



Université du Québec
à Rimouski

L'efficacité énergétique et l'industrie 4.0 dans l'industrie du bois

Thèse présentée

dans le cadre du programme de doctorat en ingénierie de l'UQAC,

offert par extension à l'UQAR,

en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

PAR

© **MOHAMED HADDOUCHE**

Juin 2023

Composition du jury :

Sasan Sattarpanah Karganroudi, président du jury, UQAR

Adrian Ilinca, directeur de recherche, UQAR

Sébastien Poncet, examinateur externe, Université de Sherbrooke

Aziz Laghdir, Serex

Dépôt initial le 12 janvier 2023

Dépôt final le 12 juin 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

D'abord je remercie ALLAH pour tout ce qu'il m'a accordé comme santé, volonté et patience pour achever ce travail.

Je remercie mes parents pour toute l'éducation qu'ils m'ont inculquée et surtout pour m'avoir encouragé et orienté.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur Adrian Ilinca, mon directeur de thèse et professeur à l'Université de Québec à Rimouski pour m'avoir fait confiance et m'avoir accepté dans son équipe de recherche, ainsi que pour sa patience et sa sagesse et pour toutes les qualités humaines et professionnelles que j'ai beaucoup appréciées.

Je tiens à remercier Dr Mounir Chaouch chercheur au SEREX pour sa contribution à la thèse en encadrant les travaux expérimentaux durant cinq ans surtout dans les périodes difficiles de la pandémie.

Je n'oublie pas de remercier Mr Fahed Martini pour sa contribution dans la rédaction de cette thèse.

Je remercie messieurs les membres du jury pour la caution qu'ils ont bien voulu apporter à ce travail. J'adresse mes remerciements au président du jury, Prof. Sasan Sattarpanah Karganroudi, et aux membres, Prof. Sébastien Poncet et Dr. Aziz Laghdir.

RÉSUMÉ

L'apparition du concept de l'industrie 4.0 a changé la vision de l'industrie manufacturière, ce paradigme touche plusieurs secteurs comme la production, l'approvisionnement, la maintenance et l'énergie. Notre projet de recherche est une feuille de route pour une implantation efficace du concept de l'industrie 4.0 dans le domaine de l'efficacité énergétique. Nous illustrons les différentes étapes d'implantation du concept de l'industrie 4.0 dans le domaine énergétique tout en démontrant la manière dont ce concept contribue à réduire la consommation énergétique dans le domaine industriel.

L'exemple de l'industrie des meubles est un exemple très particulier, classifié comme la troisième transformation de l'industrie du bois. Cette industrie a des exigences communes avec les autres industries comme l'obligation d'assurer un environnement équilibré auquel sont exposés les travailleurs, appelé le confort thermique, et des exigences particulières comme l'entreposage de la matière première.

Selon les normes de qualité en vigueur, la teneur en humidité doit être comprise entre 8% et 12% pour que la matière première à base de bois soit admissible aux différentes transformations, ce qui nécessite une surveillance permanente de ce paramètre surtout dans des régions où la fluctuation de la température et l'humidité de l'air est importante comme au Bas-Saint-Laurent au Québec.

D'une part, nos connaissances sur le concept de l'industrie 4.0 ainsi que sur le comportement de la matière entreposée sont minimales, alors on a procédé par la définition des notions nécessaires le long de notre étude et surtout les points de jonction entre l'industrie 4.0, l'efficacité énergétique, et l'industrie du bois, ensuite on a entamé une étude approfondie sur le comportement thermo-hydrigue des deux principaux matériaux utilisés dans la troisième transformation du bois qui sont la mélamine et le MDF (Medium Density Fiberboard). L'étude est composée de quatre approches qui sont : la formulation mathématique, la simulation numérique, l'étude expérimentale et la modélisation par les RNA (Réseaux de Neurones Artificiels). Cette étude a été effectuée en collaboration avec SEREX (Service de Recherche et d'Expertise en transformation des produits forestiers) situé à Amqui au Bas-Saint-Laurent. La comparaison des résultats entre l'approche expérimentale et les RNA ainsi que celle entre l'approche expérimentale et la simulation nous a permis de valider les résultats.

D'autre part, une implantation de l'industrie 4.0 dans le domaine énergétique implique une démarche pratique, ce qui se traduit par une étude de cas ; l'étude de cas consiste à élaborer une solution dite Solution 4.0 dans le volet énergétique dédiée à l'industrie du bois. Cette solution a été appliquée à l'atelier d'usinage de SEREX. On a utilisé les notions étudiées dans la partie théorique ainsi que les résultats de l'étude du comportement thermo hydrigue de la mélamine et MDF. La solution 4.0 se manifeste d'abord par l'installation et l'adaptation des dispositifs énergétiques qui se résument dans l'imagerie RA (Réalité

Augmentée), les capteurs intelligents, les actionneurs et les appareils de connexion. Ensuite, cette installation sera gérée par une application développée sous Visual Basic pour ordinateur basée sur un algorithme structuré. Elle prend en considération le confort thermique, les conditions de la matière première et l'efficacité énergétique (gestion d'énergie 4.0), ensuite elle enregistre les données dans Google Cloud, et les visualisent à l'aide d'une interface pour téléphone intelligent.

L'application de la solution 4.0 a montré que les outils de l'industrie 4.0 peuvent garantir une surveillance permanente de l'environnement afin d'assurer le confort thermique des travailleurs, détecter les anomalies au niveau de la matière première entreposée, et augmenter l'efficacité énergétique de l'atelier en économisant l'énergie consommée. Une comparaison des consommations entre le mode sans solution 4.0 et avec solution 4.0 montre que la valeur de l'énergie économisée sous forme de chauffage par gaz de propane est estimée à 128.05 kWh qui vaut 14.85 \$ sur une période de 3 heures dans une saison d'automne.

Mots clés : efficacité énergétique, industrie 4.0, industrie du bois, mélamine, MDF, séchage du bois, teneur en humidité, confort thermique.

ABSTRACT

The industry 4.0 concept has changed the vision of the manufacturing industry. This paradigm affects several sectors: production, supply, maintenance, and energy. Our research project is a roadmap for effectively implementing the industry 4.0 concept to energy efficiency. In other words, we study the implementation of a structured approach by determining the necessary steps that lead to the practical implementation of the industry 4.0 concept in the energy field while demonstrating how this concept contributes to improving energy consumption in the industrial field.

The furniture industry is a very particular example classified as the third transformation of wood. This industry has standard requirements similar to other industries, such as the obligation to respect the environment the workers are exposed to, called thermal comfort, and special requirements for raw material storage.

According to the quality standards in force, these standards require that the moisture content must be between 8% and 12% for the wood-based raw material to be eligible for the various transformations. This requires permanent monitoring of this parameter, especially in regions with high air temperature and humidity fluctuations, as in the Bas-Saint-Laurent in Quebec.

On the one hand, our knowledge of the concept of industry 4.0, as well as the behavior of the stored material, is minimal, so we proceeded by defining the concepts necessary throughout our study and especially the points of junction between the industry 4.0, energy efficiency, and the wood industry. On the other hand, we started an in-depth study on the thermo-hydric behavior of the two primary materials used in the third transformation of wood, melamine, and MDF. The study comprises four approaches: the mathematical formulation, the numerical simulation, the experimental study, and the modeling by the ANN. This study was carried out in collaboration with SEREX, a research center for the wood industry. Comparing the results between the experimental approach and the ANN and between the experimental approach and the simulation allowed us to validate the results.

On the other hand, through a case study, we assess the implementation of Industry 4.0 in the energy field with a practical approach. The case study involves developing a solution called Solution 4.0 in the energy component dedicated to the wood industry. This solution was applied to the machine shop at SEREX, and the concepts studied in the theoretical part were used, as well as the results of the study of the thermo-hydric behavior of melamine and MDF. The 4.0 solution is manifested by the installation and adaptation of energy devices that are summarized in AR (Augmented Reality) imaging, smart sensors, actuators, and

connection devices. Then, this installation will be managed by an application developed in Visual Basic for computer based on a structured algorithm. It considers thermal comfort, raw material conditions, and energy efficiency (energy management 4.0), stores the data in Google Cloud, and uses a visualization interface for the smartphone.

The application of solution 4.0 has shown that Industry 4.0 tools can guarantee permanent monitoring of the environment to ensure the thermal comfort of workers, detect anomalies in the stored raw material, and increase the energy efficiency of the workshop by saving the consumed energy. A comparison of consumption between the mode without solution 4.0 and with solution 4.0 shows that the value of the saved energy for heating with propane gas is estimated at 128.05 kWh which is worth \$14.85 over 3 hours in an autumn season.

Keywords: energy efficiency, industry 4.0, wood industry, melamine, MDF, wood drying, moisture content, thermal comfort.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT.....	vii
TABLE DES MATIÈRES.....	ix
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des figures.....	xiv
Liste des abréviations, des sigles et des acronymes.....	xvii
Liste des symboles.....	xix
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 CADRE GÉNÉRAL DE RECHERCHE.....	6
1.1 PRÉSENTATION DE LA PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE.....	7
1.1.1 Problématique liée à la matière première.....	7
1.1.2 Problématique liée à la gestion de l'énergie.....	11
1.1.3 Analyse globale de la problématique.....	15
1.2 ÉTAT DE L'ART.....	16
1.3 SOLUTION PROPOSÉE.....	16
1.4 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	17
1.4.1 Planification des étapes.....	18
1.4.2 Planification des publications.....	19
1.5 OBJECTIF, CONTRIBUTIONS ET ORIGINALITÉ DE LA RECHERCHE.....	20
CHAPITRE 2 INDUSTRIE 4.0 ET L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE.....	23
2.1 INDUSTRIE 4.0.....	23
2.1.1 Historique.....	23

