plus précise et exhaustive des causes impactant leur performance énergétique. Par conséquent, l'objectif ultime de

cette étude de cas est de montrer qu'avec l'intégration de ces 3 outils, il est possible de créer un flux de connaissances et d'expériences partagées entre plusieurs scieries appartenant à un même groupe industriel.



Scierie 1		Scierie 2	
PRATIQUES DE GE		PRATIQUES DE GE	
Forces	Faiblesses	Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> <li>. Autoproduction d'énergie renouvelable</li> <li>. Utilisation de programmes de financement externe</li> <li>. Bonne stratégie d'analyse comparative</li> <li>. Allocation budgétaire pour les projets d'énergie</li> <li>. Approvisionnement en énergie verte</li> <li>. Mise en place de pratiques d'amélioration continue</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Manque d'EnPIs dans l'organisation</li> <li>. Absence d'un système de GE</li> <li>. Suivi, contrôle et évaluation de la performance énergétique</li> <li>. Mesure de la consommation d'énergie</li> <li>. Manque d'une équipe d'énergie</li> <li>. Manque d'audits énergétiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Objectifs énergétiques bien définis</li> <li>. Bonne stratégie d'analyse comparative</li> <li>. Mise en place de pratiques d'amélioration continue</li> <li>. Allocation budgétaire pour les projets d'énergie</li> <li>. Approvisionnement en énergie verte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Absence d'un système de GE</li> <li>. Manque d'EnPIs dans l'organisation</li> <li>. Suivi, contrôle et évaluation de la performance énergétique</li> <li>. Manque de formations axées sur la GE</li> <li>. Manque d'une équipe d'énergie</li> </ul>
<b>Opportunités</b>		<b>Opportunités</b>	
Les dimensions de la culture, de la structure organisationnelle et du contrôle de la performance énergétique sont des domaines qui ont encore un énorme potentiel d'amélioration / Il est nécessaire de mettre en place un système de GE qui sert de support pour diriger et structurer les projets d'énergie		Il est nécessaire d'améliorer le traitement des données énergétiques / Besoin de meilleures stratégies de coordination pour gérer les projets d'énergie / Développement de meilleurs outils de contrôle de l'énergie / Analyse de faisabilité axée sur l'adoption de mesures d'économie d'énergie	
<b>MESURES D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE ADOPTÉES</b>		<b>MESURES D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE ADOPTÉES</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>. Cogénération</li> <li>. Utilisation de lampes plus efficaces dans l'usine</li> <li>. Récupération de la chaleur des compresseurs</li> <li>. Réparation des fuites d'air comprimé / Programme d'entretien des compresseurs</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>. Réparation des fuites d'air comprimé</li> <li>. Entretien des filtres des systèmes de climatisation</li> <li>. Utilisation de moteurs électriques plus efficaces</li> <li>. Entretien du séchoir à bois</li> </ul>	
Scierie 3		Scierie 4	
PRATIQUES DE GE		PRATIQUES DE GE	
Forces	Faiblesses	Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> <li>. Bonne synergie entre les personnes impliquées dans les activités pour améliorer l'efficacité énergétique</li> <li>. Approvisionnement en énergie verte</li> <li>. Soutien de la haute direction pour le développement de futurs projets d'énergie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Plans d'action mal élaborés</li> <li>. Mauvaise communication des objectifs énergétiques</li> <li>. Manque d'EnPIs dans l'organisation</li> <li>. Absence d'un système de GE</li> <li>. Mauvais contrôle de l'efficacité énergétique</li> <li>. Manque de budget pour les projets énergétiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Objectifs énergétiques bien définis</li> <li>. Bonne coordination des activités à tous les niveaux organisationnels</li> <li>. Approvisionnement en énergie verte</li> <li>. Mise en place de pratiques d'amélioration continue</li> <li>. Personnel impliqué dans l'amélioration de l'efficacité énergétique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Manque d'EnPIs dans l'organisation</li> <li>. Absence d'un système de GE</li> <li>. Mesure, contrôle et évaluation de la performance</li> <li>. Manque de formations axées sur la GE</li> <li>. Manque de registres des projets d'énergie déjà réalisés</li> <li>. Manque d'audits internes</li> </ul>
<b>Opportunités</b>		<b>Opportunités</b>	
Nécessité d'élaborer un plan d'action bien défini précisant les rôles et les fonctions des personnes impliquées dans le programme d'énergie / Développement de meilleurs outils de contrôle de l'énergie / Sensibiliser l'organisation à l'importance de la GE / Établir un cadre de GE bien structuré / Allouer un budget aux projets d'énergie		Développer de meilleurs mécanismes de prise de décision / Mettre plus de compteurs d'énergie dans l'usine / Mettre en œuvre davantage de mesures d'économie d'énergie / Adopter un système de GE / Mettre en place des campagnes de sensibilisation de GE / Créer une équipe d'énergie	
<b>MESURES D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE ADOPTÉES</b>		<b>MESURES D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE ADOPTÉES</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>. Entretien des filtres des systèmes de climatisation</li> <li>. Les moteurs électriques ont été arrêtés lorsqu'ils n'ont pas été utilisés</li> <li>. Réduction de l'air comprimé au minimum requis</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>. Programme d'entretien des compresseurs</li> <li>. Utilisation de lampes plus efficaces dans l'usine</li> <li>. Contrôle du chauffage dans les zones de travail</li> <li>. Entretien des filtres des systèmes de climatisation</li> </ul>	

Figure 15. Analyse comparative fictive entre les 4 scieries du même groupe industriel

Tableau 6. Évaluation du niveau de maturité actuel des pratiques de GE adoptées par la scierie 1