2.1.2	Principe et composantes.....	25
2.2	EFFICACITE ENERGETIQUE ET L'INDUSTRIE 4.0.....	29
2.2.1	Efficacité énergétique en industrie.....	29
2.2.2	Concept de l'industrie 4.0 pour améliorer l'efficacité énergétique.....	31
2.2.3	Les secteurs impactés par l'efficacité énergétique.....	36
2.3	RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	37
CHAPITRE 3 INDUSTRIE DU BOIS ET DE SES DÉRIVÉES - VOLET		
ÉNERGÉTIQUE.....		41
3.1	IMPACT SOCIO-ECONOMIQUE DE L'INDUSTRIE DU BOIS ET DERIVEES.....	41
3.1.1	Ressources naturelles.....	41
3.1.2	Ressources économiques et sociales.....	42
3.1.4	Cas de l'industrie des meubles.....	44
3.2	ANATOMIE DU BOIS.....	44
3.2.1	La macroscopie du bois.....	46
3.2.2	La microscopie du bois.....	46
3.2.3	Propriétés thermiques et mécaniques.....	47
3.3	L'EAU ET LE BOIS.....	50
3.3.1	Description générale.....	50
3.3.2	Effet de l'eau sur le bois.....	51
3.4	LES PANNEAUX DERIVEES DU BOIS.....	52
3.5	L'ENERGIE ET L'INDUSTRIE DU BOIS.....	54
3.6	TECHNOLOGIE DE SECHAGE.....	57
3.6.1	Paramètres de séchage.....	57
3.6.2	Défauts liés au séchage.....	58
CHAPITRE 4 ÉTUDE DU COMPORTEMENT THERMO-HYDRIQUE DES		
DÉRIVÉES DU BOIS.....		59
4.1	CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE.....	59
4.1.1	Présentation du SEREX.....	Erreur ! Signet non défini.
4.1.2	Notion du confort thermique.....	Erreur ! Signet non défini.
4.2	FORMULATION MATHEMATIQUE.....	62

4.2.1	Teneur en humidité (TH).....	62
4.2.2	Teneur en Humidité d'Équilibre (THE)	62
4.2.3	Profil de l'humidité et diffusion	64
4.2.4	Méthodes de résolution mathématique du problème.....	65
4.2.5	Développement du modèle mathématique	79
4.3	SIMULATION DU PHENOMENE DE TRANSFERT	81
4.3.1	Équations gouvernantes.....	82
4.3.2	Géométrie et génération de maillage.....	84
4.3.3	Résultats de simulation.....	86
4.4	ÉTUDE EXPERIMENTALE SUR LA MATIERE PREMIERE	90
4.4.1	Procédure expérimentale	90
4.4.2	Méthodologie expérimentale	91
4.4.3	Résultats expérimentaux.....	95
4.5	MODELISATION PAR LES RESEAUX DE NEURONES	101
4.5.1	Construction du modèle.....	102
4.5.2	Critères de performance	103
4.5.3	Résultats de modélisation par RNA	103
4.6	COMPARAISON ET DISCUSSION DES RESULTATS	107
4.6.1	Critère de comparaison.....	107
4.6.2	Résultats de comparaison - Expérience Vs RNA	107
4.6.3	Résultats de validation- Expérience Vs Simulation	108
4.6.4	Interprétation des résultats.....	111
4.7	PLAN DE PUBLICATIONS	112
CHAPITRE 5 IMPLANTATION DE LA SOLUTION ÉNERGIE 4.0.....		114
5.1	ÉTUDE DE CAS (ATELIER D'USINAGE SEREX).....	114
5.2	PRÉSENTATION DE LA SOLUTION 4.0	116
5.3	DISPOSITIFS MATERIELS (HARDWARE).....	117
5.3.1	Image thermique et lunette (Réalité Augmentée).....	118
5.3.2	Capteurs et actionneurs (IdO).....	120
5.4	GESTION ÉNERGÉTIQUE (SOFTWARE).....	127
5.4.1	Structure de l'application	127
5.4.2	Interface d'utilisateur de l'ordinateur	130

5.4.3 Interface d'utilisateur du cellulaire	132
5.5 SIMULATION, RESULTATS ET DISCUSSION	134
5.6 LIMITATIONS DE LA SOLUTION 4.0.....	138
5.6.1 Choix des outils.....	138
5.6.2 Volume des données	139
5.6.3 Sécurité informatique (Cybersécurité).....	139
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	141
ANNEXES	146
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	171

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Sources et commandes de chaleur dans une usine de transformation du bois (CANBOARD).....	12
Tableau 2 Différents endroits critiques pour la conservation de la chaleur (CANBOARD).....	14
Tableau 3 Cartographie des articles publiés sur l'efficacité énergétique et l'industrie 4.0 dans l'industrie manufacturière (en particulier l'industrie du bois).	39
Tableau 4 Méthodes utilisées dans la littérature pour déterminer la distribution d'humidité M et/ou la diffusion D pour les panneaux à base de bois.....	73
Tableau 5 Paramètres de simulation	83
Tableau 6 Résultats de calcul de la sensibilité au maillage.	85
Tableau 7 Paramètres d'essai initiaux et corrigés de l'expérience.....	95
Tableau 8 Échantillons d'anhydride (TH = 0%).	96
Tableau 9 Valeurs de la TH pour la mélamine et le MDF.....	96
Tableau 10 Temps nécessaire pour atteindre la TH appropriée pour chaque condition de test.....	100
Tableau 11 Résultats numériques du RNA pour la mélamine et le MDF.	104
Tableau 12 Indices de performance du modèle RNA pour la mélamine et le MDF	105
Tableau 13 Comparaison des résultats entre le modèle expérimental et le modèle par RNA.	108
Tableau 14 Comparaison des résultats entre le modèle expérimental et le modèle de simulation.	111
Tableau 15 Comparaison des consommations avec et sans l'usage de l'application.	137

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les défauts de fabrication dans l'industrie des meubles (Source CANBOARD).	9
Figure 2. Diagramme cause-effet des défauts de fabrication des meubles.	10
Figure 3. Illustration générale de la solution proposée.	17
Figure 4. Illustration générale de la solution proposée.	22
Figure 5. Les quatre révolutions industrielles.	24
Figure 6. Industrie 4.0 et l'usine intelligente [18].	25
Figure 7. Structure de base de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel.	30
Figure 8. Le concept d'un bâtiment intelligent [61].	33
Figure 9. Procédé industriel du point de vue énergétique [66].	34
Figure 10. Influence de l'économie, de l'environnement, et de la politique sur le secteur énergétique.	37
Figure 11. Ordinogramme PRISMA de la sélection des articles sur l'efficacité énergétique, l'industrie 4.0 et l'industrie du bois [77].	38
Figure 12. La chaîne de transformation des produits du bois [101].	45
Figure 13. Vue macroscopique d'une coupe transversale [103].	46
Figure 14. Image de coupe transversale de bois (<i>Populus tremuloides</i>), vue par le Microscope Électronique à Balayage (MEB) [105].	47
Figure 15. Trois principaux axes du bois [105].	49
Figure 16. Gonflement d'un bloc en bois dans les trois directions [109].	51
Figure 17. Tache de sève ou bien de couleurs du gris bleuté au noir sur le pin [112].	52
Figure 18. Arbre généalogique de transformation du bois [113].	53
Figure 19. Schéma d'un système de dépoussiérage [119].	56

Figure 20. Les déformations les plus connues dans le bois [125].	58
Figure 21. Plages acceptables de température et d'humidité opérationnelle pour des personnes portant des vêtements d'été et d'hiver typique pendant une activité légère [126].	61
Figure 22. Isothermes de sorption (adsorption et désorption) en fonction de l'humidité relative pour le bois de peuplier et trois types de panneaux à base de bois [128].	62
Figure 23. La teneur en humidité à l'équilibre (THE) pour le bois en fonction de la température et de l'humidité relative [106].	63
Figure 24. Maillage du modèle à simuler a) Mélamine, b) MDF.	84
Figure 25. Graphique de la sensibilité au maillage.	85
Figure 26. Transfert de chaleur et d'humidité dans la mélamine.	87
Figure 27. Transfert de chaleur et d'humidité dans le MDF.	87
Figure 28. Simulation de l'évolution de la teneur en humidité au cours de séchage pour la mélamine.	88
Figure 29. Simulation de l'évolution de la teneur en humidité au cours de séchage pour le MDF.	89
Figure 30. Échantillons d'essai (M pour MDF et P pour mélamine) - dispositifs d'essai.	93
Figure 31. Séchoir.	93
Figure 32. Chambre de conditionnement : (a) vue extérieure (b) interface de contrôle (c) vue intérieure.	94
Figure 33. Évolution de la teneur en humidité (TH) dans des conditions extrêmes (23°C et 95%) pour la mélamine et le MDF	97
Figure 34. Évolution de la TH en fonction du temps pour les six points de condition 1) 23°C & 65% ; 2) 26°C & 57% ; 3) 27°C & 20% ; 4) 20°C & 31% ; 5) 19°C & 65% ; 6) 23°C & 63%	99
Figure 35. Architecture RNA proposée.	102
Figure 36. Comparaison entre le modèle expérimental et le modèle de simulation.	110
Figure 37. Les éléments de l'atelier d'usinage au SEREX.	116

Figure 38. Schéma des éléments physiques de la solution 4.0.....	117
Figure 39. Diagramme d'acquisition de l'image RA.	119
Figure 40. Module Bluetooth (HC-06).....	122
Figure 41. Capteur de température et d'humidité de l'air : a) DHT22, b) Montage complet.	123
Figure 42. Capteur du taux d'humidité du sol.....	123
Figure 43. Capteur du taux d'humidité des panneaux mélamine et MDF : a) Capteur modifié, b) montage complet.	124
Figure 44. Capteur de la température dépoussiéreur : a) Sac de filtration, b) moteur, c) montage complet.....	125
Figure 45. Capteur de température monté sur la broche du CNC.	125
Figure 46. Capteur de la température pompe à vide : a) sortie d'air chaud, b) moteur, c) montage complet.....	126
Figure 47. Actionneur de ventilateur-chauffage : a) carte d'interface relais, b) montage complet.....	127
Figure 48. Algorithme de l'application Énergie 4.0 (WEM 2.0).....	129
Figure 49. Interface d'utilisateur de l'ordinateur	131
Figure 50. Interface Google Cloud.....	132
Figure 51. Interface d'utilisateur du cellulaire : a) connexion, b) affichage des données.	133
Figure 52. Évolution de la température des appareils en fonction du temps	134
Figure 53. Évolution des humidités en fonction du temps	135
Figure 54. Comparaison entre le mode de fonctionnement avec l'application et le mode de fonctionnement sans l'application	136

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

API	Automate Programmable Industriel
AR	Augmented Reality
ASTM	American Society for Testing and Materials
CNC	Computer Numerical Control
CNESST	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
CPA	Composite Panel Association
CPS	Cyber Physical Systems
CTP	Coût Total de Possession
DNN	Deep Neural Network
EMC	Equilibrium Moisture Content (la teneur en humidité à l'équilibre)
EQM	Erreur Quadratique Moyenne
ER	Erreur Relative
ERP	Entreprise Ressource Planning
FEM	Finite Element Method
FLIR	Forward-looking infrared
GES	Gaz à Effet de Serre
H2M	Human-to-Machine
HR	Humidité Relative
IA	Intelligence Artificielle
IdO	Internet des objets

IIdO	Internet industriel des objets
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
IT	Information Technology
M2M	Machine-to-machine
MDF	Medium Density Fiberboard
MEB	Microscope Électronique à Balayage
P2P	Peer-to-Peer
PIB	Produit Intérieur Brut
Psat	Pression de saturation
RA	Réalité Augmentée
RNA	Réseau de neurones artificiels
SEREX	SERvice de Recherche et d'EXpertise en transformation des produits forestiers
SCIAN	Système de classification des industries de l'Amérique du Nord
SCP	Systèmes cyber physiques
T, Ta	Température de l'air
TH	Taux d'Humidité
THE	Teneur en Humidité à l'équilibre
THhumide	Teneur en Humidité à base humide
THsec	Teneur en Humidité à base sèche
TI	Technologie Informatique
Ts	Température de séchage
Tsec	Temps de séchage

LISTE DES SYMBOLES

$\rho C_p \text{ eff}$	Capacité thermique volumétrique effective à pression constante (J/(m ³ ·K))
ϕ_w	Humidité Relative (%)
A	Logarithme naturel (ln) de l'énergie libre de Gibbs par gramme d'eau sorbée lorsque l'humidité relative approche de zéro (ΔG_0 cal/g) $A = \text{Ln}(\Delta G_0)$
C_p	Capacité thermique du fluide à pression constante (J/kg.K)
$C_p\text{MDF}$	Capacité thermique spécifique du MDF (J/kg.K)
$C_p\text{Melamine}$	Capacité thermique spécifique de la Mélamine (J/kg.K)
C_{sat}	Concentration de saturation (mol/m ³)
D	Coefficient de diffusion (m ² /s)
D_{eff}	Coefficient de diffusion effectif (m ² /s)
$e_s(T)$	Pression de saturation de la vapeur (Pa) (fonction)
G	Source d'humidité (kg/m ³ ·s)
g_w	Flux de vapeur par diffusion (kg/(m ² ·s))
k_{eff}	Conductivité thermique effective (W/(m·K))
MC_fin	Teneur en humidité finale
MC_ini	Teneur en humidité initiale

Mv	Constante du matériau qui correspond approximativement au point de saturation de la fibre pour la désorption (%)
P	Pression atmosphérique (Pa)
P_{sat}	Pression de saturation de la vapeur (Pa) (valeur numérique)
q	Flux de chaleur conductif (W/m ²)
Q	Source de chaleur (W/m ³ .s)
R (RNA)	Coefficient de régression
R (Simulation)	Constante universelle des gaz parfaits (1,9858 cal/mole/°K)
RH	Humidité Relative (%) (valeur numérique)
T, T_a	Température de l'air (K)
T_{ini}	Température initiale (K)
μ	Vitesse du fluide (ou vitesse de Darcy) (m/s)
μ_g	Vitesse de l'air (m/s)
ω(ϕ_w)	Teneur en humidité (%) (fonction)
W_w	Poids moléculaire de l'eau (18 mole ⁻¹)
ε_p	Porosité
ρ	Densité du fluide (kg/m ³)
ρ_g	Densité de l'air (kg/m ³)
ω_v	Fraction massique de vapeur

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les industriels, habitués dans les années passées à des marges relativement confortables, se trouvent actuellement face à un marché de plus en plus concurrentiel, pour lequel la compétitivité est exigée dans une mesure de plus en plus importante, par l'exploitation optimale des moyens humains et matériels de l'entreprise afin de réduire les coûts directs et indirects de la production. Les coûts directs de la production sont ceux relatifs au processus industriel (consommation de la matière première, l'énergie, main d'œuvre, etc.). Cependant, les coûts indirects sont essentiellement le résultat du manque à gagner engendré par un arrêt complet ou partiel de la production d'une part et, d'autre part, un dysfonctionnement peut engendrer une surconsommation, des déchets, ou bien un produit non conforme avec des coûts élevés de maintenance. De plus, la qualité des produits doit être respectée. Les entreprises manufacturières sont soumises à des réglementations sévères concernant les conditions de travail pour les employés et le respect de l'environnement à l'égard des émissions des gaz à effet de serre (GES) et les résidus industriels.

Au Québec, la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNEST) est l'organisme principal responsable de l'application des lois du travail. Elle vise la prise en charge de la santé et de la sécurité par les milieux de travail, tandis que le ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques a pour mission la protection de l'environnement et la conservation de la biodiversité et la lutte contre les changements climatiques selon les accords internationaux signés par le Canada (COP26) [1].

La conservation de l'environnement et la diminution des coûts de production se rejoignent dans le secteur énergétique. Pour cela le Québec a établi une politique énergétique à l'horizon 2030 [2], qui a pour but de :

- Privilégier une économie faible en carbone ;
- Mettre en valeur de façon optimale les ressources énergétiques ;
- Favoriser une consommation responsable ;
- Tirer pleinement parti du potentiel de l'efficacité énergétique ;
- Stimuler la chaîne de l'innovation technologique et sociale.

L'industrie québécoise s'est développée à la faveur d'une énergie accessible et peu coûteuse. Le gouvernement incite les entreprises à faire de nouveaux choix concernant le mode de consommation de l'énergie, l'accès à des technologies éco-efficaces et à des formes d'énergie plus propre et soutient les entreprises ayant des pratiques exemplaires en matière de réduction de GES [3].

Afin de répondre à toutes ces contraintes, les spécialistes voient que la solution est d'adopter une démarche innovatrice qui repose sur les nouvelles technologies telles que l'usine intelligente, 5G (réseau téléphonique mobile de cinquième génération), ERP (progiciel de gestion intégré), l'intelligence artificielle, etc. Parmi les solutions les plus récentes, on cite le concept de l'industrie 4.0 (la quatrième révolution industrielle) qui demeure la solution la plus globale et d'actualité.

Le concept de l'industrie 4.0 correspond à une nouvelle façon d'organiser les moyens de production son objectif est la mise en place d'usines dites intelligentes, capables d'une plus grande adaptabilité dans la production et d'une allocation plus efficace des ressources, pour répondre plus rapidement au marché, de façon plus personnalisée et à moindre coût.

Est-ce que les entreprises québécoises sont prêtes pour cette transition ? En 2017 [4], le CEFRIO (Centre Facilitant la Recherche et l'Innovation dans les Organisations 1987-2020) a été mandaté par le ministère de l'économie et de l'innovation pour mener une enquête auprès des entreprises manufacturières du Québec afin d'examiner la manière dont ces entreprises comptent relever les défis liés à la transformation menant vers l'industrie 4.0. Il

devait aussi évaluer leurs intentions de transformation vers ce nouveau concept pour le futur, l'enquête vise à mesurer l'effet de l'industrie 4.0 sur le développement de leurs marchés et sur les investissements futurs requis. L'enquête visait aussi à cerner les besoins des entreprises concernant le développement des compétences et la mise en place de nouvelles technologies pour permettre la gestion des données nécessaires à l'industrie 4.0.

Ils ont constaté que 50% des entreprises manufacturières du Québec savent que l'industrie 4.0 est une nouvelle révolution industrielle. Cependant, force est de constater qu'il y a encore une assez grande méconnaissance de ce concept, étant donné que près d'une entreprise sur deux n'a pas entendu parler ou ne connaît pas bien le concept. Par ailleurs, le besoin d'information s'ajoute à un besoin de sensibilisation, dans la mesure où moins de la moitié des entreprises estiment qu'elles seront touchées par l'industrie 4.0 au cours des trois prochaines années, surtout les entreprises de moins de 20 employés. Aussi, une minorité d'entreprises affichent de l'intérêt pour les mégadonnées (big data), alors que celles-ci sont un levier important de la transformation 4.0. En matière de maturité technologique, la plupart des entreprises manufacturières sont soit encore gérées avec des processus manufacturiers manuels, soit gérées avec des processus soutenus par plusieurs outils non complètement intégrés. De plus, elles sont encore une minorité à s'être dotées d'un plan ou d'une stratégie numérique en lien avec l'industrie 4.0. Il convient de souligner aussi que les investissements en technologie d'information (TI, en anglais IT) sont relativement faibles (moins de 50 000 \$ investis au cours de la dernière année par la plupart des entreprises), ce qui explique les progrès timides en matière de transformation numérique. La plupart des entreprises voient dans l'industrie 4.0 une occasion d'améliorer leurs processus de production ou de gestion, surtout les entreprises proches de ce concept (entreprises de haute technologie). De plus, une grande partie des entreprises affirment leur intention d'intensifier l'usage du numérique dans leurs processus au cours des trois prochaines années. Par conséquent, on constate que les entreprises manufacturières doivent faire plus d'effort afin de rattraper le retard en matière d'implantation et la mise en marche de l'industrie 4.0 [4].

Notre projet de recherche s'inscrit dans la démarche d'implantation du concept de l'industrie 4.0 dans une entreprise manufacturière au Québec spécialisée dans le domaine de la transformation des dérivées du bois (troisième transformation – fabrication des meubles), spécifiquement pour améliorer l'efficacité énergétique.

Comme il n'existe pas assez d'études dans ce domaine ; on a proposé une démarche qui considère tous les acteurs et qui est basée sur trois paramètres principaux :

- Le premier paramètre est **l'environnement** qui doit être adéquat pour les travailleurs selon les normes et lois en vigueur. C'est ce qu'on appelle le confort thermique ;
- Le deuxième paramètre est de garantir des **conditions d'entreposage** favorables pour la matière première dans le but qu'elle soit conforme aux exigences des différentes transformations, et ;
- Le troisième paramètre est **l'efficacité énergétique**, prévoir une consommation optimale d'énergie afin de réduire les coûts de production et diminuer les rejets des GES.

Les trois paramètres seront gérés simultanément par des concepts et outils de **l'industrie 4.0**.

Nous avons effectué une étude bibliographique exhaustive, des essais en laboratoire, la modélisation et simulation pour finalement appliquer le tout à une étude de cas.