#	Pratiques de GE	Dimension	Niveau	Stade de	Fréquence	Niveau de	Niveau de maturité	Différence
1	Analyse des politiques et réglementations énergétiques	SP	U	PR	Annuellement	3	2	
2	Définition des objectifs énergétiques	SP	U	PRES	Annuellement	3	2	
3	Budget des projets énergétiques	SP	U	PO	Annuellement	3	3	
4	Création d'un cadre organisationnel de l'énergie (définition des rôles et responsabilités)	SO	U	PT	Annuellement	4	2	
5	Sous-traitance d'entreprises de services énergétiques	SO	U / P	-	-	1	1	
6	Utilisation de programmes de financement externe	MO	U	PO	Annuellement	2	2	
7	Mise en place de procédures de GE au niveau opérationnel	MO	P	PO	Mensuel	4	2	
8	Niveau d'accès à l'information (acquisition de données énergétiques)	MO	U	PO	Mensuel	4	2	
9	Existence de registres des projets énergétiques déjà réalisés	MO	U / D / P	PO	Mensuel	4	2	
10	Audit énergétique	MO	U	PI	Annuellement	3	1	
11	Intégration de la facette énergétique dans les activités de maintenance	MO	P	PT	Hebdomadaire	3	2	
12	Conception d'installations et bâtiments écoénergétiques	MO	U	-	-	2	1	
13	Intégration de la facette énergétique dans la planification des opérations	MO	P	PT	Hebdomadaire	3	2	
14	Autoproduction d'énergie renouvelable	MO	U / P	PO	Annuellement	2	3	
15	Approvisionnement en énergie verte	MO	U	PO	Annuellement	3	3	
16	Mise en place de pratiques d'amélioration continue pour améliorer l'efficacité énergétique	MO	U / D / P	PO	Base continue	2	2	
17	Arrêt des équipements lorsqu'ils ne sont pas utilisés	MO	P	PO	Base continue	4	2	
18	Analyse comparative	CPE	U	PO	Mensuel	2	3	
19	Définition des EnPIs dans l'organisation	CPE	U	PO	Annuellement	4	2	
20	Attribution des EnPIs pour chaque membre de l'équipe de GE	CPE	U	-	-	4	1	
21	Estimation et analyse des coûts énergétiques	CPE	U	PO	Mensuel	3	2	
22	Mesure de la consommation d'énergie	CPE	U	PO	Mensuel	4	2	
23	Mesure de l'impact des GES	CPE	U	-	-	3	1	
24	Suivi, contrôle et évaluation de la performance énergétique	CPE	U	PO	Base continue	4	2	
25	Fréquence d'évaluation des résultats du programme d'efficacité énergétique	CPE	U / D / P	PO	Mensuel	3	2	
26	Mise en place d'un système de GE	CPE	U	-	-	4	1	
27	Formations et cours de sensibilisation axés sur la GE	C	U / D	-	-	2	1	
28	Participation du personnel à l'amélioration de l'efficacité énergétique	C	U	PO	Base continue	3	2	
29	Récompenses pour les collaborateurs impliqués dans le programme d'énergie	C	D	-	-	2	1	
30	Diffusion des objectifs et des résultats énergétiques au sein de l'organisation	C	U	-	-	2	1	
31	Participation à des événements externes concernant l'efficacité énergétique	C	U	PI	Annuellement	2	2	

Abréviations

[1] SP : Stratégie / Planification ; MO : Mise en oeuvre / Opération ; CPE : Contrôle de la Performance Énergétique ; SO : Structure Organisationnelle ; C : Culture

[2] U : Usine ; D : Département ; P : Processus

[3] PI : Phase initiale ; PT : Phase de test ; PO : Phase opérationnelle ; PR : Phase de révision ; PRES : Phase de restructuration

## 6.3 Conclusion

Le travail mené dans ce chapitre a porté sur la présentation de différentes stratégies et modèles d'analyse qui ont permis d'évaluer la performance énergétique de diverses scieries dans un scénario où seule la facture d'électricité est disponible. De même, cette étude a permis de développer un outil d'analyse leur permettant de comparer et de suivre leurs progrès d'efficacité énergétique en groupe et individuellement. L'analyse comparative s'est avérée essentielle, car elle a permis aux scieries de partager leurs meilleures pratiques de GE, leur expérience quant aux différents projets qu'elles ont menés, leurs initiatives énergétiques et les mesures d'économie d'énergie qui leur ont donné les meilleurs résultats. Ainsi, l'échange d'expériences leur a permis de comprendre ce que les autres faisaient correctement et d'identifier des opportunités intéressantes pour améliorer leur efficacité énergétique. D'autre part, le modèle d'évaluation offrant la possibilité d'analyser le niveau de maturité des pratiques de GE adoptées par chaque scierie a permis d'avoir une approche assez précise du développement de leurs activités internes liées à la GE. Plus qu'un simple outil d'analyse comparative interne, c'est un outil qui a fourni des recommandations spécifiques pour améliorer l'efficacité énergétique des scieries et qui leur a permis d'identifier des bonnes pratiques de GE, de visualiser leur portrait énergétique actuel, de mesurer à quel point elles sont proches d'atteindre leurs objectifs énergétiques et de détecter les zones critiques nécessitant des actions correctives immédiates. Cet outil permet donc de diffuser des connaissances, d'échanger des idées et de motiver les autres en leur faisant voir qu'avec des efforts constants et l'application de certaines mesures pour améliorer l'efficacité énergétique, il est possible d'économiser de l'énergie et des ressources. D'un autre côté, l'outil d'analyse proposé demeure à ce jour au stade initial de développement, mais au fil de son application au sein des organisations, il continuera de se perfectionner. Cela permettra de mieux mettre en contexte la situation énergétique réelle de chaque scierie et de tirer des conclusions encore plus détaillées et précises sur les actions à mener. Ainsi, cela permettra d'avoir une vision plus large de tous les facteurs pouvant influencer la performance énergétique opérationnelle. Pour cette raison, l'accès à des informations réelles est essentiel pour mieux refléter les réalités industrielles existantes. Enfin, dans ce scénario alternatif où l'accès à l'information est limité à une facture d'électricité, il a été possible de constater que même s'il n'y a pas de systèmes d'information numérique et de compteurs d'énergie intelligents dans toute l'usine, il est toujours possible de mettre en œuvre des stratégies énergétiques qui reposent sur l'utilisation d'EnPIs simples et d'outils d'évaluation comparative. Bien qu'ils ne permettent pas d'établir des relations entre la consommation d'électricité et les niveaux de production, ces outils assurent un suivi constant des progrès de l'efficacité énergétique grâce à une analyse comparative qui favorise l'amélioration continue au sein d'une organisation.

## 6.4 Références

- Abdelaziz, E. A., Saidur, R., & Mekhilef, S. (2011). A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 150-168.
- Andersson, E., Arfwidsson, O., & Thollander, P. (2018). Benchmarking energy performance of industrial small and medium-sized enterprises using an energy efficiency index: Results based on an energy audit policy program. *Journal of Cleaner Production*, 182, 883-895. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.027
- Bajpai, P. (2016c). Future Perspectives. In *Pulp and Paper Industry* (pp. 253-256).
- Benedetti, M., Cesarotti, V., & Introna, V. (2017). From energy targets setting to energy-aware operations control and back: An advanced methodology for energy efficient manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1518-1533. doi:10.1016/j.jclepro.2016.09.213
- Bond, B. 2008. Sawmill and treating insights: Rein in escalating energy costs. Accès le 05/05/2021, [https://palletenterprise.com/view\\_article/2648/Sawmill-&Treating-Insights:-Rein-in-Escalating-Energy-Costs-](https://palletenterprise.com/view_article/2648/Sawmill-&Treating-Insights:-Rein-in-Escalating-Energy-Costs-)
- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 667-679. doi:10.1016/j.jclepro.2010.11.011
- Clean Energy Ministerial (2016a). Catalyst paper case study. Accès le 16/09/2020, [https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2018-12/Catalyst\\_Canada.pdf](https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2018-12/Catalyst_Canada.pdf)
- Dörr, M., Wahren, S., & Bauernhansl, T. (2013). Methodology for Energy Efficiency on Process Level. *Procedia CIRP*, 7, 652-657.
- European Commission, 2009. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. European Commission.
- Fleiter, T., Fehrenbach, D., Worrell, E., & Eichhammer, W. (2012). Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. *Energy*, 40(1), 84-99.
- Gopalakrishnan, B., Ramamoorthy, K., Crowe, E., Chaudhari, S., & Latif, H. (2014). A structured approach for facilitating the implementation of ISO 50001 standard in the manufacturing sector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 154-165.
- Gopalakrishnan, B., Mardikar, Y., Gupta, D., Jalali, S. M., & Chaudhari, S. (2012). Establishing Baseline Electrical Energy Consumption in Wood Processing Sawmills for Lean Energy Initiatives: A Model Based on Energy Analysis and Diagnostics. *Energy Engineering*, 109(5), 40-80.
- Gopalakrishnan, B., Mate, A., Mardikar, Y., Gupta, D., & Plummer, R. (2005). Energy Efficiency Measures in the Wood Manufacturing Industry. *Proceedings ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*.
- Gordic, D., Babic, M., Jelic, D., Koncalovic, D., & Vukasinovic, V. (2014). Integrating energy and environmental management in wood furniture industry. *ScientificWorldJournal*, 2014, 596958. doi:10.1155/2014/596958

- Gordić, D., Babić, M., Jovičić, N., Šušteršič, V., Končalović, D., & Jelić, D. (2010). Development of energy management system – Case study of Serbian car manufacturer. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2783-2790.
- Introna, V., Cesarotti, V., Benedetti, M., Biagiotti, S., & Rotunno, R. (2014). Energy Management Maturity Model: an organizational tool to foster the continuous reduction of energy consumption in companies. *Journal of Cleaner Production*, 83, 108-117. doi:10.1016/j.jclepro.2014.07.001
- Javied, T., Deutsch, M., & Franke, J. (2019). A model for integrating energy management in lean production. *Procedia CIRP*, 84, 357-361.
- Jin, Y., Long, Y., Jin, S., Yang, Q., Chen, B., Li, Y., & Xu, L. (2021). An energy management maturity model for China: Linking ISO 50001:2018 and domestic practices. *Journal of Cleaner Production*, 290. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125168
- Johnsson, S., Andersson, E., Thollander, P., & Karlsson, M. (2019). Energy savings and greenhouse gas mitigation potential in the Swedish wood industry. *Energy*, 187. doi:10.1016/j.energy.2019.115919
- Kaman, J. A. (2002). Best in Class Energy Management Practices Provide Competitive Advantage. *Energy Engineering*, 99(4), 42-56. doi:10.1080/01998590209508901
- Kent, R. (2018). Introduction to energy management. In *Energy Management in Plastics Processing* (pp. 3-32).
- Kimura, O., Karlsson, M., Cornelis, E., Paramonova, S., Thollander, P., Morales, I., Navarro, J.J., Bertelsen, C.W., 2015. IEA IETS Annex XVI Energy Efficiency in SMEs Task III: Methods and Tools to Achieve Energy Efficiency in Industrial SMEs.
- Kindström, D., & Ottosson, M. (2016). Local and regional energy companies offering energy services: Key activities and implications for the business model. *Applied Energy*, 171, 491-500. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.092
- Kiran, D. R. (2017). Benchmarking. In *Total Quality Management* (pp. 415-424).
- Lyon, S. W., Quesada-Pineda, H. J., and Crawford, S. D. (2014). "Reducing electrical consumption in the forest products industry using lean thinking," *BioRes*. 9(1), 1373-1386.
- May, G., Stahl, B., Taisch, M., & Kiritsis, D. (2017). Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1464-1489. doi:10.1016/j.jclepro.2016.10.191
- May, G., Taisch, M., Prabhu, V. V., & Barletta, I. (2013, 2013//). Energy Related Key Performance Indicators – State of the Art, Gaps and Industrial Needs. Paper presented at the *Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains*, Berlin, Heidelberg.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (2012). Stratégie 2012-2017 pour transformer l'industrie québécoise des produits forestiers. Accès le 16/09/2020, <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/entreprise/strategie-developpement-2012-2017.pdf>
- Morvay, Z. K., & Gvozdenac, D. D. (2008). *Applied Industrial Energy and Environmental Management*. Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons.

- Neuhauser, C., 2004. A maturity model: does it provide a path for online course design? *J. Interact.* Accès le 26/04/2021, <http://www.ncolr.org/jiol/issues/pdf/3.1.3.pdf>
- Norland, D. L., & Lind, L. (2001). Corporate Energy Management: A Survey of Large Manufacturing Companies. *Energy Engineering*, 98(2), 53-72. doi:10.1080/01998590109509308
- Olsson, M., & Nilsson, D. (2013). Swedish experiences from Energy Management Systems in industry.
- Ressources naturelles Canada (2019a). Energy Efficiency in Canada: Report to parliament under the energy efficiency act. Accès le 16/09/2020, <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/www/pdf/publications/emmc/parliament17-18.pdf>
- Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., & Thollander, P. (2016). Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3692-3708. doi:10.1016/j.jclepro.2015.06.060
- Stenqvist, C., Nilsson, L. J., Ericsson, K., & Modig, G. (2011). Energy management in Swedish pulp and paper industry - the daily grind that matters. Paper presented at the 10th eceee summer study - energy efficiency first: the foundation of a low-carbon society, France.
- Shrouf, F., & Miragliotta, G. (2015). Energy management based on Internet of Things: practices and framework for adoption in production management. *Journal of Cleaner Production*, 100, 235-246. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.055>
- Thollander, P., Karlsson, M., Rohdin, P., Wollin, J., & Rosenqvist, J. (2020a). Energy management. In *Introduction to Industrial Energy Efficiency* (pp. 239-257).
- Thollander, P., Karlsson, M., Rohdin, P., Wollin, J., & Rosenqvist, J. (2020d). Industrial energy use. In *Introduction to Industrial Energy Efficiency* (pp. 49-60).
- Trianni, A., Cagno, E., Bertolotti, M., Thollander, P., & Andersson, E. (2019). Energy management: A practice-based assessment model. *Applied Energy*, 235, 1614-1636. doi:10.1016/j.apenergy.2018.11.032
- Trianni, A., Cagno, E., & De Donatis, A. (2014). A framework to characterize energy efficiency measures. *Applied Energy*, 118, 207-220. doi:10.1016/j.apenergy.2013.12.042
- Van Gorp, J. C. (2005). Using Key Performance Indicators To Manage Energy Costs. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 25(2), 9-25. doi:10.1080/10485230509509683
- Wengert, G. & Meyer D. (1992). Energy at the sawmill: Conservation and cost reduction. *Forestry Facts*, 61.