Ce rapport est organisé en sept parties. L'**introduction** générale présente le contexte de notre étude, les motivations, les enjeux techniques et sociaux et les idées primaires pour entamer l'étude, elle montre aussi les différentes étapes de la recherche et du rapport. Le **chapitre 1** couvrira la problématique générale de l'étude d'une façon approfondie avec ses différents aspects comme l'efficacité énergétique, le confort thermique et les conditions d'entreposage de la matière première à base de bois, ainsi que la méthodologie de recherche, la solution proposée qui sera basée sur le concept de l'industrie 4.0 et à la fin, on clarifie

l'objectif de la recherche, la contribution et l'originalité de la thèse. Le **chapitre 2** sera consacré à la revue de littérature, une étape essentielle dans notre étude. D'une part, le concept de l'industrie 4.0 est récent, surtout en lien avec l'efficacité énergétique, et d'autre part, on révisera ce qui a été fait par les autres chercheurs dans le même domaine en mentionnant à la fin du chapitre la publication de ces travaux dans un article de journal. Le **chapitre 3** est dédié à l'étude de l'industrie de bois et de ses dérivées d'un point de vue énergétique, ses particularités et enjeux. Ensuite, on va analyser les différents problèmes liés au taux d'humidité non contrôlé et à la fin, on présentera les solutions existantes actuellement avec leurs avantages et inconvénients. Le **chapitre 4** présentera une étude thermo-hydrigue de deux matériaux à base de bois soumis aux conditions du confort thermique. Cette étude comprend : 1) une synthèse sur les formulations mathématiques et les travaux précédents dans ce contexte précis et les différents modèles existants dans la littérature ; 2) une étude expérimentale dans des conditions de laboratoire ; 3) une modélisation par les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) qui utilise les résultats expérimentaux ; 4) une simulation du transfert de chaleur et d'humidité sous les mêmes conditions ; et 5) une comparaison des résultats entre les différentes méthodes en calculant les erreurs relatives. Les résultats de ce chapitre seront utilisés par la suite dans le **chapitre 5** qui sera dédié à la démarche d'implantation d'une solution 4.0 dans le contexte de l'efficacité énergétique. On terminera par une **Conclusion générale et des perspectives** qui représenteront la synthèse des travaux effectués au cours de cette étude et les points à améliorer ou à développer dans les études ultérieures.

CHAPITRE 1

CADRE GÉNÉRAL DE RECHERCHE

Le rôle principal de l'industrie est de produire des biens en transformant la matière première extraite de la nature en produits pour l'utilisateur. Ces produits doivent respecter des exigences fonctionnelles et de qualité.

Avec le développement rapide de certains pays industrialisés, surtout en Asie, et l'apparition de nouvelles techniques, la concurrence est devenue de plus en plus forte. Les industriels cherchent toujours à diminuer les coûts de production pour rester compétitifs tout en respectant les normes de la qualité et de l'environnement (exemple : les émissions des GES).

Au Canada, l'industrie des meubles compte parmi les industries les plus touchées par ce phénomène. La concurrence asiatique (principalement chinoise) gagne chaque jour de la place au détriment des produits locaux à cause des faibles prix et de leur disponibilité. L'industrie du bois en général et celle des meubles en particulier, bénéficient de beaucoup d'avantages comme la disponibilité de la matière première (bois et dérivées), le coût d'énergie relativement faible par rapport aux autres pays industrialisés et le savoir-faire des entreprises canadiennes.

L'un des axes les plus prometteurs pour diminuer les coûts de production est celui de la consommation énergétique par l'adoption d'une stratégie énergétique efficace, autrement dit, investir dans *l'efficacité énergétique*. Pour cela, les gouvernements fédéral et provincial proposent des programmes pour aider les entreprises à adopter cette vision non seulement pour résister à la concurrence, mais aussi pour diminuer les émissions des GES (exemple : programme Ecoperformance), surtout si cette transition énergétique est combinée à une transition numérique.

La transition numérique décrit la nouvelle ère de l'industrie connue sous le nom de *l'Industrie 4.0*. C'est la nouvelle révolution industrielle là où les différents acteurs sont liés entre eux par des réseaux non câblés, l'information circule en temps réel et la prise de décision est assistée par des algorithmes d'intelligence artificielle.

1.1 PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE

Notre étude traite le cas de l'industrie des meubles (la troisième transformation du bois). Comme d'autres industries, les défis de l'industrie des meubles se divisent en deux principaux axes, le premier concerne la matière première et la gestion de sa qualité, et le deuxième concerne la gestion efficace de l'énergie.

1.1.1 Problématique liée à la matière première

Lors de la transformation de la matière première à la base du bois (mélamine, MDF, etc.) pour fabriquer des meubles, on a remarqué, dans certaines conditions, une apparition de défauts qui diminuent la qualité du produit final. Ces événements requièrent des mesures correctives commençant par la rectification manuelle et allant jusqu'au rejet des pièces. Ceci provoque des pertes colossales en termes d'argent et de temps. De plus, si un produit final non conforme est livré, l'image de la marque sera touchée.

Les principaux défauts qui influencent la qualité finale du produit sont [5] (Figure 1):

- 1) Mauvais équerrage : le respect des tolérances dimensionnelles est très important dans les normes de qualité des produits de l'industrie des meubles. Toutefois, si le panneau de départ est déformé, les morceaux découpés peuvent avoir des dimensions différentes ou des angles non droits, ce qui rend leur assemblage avec un jeu, serré ou carrément impossible.
- 2) Déformation (flèche) : dans tous les produits dérivés du bois, le séchage non contrôlé provoque des contraintes résiduelles qui conduisent à des déformations considérables. La plus connue dans les panneaux à base de bois est la flèche.

- 3) Écaillage : le contact outil-matière représente un phénomène physique complexe d'un point de vue mécanique et thermique, particulièrement dans les produits dérivés du bois, à cause de la microstructure et de la macrostructure du bois. Ceci implique une révision des paramètres d'usinage. Sous certaines conditions comme la teneur en humidité, des particules de bois peuvent se détacher en créant un petit vide appelé l'écaillage. L'écaillage est la séparation d'une particule de bois non par découpe, mais par arrachement du liant, ce qui provoque un vide visible et une mauvaise qualité.
- 4) Mauvaise rugosité : en technique d'usinage, la rugosité est l'un des paramètres les plus importants qui définissent les conditions d'usinage (vitesse de coupe, vitesse d'avance, angle d'attaque, etc.). De plus, l'usinage des produits à base de bois doit considérer des paramètres supplémentaires comme la teneur en humidité.



1) Mauvais équerrage



2) Flèche



3) Écaillage



4) Mauvaise rugosité

Figure 1. Les défauts de fabrication dans l'industrie des meubles (Source CANBOARD).

En général; les défauts de fabrication (coupe et usinage) dépendent des facteurs suivants [5]:

1) Facteur machine : ces défauts sont causés par les vibrations de la machine (mouvements des actionneurs comme les moteurs et les vérins), l'outil de coupe (géométrie, usure, matériau de l'outil), la précision (la différence entre les valeurs introduites et les valeurs réelles) et la technologie utilisée (caractéristiques et capacité de la machine, conditions de coupe et paramétrage de la machine).

2) Facteur matériau : en premier lieu sa nature. Dans l'industrie de l'ameublement, on utilise différents matériaux à la base du bois (MDF, contre-plaqué, panneaux de particules, etc.), homogénéité (impureté) et géométrie (dimension et courbure).

3) Facteur humain : qui est considéré comme le facteur le plus difficile à gérer, car il n'est pas soumis à une loi ou des formules définies. Il s'agit de l'état d'esprit, la fatigue et la qualification de l'opérateur.

4) Facteur environnement : c'est tout ce qui concerne les conditions environnementales d'entreposage à savoir la température et l'humidité comme les deux facteurs les plus dominants, et d'autres facteurs moins influents comme le vent et le rayonnement.

Le diagramme cause-effet, autrement dit, diagramme d'ISHIKAWA ou bien l'arête de poisson, schématise le phénomène des défauts de fabrication et leur cause (Figure 2) [6].

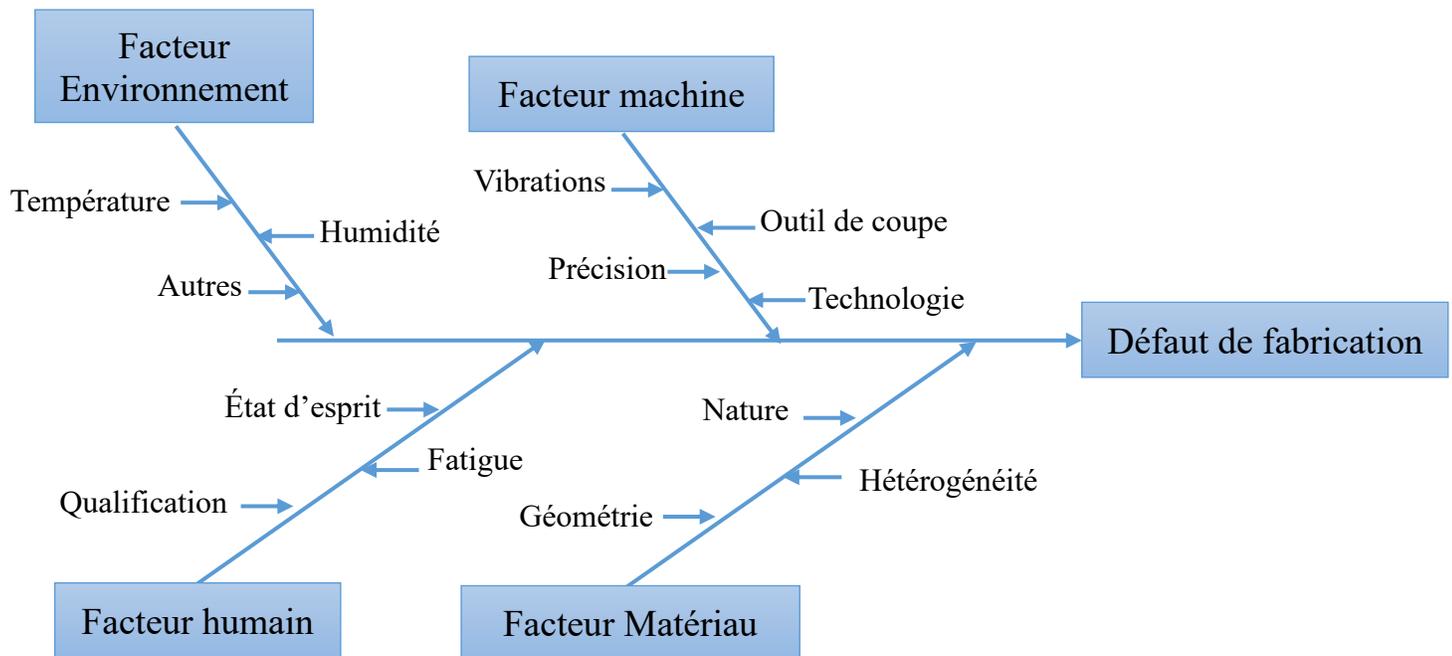


Figure 2. Diagramme cause-effet des défauts de fabrication des meubles.