## Conclusion

Dans la transition énergétique mondiale actuelle visant à réduire les émissions de carbone de la planète, l'adoption des énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique joueront un rôle central dans le développement durable du secteur industriel. L'industrie forestière, figurant parmi les plus énergivores au monde, notamment en raison de l'industrie des pâtes et papiers, est au cœur de cette transition énergétique. Dans ce contexte, cette étude visait à promouvoir les pratiques de GE au sein des systèmes de production de l'industrie forestière, en particulier dans les scieries, et à mettre en place les supports et outils nécessaires lui permettant d'avoir un meilleur contrôle et suivi du comportement énergétique de ses opérations. Les trois principaux objectifs poursuivis consistaient donc à mettre en évidence les éléments clés devant être pris en compte par les industries lors de la mise en œuvre d'un système de GE dans les systèmes de production, à analyser le profil énergétique du secteur forestier ainsi que son degré de maturité énergétique de même qu'à développer deux scénarios d'analyse proposant des EnPIs, des méthodes, des actions et des stratégies énergétiques suivant la quantité d'informations disponibles dans une scierie.

Afin d'atteindre les objectifs visés, une revue de la littérature portant sur les principaux concepts et fondements de la GE a été effectuée de façon à explorer et à évaluer comment ces principes sont intégrés dans les systèmes de production d'une organisation. Cette revue a permis de mettre en évidence trois dimensions essentielles devant soutenir la mise en œuvre d'un système de GE, soit la GE dans les systèmes de production, l'intégration de la GE dans la structure organisationnelle et les modèles de maturité de la GE. À partir de ces dimensions, il a été possible de proposer un portrait conceptuel servant de base à l'élaboration d'un programme de GE. Celui-ci est d'une importance cruciale car il révèle les domaines spécifiques sur lesquels les organisations doivent travailler pour améliorer la performance énergétique de leurs opérations.

Par la suite, la deuxième partie du projet portant sur l'analyse du profil énergétique du secteur forestier dans le monde a été réalisée. Dans cette phase de la recherche, afin d'analyser les différentes stratégies guidant la transition énergétique de ce secteur, il était nécessaire de construire un cadre d'analyse dimensionnel basé sur différents critères d'évaluation. Les cadres et méthodologies d'analyse utilisés par Hossain et al. (2020), Abdelaziz et al. (2011) et Bunse et al. (2011) ont donc servi de référence pour établir cinq axes clés d'évaluation qui ont permis d'étudier le contexte énergétique actuel de l'industrie forestière dans divers pays du monde. Cette analyse a permis de constater que l'industrie forestière est obligée d'améliorer son efficacité énergétique et de réduire ses émissions de GES qui restent encore majeures, même si c'est une industrie qui a fait d'énormes progrès en matière de conservation de l'énergie. De même, le niveau de maturité des industries forestières dans le monde, qui est assez hétérogène d'une région à l'autre, montre clairement que des politiques énergétiques plus strictes sont encore nécessaires.

Les résultats obtenus dans la deuxième étape de la recherche ont souligné le besoin d'explorer les différentes possibilités de relier les technologies et les systèmes numériques de l'Industrie 4.0 aux systèmes de production du secteur forestier, étant donné qu'actuellement, il semble y avoir un besoin de mieux gérer, traiter et contrôler les données énergétiques au niveau opérationnel. Sur la base de cette constatation, le développement de la troisième étape de la recherche visait donc à aborder ce problème, en se concentrant principalement sur les scieries du sous-secteur des produits du bois. Deux scénarios d'analyse ont dû être créés pour représenter les différentes actions, EnPIs, stratégies, contrôles et méthodes pouvant être utilisés lorsque le niveau d'accès à l'information diffère entre chaque scierie. Le premier scénario d'analyse correspondait à celui des scieries disposant d'un accès complet aux données énergétiques de leurs processus de production via des compteurs intelligents. Grâce à l'utilisation de données synthétiques d'une scierie canadienne qui ont servi à effectuer l'étude de cas, il a été possible de développer une interface de tableau de bord conviviale offrant la possibilité d'avoir un meilleur processus de prise de décision, une meilleure gestion des coûts énergétiques au sein de chaque organisation et une meilleure compréhension de la performance énergétique des opérations à tous les niveaux organisationnels. De même, dans ce premier scénario où les systèmes de mesure d'énergie ont permis d'avoir un environnement d'analyse de données 4.0, il a été possible de comprendre les tendances de consommation d'électricité de chaque processus, d'établir des relations entre les volumes de production et l'énergie consommée, de faire des prévisions, de créer des contrôles énergétiques, de surveiller les économies d'énergie et d'établir des objectifs énergétiques.

Le deuxième scénario d'analyse correspondait à la situation où seule la facture d'électricité et les volumes de production globaux sont disponibles. Dans cette étude, il a été possible de développer un outil d'analyse permettant aux scieries de suivre, d'évaluer et de comparer leurs progrès d'efficacité énergétique en groupe et individuellement. Grâce à l'utilisation de divers EnPIs simples, au développement d'un modèle d'évaluation offrant la possibilité d'analyser le niveau de maturité des pratiques de GE adoptées par chaque scierie et à un carnet de bord établi à partir de la revue de la littérature, il a été possible de réaliser une analyse comparative fictive entre différentes scieries d'un même groupe industriel. Au moyen de cette analyse, les scieries ont pu partager diverses expériences, découvrir ce que les autres faisaient correctement et identifier des opportunités intéressantes pour améliorer leur efficacité énergétique. De même, le modèle d'évaluation basé sur les meilleures pratiques de GE a permis d'obtenir une vision assez précise du niveau de maturité des pratiques de GE adoptées par chaque scierie, de visualiser leurs portraits énergétiques actuels et d'identifier leurs zones critiques nécessitant des actions immédiates.

La présente recherche a donc permis de tirer des conclusions intéressantes quant à l'importance des systèmes de GE dans le secteur forestier et aux actions qui lui permettront de continuer à se développer de manière durable. Malgré le fait qu'au cours des dernières années, cette industrie a subi une transformation technologique

importante qui lui a permis de tirer parti du potentiel énergétique de la biomasse forestière, de développer son industrie bioénergétique et de dépendre de moins en moins des sources d'énergie fossiles, les coûts élevés associés à l'acquisition des technologies écoénergétiques émergentes sont des barrières économiques pour de nombreuses entreprises appartenant à ce secteur. De même, la mise en œuvre et l'adoption de ces technologies à base de biomasse ne se feront pas du jour au lendemain, étant donné que les dimensions du développement durable ne sont pas encore considérées comme des objectifs principaux dans la prise de décision d'un grand nombre d'entreprises appartenant à ce secteur. Pour cette raison, afin de réduire ses émissions de GES et de demeurer alignée sur les objectifs de sa transition énergétique, l'industrie forestière devra adopter des stratégies lui permettant de se développer durablement à court terme. L'amélioration de l'efficacité énergétique suit cette direction et semble être un moyen qui lui permettra de rester compétitive, rentable et durable même si plusieurs organisations de cette industrie manquent encore de méthodes, de stratégies et de contrôles pour aborder et mettre en place correctement les approches de la GE dans leurs systèmes de production. Ainsi, l'arrivée de l'Industrie 4.0 s'inscrit dans les objectifs de développement durable de ce secteur, car celle-ci lui permettra de disposer d'outils d'acquisition et de traitement de données plus avancés. Parallèlement, étant donné que cette dimension de l'industrie 4.0 semble peu développée dans cette industrie, le virage vers les technologies numériques permettra au secteur non seulement de disposer d'équipements plus économes en énergie, mais également d'adopter des systèmes appropriés de contrôle d'énergie, capables d'analyser le comportement énergétique de ses opérations et de surveiller simultanément la consommation d'énergie ainsi que les données de production à tous les niveaux organisationnels. De plus, grâce au fait que ces technologies numériques fournissent périodiquement des informations détaillées sur la consommation d'énergie de chaque processus de production, l'utilisation de l'énergie pourra être optimisée tout au long de la chaîne de valeur. Cependant, il est important de souligner que les outils seuls ne permettent pas de réussir en tant que tels, mais la GE est avant tout une question de leadership. En tant que l'un des secteurs industriels les plus énergivores au monde, il sera important pour cette industrie de créer des synergies entre les approches de la GE et les technologies émergentes liées à la biomasse forestière et à l'industrie 4.0 afin de rester compétitive, rentable et durable.

Enfin, concernant le portrait conceptuel de la GE proposé au chapitre 3, dans une recherche future il serait intéressant de pouvoir l'appliquer dans une étude de cas réel, afin de développer une procédure d'implantation permettant aux scieries d'homogénéiser et de standardiser le processus d'intégration du système de GE dans leur structure organisationnelle. Par conséquent, cela permettra de valider sa fonctionnalité, de collecter des preuves empiriques qui permettront de révéler les principaux obstacles liés à sa mise en œuvre et, surtout, d'analyser comment le facteur humain contribue à l'évolution du niveau de maturité énergétique au sein d'une organisation. D'un autre côté, quant à la transition énergétique et digitale de cette industrie, il serait intéressant d'interrelier les approches de l'Industrie 4.0 avec celles de la GE pour étudier de quelle façon leur intégration contribuera au développement économique, social et environnemental de cette industrie et pour en fonder des

recommandations qui motivent les entreprises à devenir plus proactives d'un point de vue GE. Concernant l'interface du tableau de bord énergétique présentée au chapitre 5 de ce mémoire, il serait pertinent d'automatiser l'analyse des données et de continuer à valider sa fonctionnalité pour améliorer l'expérience de l'utilisateur. Il conviendrait également d'intégrer l'interface avec les systèmes informatiques des scieries pour diffuser l'information à tous les niveaux organisationnels et la rendre accessible à tout le personnel. De la même manière, d'autres types d'énergie utilisés au sein des opérations des scieries pourraient être intégrés à l'interface afin d'avoir un meilleur portrait de la consommation totale d'énergie des organisations. Finalement, afin de concevoir une interface pouvant être utilisée à son plein potentiel, une étude future devrait considérer des scieries ayant des schémas de production différents, utilisant des sources d'énergie variées et possédant des caractéristiques organisationnelles diverses.

# Bibliographie

- Abdelaziz, E. A., Saidur, R., & Mekhilef, S. (2011). A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 150-168.
- Adès, J. (2010). L'impact du cadre réglementaire fédéral de réduction d'émissions de gaz à effet de serre de 2007 sur les choix des sources d'énergie de l'industrie québécoise des pâtes et papiers, Université Laval, Québec.
- Ammara, R., Fradette, L., & Paris, J. (2016). Equipment performance analysis of a Canadian Kraft mill. Part I: Development of new key performance indicators (KPI). *Chemical Engineering Research and Design*, 115, 160-172.
- Andersson, E., & Thollander, P. (2019). Key performance indicators for energy management in the Swedish pulp and paper industry. *Energy Strategy Reviews*, 24, 229-235. doi:10.1016/j.esr.2019.03.004
- Andersson, E., Arfwidsson, O., & Thollander, P. (2018). Benchmarking energy performance of industrial small and medium-sized enterprises using an energy efficiency index: Results based on an energy audit policy program. *Journal of Cleaner Production*, 182, 883-895. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.027
- B. Dumont, L. (2019). Gestion de la demande en puissance : Outil de planification et stratégies pour la production de bois d'œuvre [Mémoire de master, Université Laval, Québec]. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/37214>
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, 107776. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776
- Bajpai, P. (2016a). General Background. In *Pulp and Paper Industry* (pp. 1-8).
- Bajpai, P. (2016b). Pulp and Paper Production Processes and Energy Overview. In *Pulp and Paper Industry* (pp. 15-49).
- Bajpai, P. (2016c). Future Perspectives. In *Pulp and Paper Industry* (pp. 253-256).
- Benedetti, M., Cesarotti, V., & Introna, V. (2017). From energy targets setting to energy-aware operations control and back: An advanced methodology for energy efficient manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1518-1533. doi:10.1016/j.jclepro.2016.09.213
- Bond, B. 2008. Sawmill and treating insights: Rein in escalating energy costs. Accès le 05/05/2021, [https://palletenterprise.com/view\\_article/2648/Sawmill-&-Treating-Insights:-Rein-in-Escalating-Energy-Costs-](https://palletenterprise.com/view_article/2648/Sawmill-&-Treating-Insights:-Rein-in-Escalating-Energy-Costs-)
- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 667-679. doi:10.1016/j.jclepro.2010.11.011
- Cagno, E., Worrell, E., Trianni, A., & Pugliese, G. (2013). A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 290-308.