Choix des facteurs

Le choix des conditions de coupe est un facteur très important dans la qualité finale, mais son classement n'est pas évident, car il est commun entre deux classes, dans le facteur de la machine (technologie) et facteur humain (qualification). De plus, beaucoup d'études ont abordé le facteur machine sous différents angles ainsi que le facteur humain qui sort du domaine technique. Dans notre étude, on va se concentrer sur le facteur environnement et son influence sur le facteur matériau.

1.1.2 Problématique liée à la gestion de l'énergie

Bien que la gestion de l'énergie ait fait des progrès considérables ces dernières années surtout avec le développement de l'électronique, les capteurs, l'informatique et les automates programmables, il existe toujours des entreprises manufacturières dans le domaine de la transformation des produits du bois, surtout la troisième transformation, dont la gestion de l'énergie se fait de façon traditionnelle. Ce retard dans la transition vers une gestion plus développée et plus transparente rend ces entreprises moins compétitives et vulnérables aux fluctuations des marchés locaux et mondiaux.

Dans le cadre de notre étude, on a eu l'occasion de visiter quelques usines dans la région du Bas-Saint-Laurent pour faire un constat sur les problèmes et les défis de ces entreprises dans le domaine énergétique, et proposer des solutions afin d'augmenter l'efficacité énergétique des installations et rendre ces entreprises plus compétitives. Nos premières constatations montrent que les installations sont rendues très vieilles, leur rendement est faible et leur maintenance est très coûteuse. De plus, la plupart des entreprises ne possèdent pas assez d'informations sur les nouvelles technologies (exemple industrie 4.0) et surtout manquent d'un plan de développement clair.

Prenons l'exemple d'une entreprise qui se situe au Bas-Saint-Laurent dans la ville de Mont-Joli. Cette entreprise nommée CANBOARD était une filiale de Fabritec spécialisée dans la fabrication d'armoires de cuisine aux détaillants, promoteurs immobiliers et commerces avec une clientèle un peu partout en Amérique du Nord. Maintenant cette filiale est dissoute et la bâtisse est vendue. Un bilan qualitatif énergétique nous a permis de définir et localiser les différentes sources et pertes d'énergie sous forme de chaleur. Le chauffage constitue un paramètre important dans ce genre d'entreprise pour le personnel et les produits à base de bois en lien avec les conditions météorologiques de la région.

Le Tableau 1 définit les différentes sources de chaleur et la façon de les commander, les images montrent une grande dissemblance entre le volume des sources, leurs commandes et la taille de l'atelier.

Tableau 1

Sources et commandes de chaleur dans une usine de transformation du bois (CANBOARD)

Source	Commande	Explication
		<p>L'atelier contient six chauffages à gaz de propane commandés par un thermostat pendant les quarts de travail et fermé manuellement hors des quarts de travail.</p>
		<p>Le dépoussiéreur récupère la poussière rejetée par les différentes machines lors des opérations de coupe ou d'usinage pour la stocker dans le cyclone, ensuite récupérer l'air chaud de cette poussière pour l'introduire dans l'atelier afin de compenser le chauffage à gaz. Cette opération est commandée manuellement à l'aide d'un levier qui fait ouvrir ou fermer une trappe ; quand la trappe est fermée l'air rentre dans l'atelier et quand elle est ouverte l'air est rejeté dehors</p>
		
<p>Récupérateur de chaleur</p>	<p>Trappe de dépoussiéreur</p>	



Compresseur



Fenêtre d'entrée d'air

Le compresseur en marche engendre une quantité importante d'air chaud qui sera acheminé complètement ou partiellement à l'extérieur, une quantité d'air chaud peut être utilisée pour le chauffage en ouvrant une fenêtre manuellement.



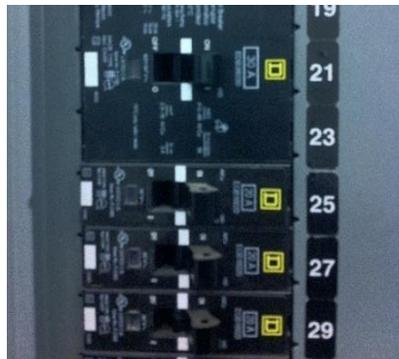
Les machines

Non commandé

Les machines dégagent de la chaleur, cette chaleur dépend de la taille, de la technologie et de l'âge de chaque machine, c'est pourquoi la quantification exacte de cette chaleur est quasi-impossible.



Éclairage



Commande manuelle

Le rôle principal des lampes est d'éclaircir l'atelier mais leur effet secondaire est d'augmenter la température dans l'atelier.

Chaleur humaine

Non contrôlée

L'activité humaine dégage une chaleur qui dépend du nombre d'employés et l'espace de travail. Cette chaleur ne peut pas être contrôlée.

L'inadéquation entre les sources de chaleur et la taille de l'atelier engendre des pertes de chaleur assez importantes. Dans la même bâtisse de CANBOARD, il existe des endroits critiques pour le transfert de la chaleur avec l'extérieur comme l'aire d'entreposage, les portes de réception et de livraison et les accès dans l'usine. Le Tableau 2 montre ces principaux endroits.

Tableau 2

Différents endroits critiques pour la conservation de la chaleur (CANBOARD)



Aire de stockage



Porte de réception



Atelier de maintenance



Porte de Sortie

1.1.3 Analyse globale de la problématique

L'analyse globale de la problématique sous ses différents angles nous amène à chercher l'interaction entre l'environnement thermique du travail, l'entreposage de la matière première et la gestion énergétique, ce qui signifie que la problématique générale de l'étude peut être détaillée selon trois aspects :

Le premier aspect est l'environnement de travail ou bien le confort thermique. La plupart des ateliers qui fabriquent les meubles ont une aire commune qui regroupe les aires d'entreposage, d'expédition et de transformation, où se trouvent les machines et les opérateurs. Alors, les conditions d'environnement doivent respecter la législation en vigueur établie par l'organisme responsable (CNESST) et en même temps assurer un environnement d'entreposage favorable pour les panneaux à base de bois.

Le deuxième aspect présente l'influence de l'environnement sur la matière première. La température et l'humidité relative de l'air influent directement sur la teneur en humidité des panneaux à base de bois. La teneur en humidité (TH) est une condition primordiale dans la transformation des panneaux à base de bois, elle doit être comprise entre 8% et 12% selon la norme ASTM D 1666-87 [7] sinon on aura les défauts expliqués auparavant. D'après l'association des panneaux composites (Composite Panel Association - CPA) « les panneaux à base de bois doivent être entreposés entre 1 à 2 semaines dans des conditions de température égale à 21 °C et une humidité relative de l'air entre 35% et 45% avant toute transformation » [8]. En pratique, cette recommandation n'est pas toujours réalisable, car c'est difficile de maintenir l'environnement à une condition fixe en permanence.

Le troisième aspect est d'assurer une consommation minimale de l'énergie par l'adoption d'une stratégie basée sur l'efficacité énergétique.

La mise en œuvre de ces trois aspects sera assurée par le concept de *l'industrie 4.0*.

1.2 ÉTAT DE L'ART

La plupart des études sur le bois et ses dérivées ont abordé le phénomène purement physique (exemple : les travaux de Y. Fortin, A. Cloutier et A. Laghdir) [9]. Moins d'études ont abordé les sujets de l'efficacité énergétique en industrie du bois surtout lors de l'opération de séchage [10] et seulement quelques études ont abordé le concept de l'industrie 4.0 et de l'industrie du bois. Ceci signifie que l'axe de recherche sur la combinaison de l'efficacité énergétique, l'industrie 4.0 et l'industrie du bois constitue un champ de recherche peu exploré.

Dans le chapitre 2, on traitera ce sujet sous forme d'une revue de la littérature. Après une recherche approfondie dans les bases de données les plus courantes, la première constatation indique que le nombre d'études est insuffisant pour décrire le concept qui combine l'efficacité énergétique, l'industrie 4.0 et l'industrie du bois. En conséquence, on a décidé d'élargir le champ de recherche en incluant d'autres termes et industries.

1.3 SOLUTION PROPOSEE

En se basant sur le concept de l'industrie 4.0, nous prévoyons de construire un modèle qui englobe trois principes :

- Déterminer les conditions optimales d'entreposage de la matière première afin de garantir une teneur en humidité admissible à la transformation ;
- Assurer un environnement favorable pour les employés en matière de confort thermique ;
- Optimiser la consommation énergétique et augmenter l'efficacité énergétique.

Ce modèle utilise les outils de l'industrie 4.0 afin d'assurer cette combinaison entre ces points (Figure 3).

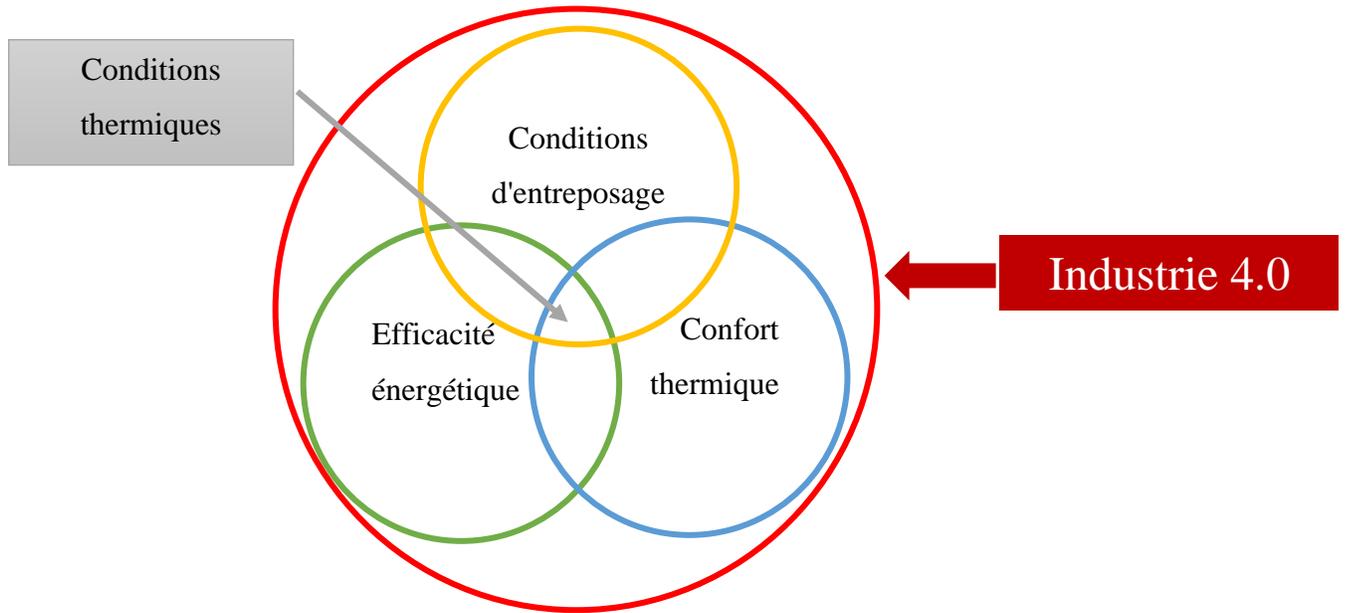


Figure 3. Illustration générale de la solution proposée.