- Campo, G. d., Calatrava, S., Cañada, G., Olloqui, J., Martinez, R., & Santamaria, A. (2018, 4-7 June 2018). IoT Solution for Energy Optimization in Industry 4.0: Issues of a Real-life Implementation. Paper presented at the 2018 Global Internet of Things Summit (GloTS).
- Carvalho, N., Chaim, O., Cazarini, E., & Gerolamo, M. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 21, 671-678.
- Chryssolouris, E. L. K. E. (2006). *Manufacturing Systems: Theory and Practice*. Springer-Verlag New York, XXVI, 606.
- Clean Energy Ministerial (2018). CMPC case study. Accès le 16/09/2020, <http://www.cleanenergyministerial.org/initiative-clean-energy-ministerial/2018-energy-management-leadership-awards>
- Clean Energy Ministerial (2016a). Catalyst paper case study. Accès le 16/09/2020, [https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2018-12/Catalyst\\_Canada.pdf](https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2018-12/Catalyst_Canada.pdf)
- Clean Energy Ministerial (2016b). PT Indah Kiat Pulp & Paper case study. Accès le 16/09/2020, [https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2018-12/PT%20IKPP-%20Tangerang\\_Indonesia.pdf](https://www.cleanenergyministerial.org/sites/default/files/2018-12/PT%20IKPP-%20Tangerang_Indonesia.pdf)
- Devaru, D. G., Maddula, R., Grushecky, S. T., & Gopalakrishnan, B. (2014). Motor-Based Energy Consumption in West Virginia Sawmills. *Forest Products Journal*, 64(1/2), 33-40.
- Dörr, M., Wahren, S., & Bauernhansl, T. (2013). Methodology for Energy Efficiency on Process Level. *Procedia CIRP*, 7, 652-657.
- Duflou, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., . . . Kellens, K. (2012). Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals*, 61(2), 587-609.
- Duhaime, É. N., & Ramacieri, J. (2019). La contribution de l'industrie forestière aux gaz à effet de serre : La valorisation de la biomasse, une voie d'avenir. IRÉC.
- EIA, 2011. *International Energy Outlook 2011*. U.S. Energy Information Administration (EIA). American Forest & Paper Association (AF&PA). 2012.
- Espinoza, O., Buehlmann, U., & Bond, B. H. (2011). Energy and the US hardwood industry – part II: Responses to increasing prices. *BioResources*; Vol 6, No 4 (2011).
- European Commission, 2009. *Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency*. European Commission.
- Field, A., & Safari, a. O. R. M. C. (2019). - ISO 50001 - A strategic guide to establishing an energy management system.
- Fleiter, T., Fehrenbach, D., Worrell, E., & Eichhammer, W. (2012). Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. *Energy*, 40(1), 84-99. doi:10.1016/j.energy.2012.02.025

- García-Muiña, F. E., Medina-Salgado, M. S., Ferrari, A. M., & Cucchi, M. (2020). Sustainability Transition in Industry 4.0 and Smart Manufacturing with the Triple-Layered Business Model Canvas. *Sustainability*, 12(6). doi:10.3390/su12062364
- Gopalakrishnan, B., Ramamoorthy, K., Crowe, E., Chaudhari, S., & Latif, H. (2014). A structured approach for facilitating the implementation of ISO 50001 standard in the manufacturing sector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 154-165.
- Gopalakrishnan, B., Mardikar, Y., Gupta, D., Jalali, S. M., & Chaudhari, S. (2012). Establishing Baseline Electrical Energy Consumption in Wood Processing Sawmills for Lean Energy Initiatives: A Model Based on Energy Analysis and Diagnostics. *Energy Engineering*, 109(5), 40-80. doi:10.1080/01998595.2012.10531822
- Gopalakrishnan, B., Mate, A., Mardikar, Y., Gupta, D., & Plummer, R. (2005). Energy Efficiency Measures in the Wood Manufacturing Industry. *Proceedings ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*.
- Gordic, D., Babic, M., Jelic, D., Koncalovic, D., & Vukasinovic, V. (2014). Integrating energy and environmental management in wood furniture industry. *ScientificWorldJournal*, 2014, 596958. doi:10.1155/2014/596958
- Gordić, D., Babić, M., Jovičić, N., Šušteršič, V., Končalović, D., & Jelić, D. (2010). Development of energy management system – Case study of Serbian car manufacturer. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2783-2790.
- GOUVERNEMENT DU CANADA (2021). Tableau 25-10-0025-01 Industries manufacturières, total annuel de la consommation énergétique de combustibles en gigajoules, 31-33 [Online]. Available: <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2510002501> [Accessed].
- Gouvernement du Canada (2020). "Forest bioeconomy, bioenergy and bioproducts." Accès le 16/09/2020, <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/forests-forestry/forest-industry-trade/forest-bioeconomy-bioenergy-bioproducts/13315>
- Gouvernement du Canada. (2019). Bulletin sur la disponibilité et écoulement d'énergie au Canada : Révision 2016. Récupéré le 16/09/2020 sur Statistique Canada : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/57-003-x/57-003-x2019001-fra.htm>
- Greenwald, R., Wallace K. (2007). Monitoring, Targeting and Reporting: a Pathway to Continuous Improvement in Energy Management. Paper presented at the Fifth Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Beijing, China.
- Hasan, A. S. M. M., Hoq, M. T., & Thollander, P. (2018). Energy management practices in Bangladesh's iron and steel industries. *Energy Strategy Reviews*, 22, 230-236. doi:10.1016/j.esr.2018.09.002
- H. Kagermann, J. Helbig, A. Hellinger, W. Wahlster, Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry; Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, Forschungsunion, 2013.
- Hopf, H., & Müller, E. (2015). Providing energy data and information for sustainable manufacturing systems by Energy Cards. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 36, 76-83.
- Hossain, S. R., Ahmed, I., Azad, F. S., & Monjurul Hasan, A. S. M. (2020). Empirical investigation of energy management practices in cement industries of Bangladesh. *Energy*, 212.