1.4 METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Afin d'aboutir aux résultats désirés, nous avons adopté une méthodologie qui consiste en premier lieu à comprendre et définir le cadre de l'étude. L'étude théorique commence par une recherche bibliographique sur le concept de l'industrie 4.0 et ses interactions avec l'efficacité énergétique, l'industrie du bois et l'industrie en général. Ensuite, on étudie la matière première, ses particularités et ses exigences, pour se focaliser par la suite sur l'aspect énergétique dans l'industrie du bois.

Le côté pratique de notre étude contient deux parties. La première partie est une étude approfondie des deux matériaux les plus utilisés dans la troisième transformation, à savoir la mélamine et le MDF. Cette étude met en évidence le comportement thermo-hydrique de ces deux matériaux sous les conditions de confort thermique, elle comprend quatre volets : formulation mathématique, simulation, étude expérimentale, et modélisation par les RNA. À la fin on compare les différents résultats. La deuxième partie concerne l'étude de cas où on procède à l'application des notions de l'industrie 4.0 et les résultats obtenus auparavant sur

un modèle réduit (atelier de laboratoire) qui contient les éléments essentiels d'un atelier de transformation du bois. Ensuite, on compare la consommation d'énergie sous forme de chauffage avec et sans l'application de la solution 4.0 pour montrer l'intérêt d'utiliser le concept de l'industrie 4.0. Finalement, on termine par une conclusion et des perspectives pour les prochains projets de recherches.

Chacun de ces chapitres fera l'objet d'un article de journal.

1.4.1 Planification des étapes

Les étapes sont organisées comme suit :

Étape 1 : définition du cadre de la recherche en procédant par une étude bibliographique approfondie qui commence par éclaircir les notions indispensables, l'interaction entre ces notions, l'analyse exhaustive des publications en lien avec notre étude et, à la fin, donner des exemples des autres industries utilisant les mêmes notions.

Étape 2 : étude du comportement thermo-hydrique des matériaux à base de bois utilisés lors de notre recherche (mélamine et MDF) sous les conditions spécifiques dites « *confort thermique* ». Ces conditions sont convenables pour les humains. Cette étape est constituée de quatre points :

- Formulation mathématique.
- Simulation du phénomène de transfert de chaleur et humidité.
- Étude expérimentale
- Modélisation par les réseaux de neurones artificiels (RNA).
- Comparaison des résultats.

Étape 3 : mise en place de la solution 4.0. Cette dernière étape consiste à regrouper les résultats théoriques et expérimentaux, les notions de l'industrie 4.0 pour construire un modèle

fiable qui gère le flux énergétique et rendre la consommation plus efficace tout en respectant les exigences du confort thermique et la qualité des matériaux.

1.4.2 Planification des publications

Selon l'organisation des étapes ; les publications sont organisées comme suit :

Publication 1 : le premier article est une revue de littérature qui comprend les notions indispensables et les derniers travaux en lien avec notre étude. Cet article, intitulé «Energy Efficiency and Industry 4.0 in Wood Industry: A Review and Comparison to Other Industries,» a été publié dans le journal *MDPI-Energies*, 2022, Volume 15, 2384. doi.org/10.3390/en15072384.

Publication 2 : le deuxième article est une étude expérimentale suivie par une modélisation par RNA. L'objectif est d'étudier expérimentalement le comportement des matériaux utilisés dans notre étude en conditions de confort thermique, puis construire un modèle par RNA. Ce modèle permettra de prédire le comportement des matériaux dans n'importe quelle condition du confort thermique. Cet article est intitulé: « Predicting the thermo-hydric behavior of wood-based materials under thermal comfort conditions using experimental data and Artificial Neuronal Network, » et sera soumis prochainement.

Publication 3 : Le troisième article a pour but d'étudier le comportement thermo-hydrique, mais d'un point de vue modélisation. Alors, on développe un modèle approprié à notre cas et on l'utilise pour la simulation. Les résultats de la simulation sont comparés avec les résultats du deuxième article. Le troisième article est intitulé : « A simplified model to simulate the thermo-hydric behavior of wood-based materials under thermal comfort conditions, » et sera soumis prochainement.

1.5 OBJECTIFS, CONTRIBUTIONS ET ORIGINALITE DE LA RECHERCHE

L'objectif principal de la thèse est de répondre à la question suivante : comment l'industrie 4.0 peut-elle intervenir dans le domaine de l'industrie du bois pour améliorer l'efficacité énergétique ?

Pour répondre, il faut d'abord décortiquer la question pour en comprendre le sens. Les questions qui viennent à l'esprit sont :

- 1) Quelles sont les particularités de l'industrie du bois ?
- 2) Comment l'industrie 4.0 peut-elle améliorer l'efficacité énergétique dans l'industrie du bois ?
- 3) Quel est le cheminement à prendre pour appliquer les concepts de l'industrie 4.0 à l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'industrie du bois ?

Les réponses à ces questions constituent la principale *contribution* de notre thèse. D'une façon générale, ce travail représente une feuille de route pour les entreprises manufacturières qui veulent rattraper le retard vers une transition énergétique (efficacité énergétique) et une transition numérique (industrie 4.0). Contrairement aux travaux précédents, cette thèse met l'accent sur les étapes à suivre pour se doter d'une solution énergétique basée sur les concepts de l'industrie 4.0.

Dans notre recherche, on commence par comprendre les particularités de l'industrie choisie qui est l'industrie des meubles (matière première, sources de chaleur, exigences de la qualité) ainsi que les différentes façons dont l'industrie 4.0 peut agir. Ensuite, nous consolidons cette compréhension par des outils de modélisation et simulation. On a proposé un cheminement pour réaliser une implémentation fiable de l'industrie 4.0 dans une entreprise manufacturière concernant le volet énergétique en prenant un cas similaire d'un atelier de transformation du bois.

L'originalité de la thèse vient du fait que le concept de l'industrie 4.0 est un concept relativement récent, les études ne sont pas nombreuses surtout dans le domaine de l'efficacité énergétique. De plus, l'industrie du bois et de ses dérivés est moins abordée que les autres industries, alors cet axe de recherche est un axe très prometteur et inexploité.

Pour cela, on a essayé de se référer aux autres axes de recherche comme l'utilisation de l'industrie 4.0 en maintenance (capteurs intelligents, infonuagique, traitement de données), en production (Energy Management 4.0), en gestion de la qualité (la qualité dans l'industrie du bois), en physique des matériaux (transfert thermique, milieux poreux), en informatique et automatisation (programmation). La fusion de ces axes nous a permis d'élaborer une stratégie de recherche, de comprendre le comportement des matériaux à base de bois sous certaines conditions, et le plus important est d'établir pour la première fois une étude structurée et exhaustive sur l'implantation du concept de l'industrie 4.0 dans le domaine de l'efficacité énergétique selon les objectifs tracés.

Le diagramme de la Figure 4 montre les grandes lignes de notre étude et le principe de chaque chapitre ainsi que les liens entre les différentes notions abordées.

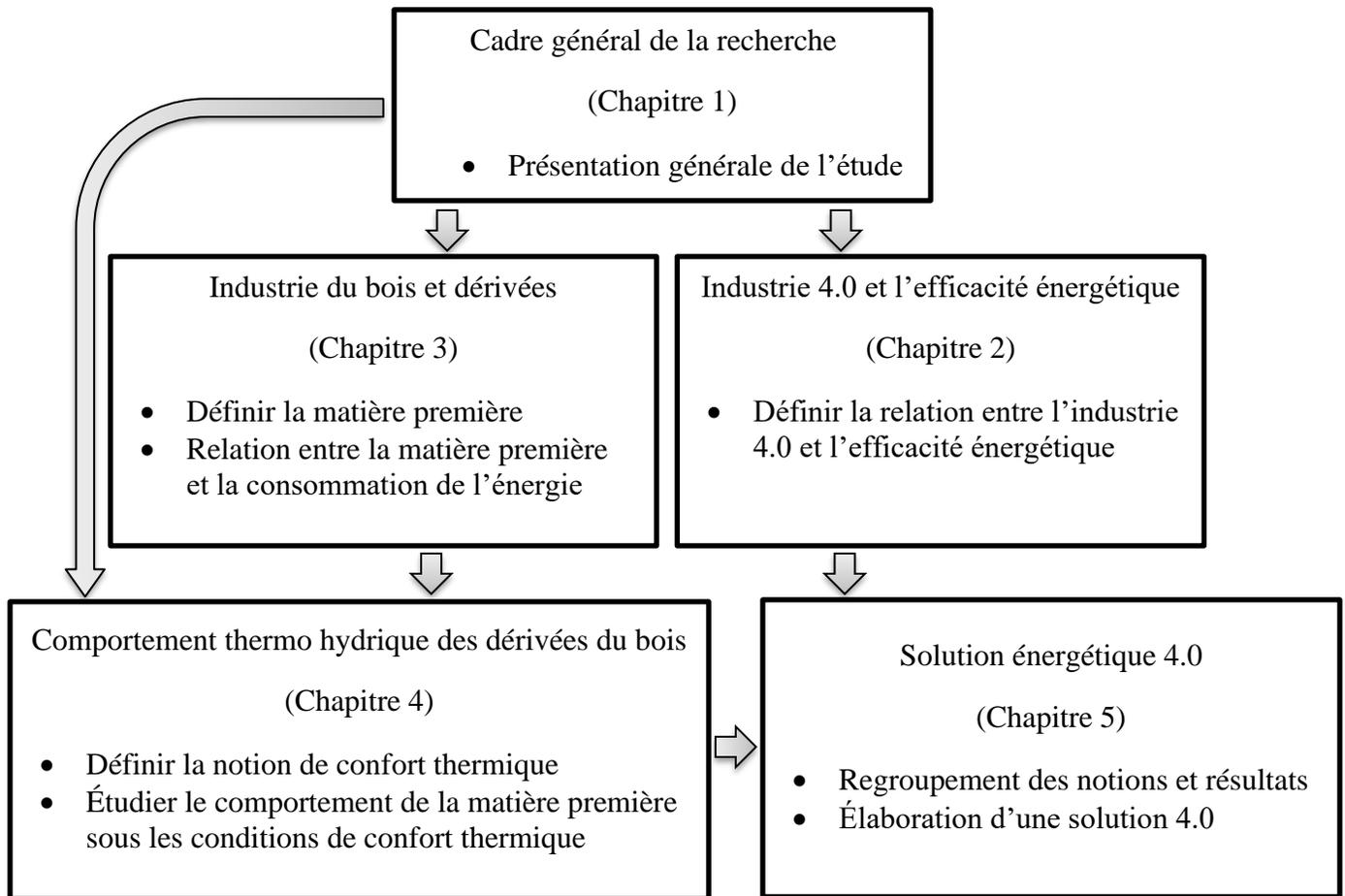


Figure 4. Illustration générale de la solution proposée.

CHAPITRE 2

INDUSTRIE 4.0 ET L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Ce chapitre est une revue de littérature essentielle pour notre étude. Elle consiste à définir et éclaircir les termes et les notions utilisés, ainsi qu'à mettre l'accent sur les travaux de recherche précédents afin de déterminer la démarche adéquate. Dans notre cas, la revue de littérature est vaste. Elle ne contient pas seulement les définitions séparées de l'industrie 4.0, l'efficacité énergétique et l'industrie du bois, mais aussi les liens entre ces notions.

2.1 INDUSTRIE 4.0

2.1.1 Historique

Dans la littérature, il existe de nombreuses définitions de l'industrie 4.0. Elle a été initialement présentée lors de la foire de Hanovre en 2011. Ensuite elle a été officiellement annoncée en 2013 comme une initiative stratégique allemande visant à jouer un rôle de pionnier dans les industries qui révolutionnent actuellement le secteur manufacturier [11].

L'expression "Industrie 4.0" désigne la prochaine révolution industrielle dont nous vivons sa naissance aujourd'hui. Cette révolution industrielle a été précédée par trois autres révolutions industrielles dans l'histoire de l'humanité. La première révolution industrielle a été l'introduction de moyens de production mécaniques (machine à vapeur) à partir de la seconde moitié du 18^e siècle, qui s'est intensifiée tout au long du 19^e siècle. À partir des années 1870, l'électrification et la division du travail (le taylorisme) ont conduit à la deuxième révolution industrielle. La troisième révolution industrielle, également appelée "révolution numérique", s'est mise en place vers les années 1970, lorsque les progrès de l'électronique et de l'informatique ont permis de développer davantage l'automatisation (API - Automate Programmable Industriel) des processus de production [12] [13] (Figure 5).

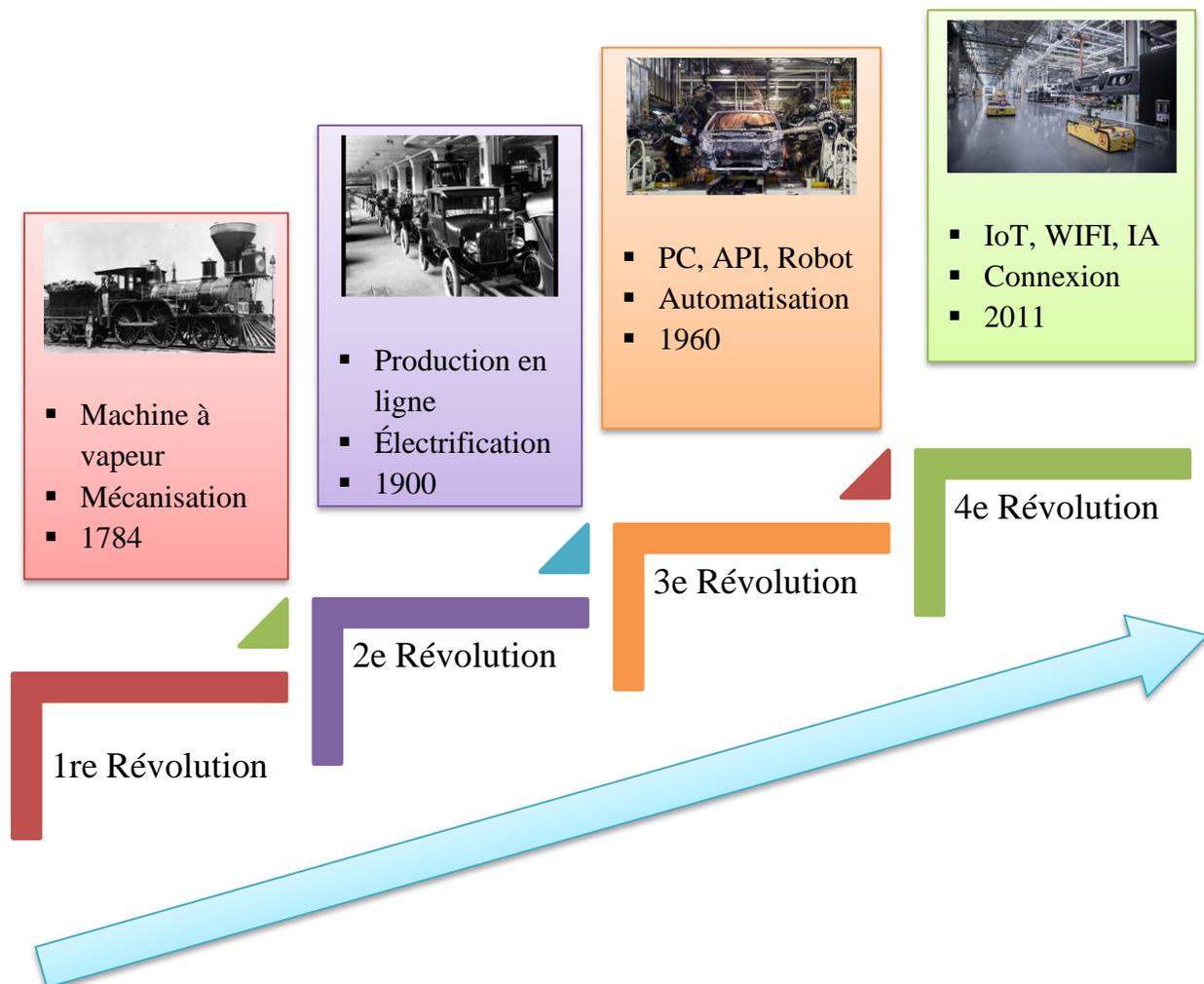


Figure 5. Les quatre révolutions industrielles.

Cependant, la quatrième révolution industrielle, communément appelée industrie 4.0, ne concerne pas seulement l'industrie, il s'agit d'une transformation globale utilisant l'intégration numérique et l'ingénierie intelligente. Elle est considérée comme le prochain niveau de fabrication où les machines se redéfiniront elles-mêmes dans leur façon de communiquer et d'exécuter des fonctions individuelles [12, 14].

2.1.2 Principe et composantes

2.1.2.1 Principe

Le monde est de plus en plus connecté et les besoins des clients sont de plus en plus exigeants et dynamiques [15]. L'arrivée sur le marché d'un nombre croissant de produits intelligents et connectés modifia l'industrie et la structure de la concurrence [16], alors l'industrie 4.0 se concentre sur la création de produits, de procédures et de processus intelligents. Les usines intelligentes constituent une caractéristique clé de l'industrie 4.0 [17]. C'est pourquoi elle combine des capteurs intelligents, l'intelligence artificielle et l'analyse des données pour optimiser la fabrication en temps réel [11] (Figure 6).