- IEA (2020), Tracking Industry 2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2020>
- IEA (International Energy Agency), 2017. Tracking Clean Energy Progress 2017, Energy Technology Perspectives 2017, Excerpt Informing Energy Sector Transformations. IEA.
- IEA 2007. Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 emission.
- Introna, V., Cesarotti, V., Benedetti, M., Biagiotti, S., & Rotunno, R. (2014). Energy Management Maturity Model: an organizational tool to foster the continuous reduction of energy consumption in companies. *Journal of Cleaner Production*, 83, 108-117.
- IPCC (International Panel for Climate Change), 2014. Climate Change 2014. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change. Fifth Assessment Report.
- ISO. (2018). ISO 50001: 2018, Energy management systems.
- Javied, T., Deutsch, M., & Franke, J. (2019). A model for integrating energy management in lean production. *Procedia CIRP*, 84, 357-361.
- Javied, T., Rackow, T., & Franke, J. (2015). Implementing Energy Management System to Increase Energy Efficiency in Manufacturing Companies. *Procedia CIRP*, 26, 156-161.
- Jin, Y., Long, Y., Jin, S., Yang, Q., Chen, B., Li, Y., & Xu, L. (2021). An energy management maturity model for China: Linking ISO 50001:2018 and domestic practices. *Journal of Cleaner Production*, 290. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125168
- Johansson, M. T., & Thollander, P. (2018). A review of barriers to and driving forces for improved energy efficiency in Swedish industry– Recommendations for successful in-house energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 618-628.
- Johnsson, S., Andersson, E., Thollander, P., & Karlsson, M. (2019). Energy savings and greenhouse gas mitigation potential in the Swedish wood industry. *Energy*, 187. doi:10.1016/j.energy.2019.115919
- Jovanović, B., & Filipović, J. (2016). ISO 50001 standard-based energy management maturity model – proposal and validation in industry. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2744-2755.
- Kaman, J. A. (2002). Best in Class Energy Management Practices Provide Competitive Advantage. *Energy Engineering*, 99(4), 42-56. doi:10.1080/01998590209508901
- Kent, R. (2018). Introduction to energy management. In *Energy Management in Plastics Processing* (pp. 3-32).
- Kimura, O., Karlsson, M., Cornelis, E., Paramonova, S., Thollander, P., Morales, I., Navarro, J.J., Bertelsen, C.W., 2015. IEA IETS Annex XVI Energy Efficiency in SMEs Task III: Methods and Tools to Achieve Energy Efficiency in Industrial SMEs.
- Kindström, D., & Ottosson, M. (2016). Local and regional energy companies offering energy services: Key activities and implications for the business model. *Applied Energy*, 171, 491-500. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.092>
- Kiran, D. R. (2017). Benchmarking. In *Total Quality Management* (pp. 415-424).

- Kuhlberg, M., Industrie des pâtes et papiers (2015). Dans l'Encyclopédie Canadienne. Repéré à <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/industrie-des-pates-et-papiers-1>
- Lawrence, A., Nehler, T., Andersson, E., Karlsson, M., & Thollander, P. (2019). Drivers, barriers and success factors for energy management in the Swedish pulp and paper industry. *Journal of Cleaner Production*, 223, 67-82.
- Loeffler, D., Anderson, N., Morgan, T. A., & Sorenson, C. B. (2016). On-Site Energy Consumption at Softwood Sawmills in Montana. *Forest Products Journal*, 66(3/4), 155-163. doi:<http://dx.doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00108>
- Lyon, S. W., Quesada-Pineda, H. J., and Crawford, S. D. (2014). "Reducing electrical consumption in the forest products industry using lean thinking," *BioRes*. 9(1), 1373-1386.
- May, G., Stahl, B., Taisch, M., & Kiritsis, D. (2017). Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1464-1489.
- May, G., Taisch, M., Prabhu, V. V., & Barletta, I. (2013, 2013//). Energy Related Key Performance Indicators – State of the Art, Gaps and Industrial Needs. Paper presented at the Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains, Berlin, Heidelberg.
- May, G., Taisch, M., & Kelly, D. (2013). Enhanced Energy Management in Manufacturing through Systems Integration. In 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 7525-7530). New York: IEEE.
- May, G., Taisch, M., Stahl, B., & Sadr, V. (2013b). Toward Energy Efficient Manufacturing: A Study on Practices and Viewpoint of the Industry. In C. Emmanouilidis, M. Taisch, & D. Kiritsis (Eds.), *Advances in Production Management Systems: Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services, Amps 2012, Pt I* (Vol. 397, pp. 1-8). Berlin: Springer-Verlag Berlin.
- Ménard, M. (2005). Le Canada, un grand consommateur d'énergie : une perspective régionale. Produit 11-216-M no. 23, Statistique Canada
- Menghi, R., Papetti, A., Germani, M., & Marconi, M. (2019). Energy efficiency of manufacturing systems: A review of energy assessment methods and tools. *Journal of Cleaner Production*, 240.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2013). Enjeux énergétiques de l'industrie forestière québécoise. Accès le 26/04/2021 Enjeux énergétiques de l'industrie forestière québécoise ([gouv.qc.ca](http://gouv.qc.ca))
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (2020). Chiffre-clés du Québec forestier - édition 2020. Accès le 26/04/2021 <https://mffp.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/chiffres-cles.pdf>
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (2012). Stratégie 2012-2017 pour transformer l'industrie québécoise des produits forestiers. Accès le 16/09/2020, <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/entreprise/strategie-developpement-2012-2017.pdf>
- Morvay, Z. K., & Gvozdenac, D. D. (2008). *Applied Industrial Energy and Environmental Management*. Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons.
- Müller, E., Poller, R., Hopf, H., & Krones, M. (2013). Enabling Energy Management for Planning Energy-efficient Factories. *Procedia CIRP*, 7, 622-627.

- Müller, F., Jaeger, D., & Hanewinkel, M. (2019). Digitization in wood supply – A review on how Industry 4.0 will change the forest value chain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 206-218. doi:10.1016/j.compag.2019.04.002
- Murphy, F., Devlin, G., & McDonnell, K. (2015). Greenhouse gas and energy based life cycle analysis of products from the Irish wood processing industry. *Journal of Cleaner Production*, 92, 134-141. doi:10.1016/j.jclepro.2015.01.001
- Nagasawa, T., Pillay, C., Beier, G., Fritzsche, K., Pougel, F., Takama, T., The, K. & Bobashev, I. (2017). 'Accelerating clean energy through Industry 4.0: manufacturing the next revolution'. A report of the United Nations Industrial Development Organization, Vienna, Austria. [https://www.unido.org/sites/default/files/2017-08/REPORT\\_Accelerating\\_clean\\_energy\\_through\\_Industry\\_4.0.Final\\_0.pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/2017-08/REPORT_Accelerating_clean_energy_through_Industry_4.0.Final_0.pdf)
- National Energy Board, 2019. Canada's Energy Transition. Récupéré le 16/09/2020 sur <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/canada-energy-future/canada-energy-transition/cndsnrgtrnstn-eng.pdf>
- Neuhauser, C., 2004. A maturity model: does it provide a path for online course design? *J. Interact.* Accès le 26/04/2021, <http://www.ncolr.org/jjol/issues/pdf/3.1.3.pdf>
- Norland, D. L., & Lind, L. (2001). Corporate Energy Management: A Survey of Large Manufacturing Companies. *Energy Engineering*, 98(2), 53-72. doi:10.1080/01998590109509308
- Olsson, M., & Nilsson, D. (2013). Swedish experiences from Energy Management Systems in industry.
- Posch, A., Brudermann, T., Braschel, N., & Gabriel, M. (2015). Strategic energy management in energy-intensive enterprises: a quantitative analysis of relevant factors in the Austrian paper and pulp industry. *Journal of Cleaner Production*, 90, 291-299.
- Quesada-Pineda, H., Wiedenbeck, J., & Bond, B. (2015). Analysis of electricity consumption: a study in the wood products industry. *Energy Efficiency*, 9(5), 1193-1206. doi:10.1007/s12053-015-9417-4
- Rajić, M. N., Maksimović, R. M., Milosavljević, P., & Pavlović, D. (2019). Energy Management System Application for Sustainable Development in Wood Industry Enterprises. *Sustainability*, 12(1). doi:10.3390/su12010076
- Ressources naturelles Canada. (2020). L'état des forêts au Canada : Rapport annuel 2019. Récupéré le 16/09/2020 sur Ressources naturelles Canada : <https://scf.rncan.gc.ca/publications?id=40085>
- Ressources naturelles Canada (2019a). Energy Efficiency in Canada: Report to parliament under the energy efficiency act. Accès le 16/09/2020, <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/www/pdf/publications/emmc/parliament17-18.pdf>
- Ressources naturelles Canada (2019b). Cahier d'information sur la forêt 2018-2019. Accès le 16/09/2020, <https://scf.rncan.gc.ca/publications?id=39506>
- Ressources naturelles Canada (2018). Tableau A.4 : Part de la consommation d'énergie dans le secteur manufacturier, de 2000 à 2018 (%). Récupéré sur la Base de données nationale sur la consommation d'énergie : <https://oe.e.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/menus/cie/2018/tableaux.cfm>

- Ressources naturelles Canada (2017). Enquête sur la consommation industrielle d'énergie (CIE) - Rapport statistique sur l'utilisation de l'énergie dans le secteur manufacturier canadien, 1997-2017. Accès le 26/04/2021, <https://oee.nrcan.gc.ca/publications/statistiques/cie/2017/pdf/cie17.pdf>
- Richert, M. (2017). An energy management framework tailor-made for SMEs: Case study of a German car company. *Journal of Cleaner Production*, 164, 221-229.
- Salonitis, K., & Ball, P. (2013). Energy Efficient Manufacturing from Machine Tools to Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*, 7, 634-639.
- Sandberg, D., Vasiri, M., Trischler, J., & Öhman, M. (2014). The role of the wood mechanical industry in the Swedish forest industry cluster. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29(4), 352-359.
- Schönsleben, P., 2007. *Integral Logistics Management. Operations and Supply Chain Management in Comprehensive Value-added Networks*, third ed. Auerbach, Boca Raton, FL.
- Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., & Thollander, P. (2016). Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3692-3708. doi:10.1016/j.jclepro.2015.06.060
- Shrouf, F., & Miragliotta, G. (2015). Energy management based on Internet of Things: practices and framework for adoption in production management. *Journal of Cleaner Production*, 100, 235-246. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.055>
- Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014, 9-12 Dec. 2014). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. Paper presented at the 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.
- Stenqvist, C., Nilsson, L. J., Ericsson, K., & Modig, G. (2011). Energy management in Swedish pulp and paper industry - the daily grind that matters. Paper presented at the 10th eceee summer study - energy efficiency first: the foundation of a low-carbon society, France.
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536-541.
- Swedish Forest Industries Federation (s.d.). "Roadmap for fossil free competitiveness Forest Sector." Accès le 01/10/2020, <https://www.forestindustries.se/news/publications-and-reports/>
- Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) Canada 2017 version 3.0. Récupéré le 16/09/2020 sur Statistique Canada : [https://www23.statcan.gc.ca/imdb/p3VD\\_f.pl?Function=getVD&TVD=1181553](https://www23.statcan.gc.ca/imdb/p3VD_f.pl?Function=getVD&TVD=1181553)
- Teng, S. Y., Touš, M., Leong, W. D., How, B. S., Lam, H. L., & Máša, V. (2021). Recent advances on industrial data-driven energy savings: Digital twins and infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110208. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110208>
- Thiede, S., Bogdanski, G., & Herrmann, C. (2012). A Systematic Method for Increasing the Energy and Resource Efficiency in Manufacturing Companies. *Procedia CIRP*, 2, 28-33.
- Thollander, P., Karlsson, M., Rohdin, P., Wollin, J., & Rosenqvist, J. (2020a). Energy management. In *Introduction to Industrial Energy Efficiency* (pp. 239-257).

- Thollander, P., Karlsson, M., Rohdin, P., Wollin, J., & Rosenqvist, J. (2020b). Industrial energy systems. In *Introduction to Industrial Energy Efficiency* (pp. 33-47).
- Thollander, P., Karlsson, M., Rohdin, P., Wollin, J., & Rosenqvist, J. (2020c). Introduction. In *Introduction to Industrial Energy Efficiency* (pp. 1-13).
- Thollander, P., Karlsson, M., Rohdin, P., Wollin, J., & Rosenqvist, J. (2020d). Industrial energy use. In *Introduction to Industrial Energy Efficiency* (pp. 49-60).
- Tokola, H., Gröger, C., Järvenpää, E., & Niemi, E. (2016). Designing Manufacturing Dashboards on the Basis of a Key Performance Indicator Survey. *Procedia CIRP*, 57, 619-624. doi:10.1016/j.procir.2016.11.107
- Trianni, A., Cagno, E., Bertolotti, M., Thollander, P., & Andersson, E. (2019). Energy management: A practice-based assessment model. *Applied Energy*, 235, 1614-1636. doi:10.1016/j.apenergy.2018.11.032
- Trianni, A., Cagno, E., Marchesani, F., & Spallina, G. (2016). Classification of drivers for industrial energy efficiency and their effect on the barriers affecting the investment decision-making process. *Energy Efficiency*, 10(1), 199-215.
- Trianni, A., Cagno, E., & De Donatis, A. (2014). A framework to characterize energy efficiency measures. *Applied Energy*, 118, 207-220. doi:10.1016/j.apenergy.2013.12.042
- Van Gorp, J. C. (2005). Using Key Performance Indicators To Manage Energy Costs. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 25(2), 9-25. doi:10.1080/10485230509509683
- Vijayaraghavan, A., & Dornfeld, D. (2010). Automated energy monitoring of machine tools. *CIRP Annals*, 59(1), 21-24.
- Vikhorev, K., Greenough, R., & Brown, N. (2013). An advanced energy management framework to promote energy awareness. *Journal of Cleaner Production*, 43, 103-112.
- Wengert, G. & Meyer D. (1992). Energy at the sawmill: Conservation and cost reduction. *Forestry Facts*, 61.
- Whitmore, J., & Pineau, P.-O. (2020). *État de l'énergie au Québec 2020*, Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. Préparé pour Transition énergétique Québec, Montréal.