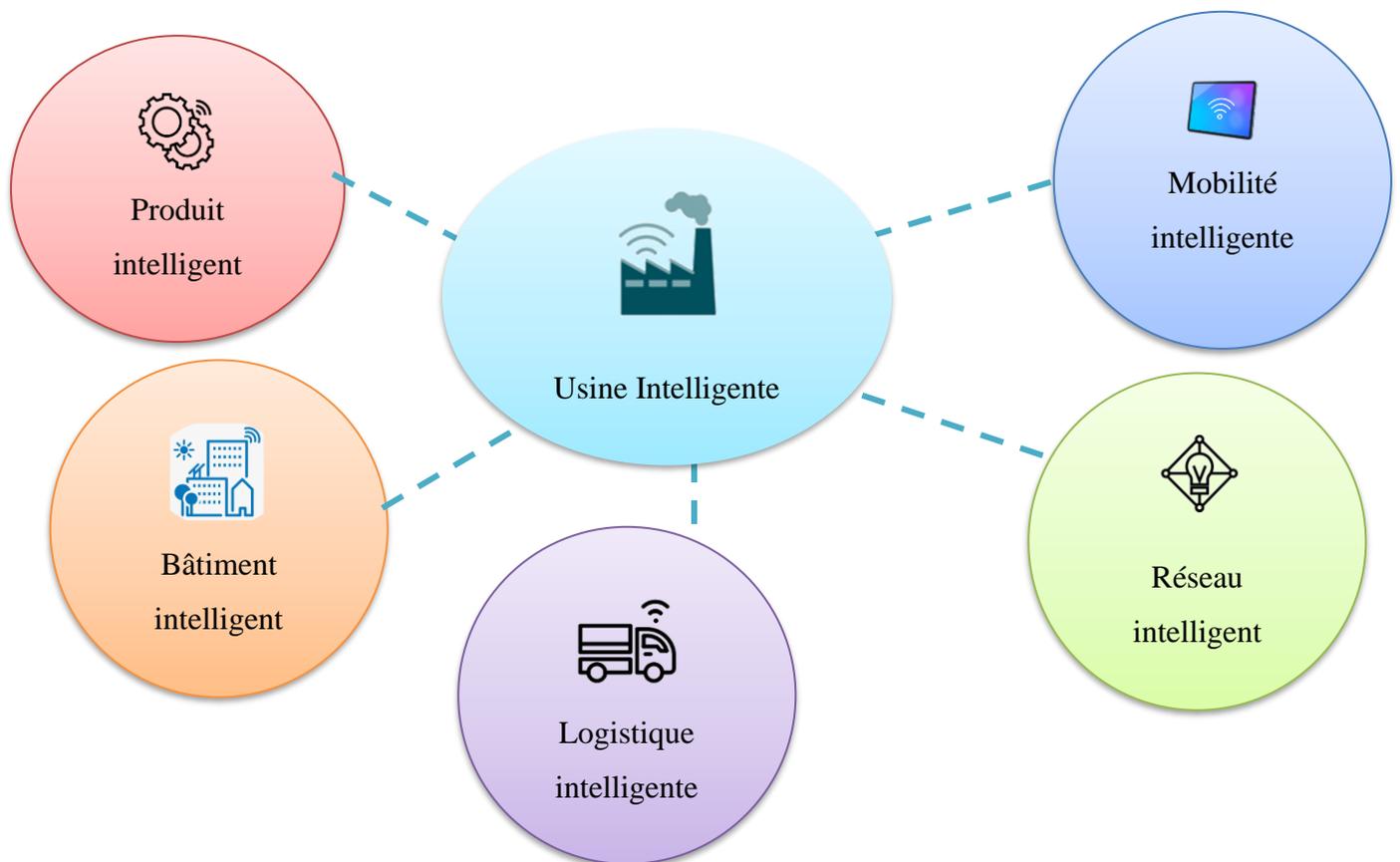


Figure 6. Industrie 4.0 et l'usine intelligente [18].

2.1.2.2 Composants

L'industrie 4.0 repose sur neuf piliers [19, 20] :

1) Internet des objets (IdO) : « Internet of Things (IoT) »

Le concept d'internet industriel a été évoqué en Amérique du Nord par la société General Electric fin 2012. Il est considéré comme une intégration étroite du monde physique et numérique qui associe l'analyse des mégadonnées (big data) à l'internet des objets. Le concept suppose un domaine d'application beaucoup plus large que l'industrie 4.0 et couvre la production et la distribution d'électricité, les soins de santé, la fabrication, le secteur public, le transport et l'exploitation minière [21-23]. L'un des piliers de l'industrie 4.0 est l'utilisation extensive d'internet, non seulement comme un canal peu coûteux pour connecter des machines, des dispositifs, des capteurs et des personnes, mais aussi comme un moyen de créer de nouvelles fonctions et caractéristiques de produits liées à la capacité d'utiliser l'internet comme source d'information [24]. L'une des définitions les plus simples de l'internet des objets est qu'il s'agit d'un réseau mondial d'objets interconnectés et adressés de manière uniforme qui communiquent via des protocoles standards [20, 25, 26].

2) Systèmes cyber physiques (SCP) : « Cyber Physical Systems (CPS) »

Les systèmes cyber physiques (SCP) sont définis comme des technologies transformatrices permettant de gérer des systèmes interconnectés entre leurs actifs physiques et leurs capacités informatiques [27, 28]. Les SCP sont des systèmes d'ingénierie complexes qui intègrent des processus physiques, de calcul, de mise en réseau et de communication. Les SCP peuvent être illustrés comme un dispositif, un objet ou un équipement physique qui est traduit dans le cyberspace sous forme de modèle virtuel. Grâce aux capacités de mise en réseau, le modèle virtuel peut surveiller et contrôler son aspect physique, tandis que l'aspect physique envoie des données pour mettre à jour son modèle virtuel. Compte tenu de l'importance de ce sujet, les systèmes cyber physiques ont été désignés comme une priorité nationale de recherche par les États-Unis [28, 29] et le Conseil européen de la recherche [30].

3) Réalité Augmentée (RA) : « Augmented Reality (AR) »

La réalité augmentée (RA) implique un ensemble de technologies qui utilisent un appareil électronique pour visualiser, directement ou indirectement, un environnement physique du monde réel combiné à des éléments virtuels [31]. Les systèmes basés sur la réalité augmentée prennent en charge une variété de services, tels que la sélection de pièces dans un entrepôt et l'envoi d'instructions de réparation sur des appareils mobiles. L'industrie peut utiliser la réalité augmentée pour fournir aux travailleurs des informations en temps réel afin d'améliorer la prise de décision et les procédures de travail [19, 20].

4) Mégadonnées et analytiques : « Big Data and Analytics »

L'utilisation croissante de capteurs et de machines en réseau a entraîné la génération continue de données complexes, à haut volume et à grande vitesse, également connues sous le nom de Big Data (en français, mégadonnées) [32, 33]. La collecte et l'évaluation complète de données provenant de nombreuses sources différentes, d'équipements et de systèmes de production, ainsi que de systèmes de gestion des entreprises et des clients, deviendront la norme pour soutenir la prise de décision en temps réel [19, 20]. Par conséquent, l'analyse des données devient plus importante pour les usines en raison de ces développements rapides dans le domaine des données [33]. Dans le cas des grands volumes de données, l'intelligence artificielle (IA) permet de déléguer des tâches difficiles de reconnaissance des formes, d'apprentissage et autres à des approches informatiques [34]. D'autre part, la manipulation d'un grand volume de données est risquée pour la sécurité et la confidentialité. La priorité est d'assurer la préservation de ces données, d'où la technologie blockchain qui convient aux applications de l'industrie 4.0. La technologie blockchain permet des transactions de données de type pair à pair (P2P) d'une manière pseudo-anonyme, sécurisée et non-centralisée [35].

5) Simulation

La simulation est un outil nécessaire et économique avant de réaliser un nouveau projet ou dans l'amélioration d'un produit et/ou d'un procédé existant [36] [37]. Elle permet au monde physique de se projeter dans un modèle virtuel, y compris l'usine, les machines, les

produits et humains [19] [20]. La simulation peut être une bonne solution dans le domaine de l'énergie pour déterminer le débit d'air, les transferts de chaleur, la température, etc., en particulier dans les zones étroites, où la mise en œuvre de capteurs n'est pas facile, ou pour prédire des phénomènes physiques dans le cas de risques élevés.

6) Intégration du système : « System Integration » (Intégration horizontale et verticale du système)

L'intégration et l'auto-optimisation sont les principaux mécanismes utilisés dans l'organisation industrielle [38]. L'intégration numérique et l'automatisation des processus de fabrication dans les dimensions verticale et horizontale impliquent une automatisation de la communication et de la coopération, en particulier le long de processus standardisés et partiellement autonomes qui nécessitent des interventions manuelles minimales [39, 40].

7) Informatique : « Cloud computing »

L'Institut national des normes et de la technologie (The National Institute of Standards and Technology (NIST)) définit le cloud computing comme "un modèle permettant un accès réseau pratique et à la demande à un bassin partagé de ressources informatiques configurables (par exemple, réseaux, serveurs, stockage, applications et services) qui peuvent être rapidement approvisionnées et libérées avec un minimum d'efforts de gestion ou d'interaction avec les fournisseurs de services" [41, 42]. Dans l'industrie 4.0, la « Production numérique » est un concept qui consiste à avoir les connexions de différents appareils au même nuage pour partager des informations les unes avec les autres et peut être étendu à un ensemble de machines d'un atelier ainsi qu'à l'usine entière [20, 43].

8) Fabrication additive : « Additive Manufacturing »

La fabrication additive est utilisée pour produire de petits lots de produits personnalisés qui offrent des avantages en matière de construction. Les systèmes de fabrication additive décentralisés réduiront les distances de transport et les stocks disponibles [19, 20]. La production devrait être plus rapide et moins chère, et la réalisation économique de systèmes de production hybrides combine la fabrication additive et des processus de fabrication bien

établis [20, 44]. Le but de la fabrication additive est de créer des prototypes et des produits ayant une géométrie complexe [45].

9) Robots autonomes : « Autonomous Robots »

Aujourd'hui, les robots ne sont pas seulement utilisés pour des emplois très répétitifs et peu qualifiés, mais aussi pour des activités moyennement qualifiées et très routinières [45]. Avec le développement des concepts du M2M (Machine to Machine) et H2M (Human to Machine), les robots sont de plus en plus autonomes, flexibles et coopératifs [19, 20]. Dans l'industrie 4.0, les robots peuvent percevoir et agir, et peut-être même raisonner, dans un avenir prévisible [46]. L'utilisation de robots autonomes améliore considérablement la productivité grâce à des capteurs intelligents, à la dextérité et à une intelligence artificielle et un apprentissage automatique (machine learning) [47].

2.2 EFFICACITE ENERGETIQUE ET L'INDUSTRIE 4.0

2.2.1 Efficacité énergétique en industrie

Selon le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, l'efficacité énergétique se définit par " Faire la meilleure utilisation possible de l'énergie disponible pour obtenir un meilleur rendement énergétique. Elle est améliorée lorsque moins d'énergie est utilisée pour produire le même bien ou service "[3].

En général, l'efficacité énergétique est surtout orientée vers la technologie. Il s'agit d'utiliser la meilleure technologie ou les meilleurs contrôles pour réduire la consommation d'énergie (par exemple, les brûleurs régénératifs, les fours de fusion à cheminée, les unités de production combinée de chaleur et d'électricité, l'éclairage D.E.L.). Cela rend les opérations compétitives et économiquement durables. Les objectifs de durabilité de l'entreprise doivent inclure la gestion de l'énergie [48]. La gestion de l'énergie est un processus continu qui comprend la surveillance de la performance énergétique et la recherche constante de moyens d'améliorer et de maintenir cette performance [49]. Son objectif est

d'organiser l'outil industriel pour intégrer l'efficacité énergétique dans leurs pratiques de gestion [50].

Dans l'industrie, les potentiels d'amélioration de l'efficacité énergétique et les possibilités d'économies d'énergie et de réduction des émissions se manifestent dans les industries à forte consommation d'énergie (par exemple, le fer et l'acier, les produits chimiques, le raffinage du pétrole, le ciment, l'aluminium, les pâtes et papiers), ainsi que dans certaines industries légères (par exemple, la transformation des aliments, les textiles, les produits du bois, l'impression et l'édition, la transformation des métaux) (Figure 7) [51].

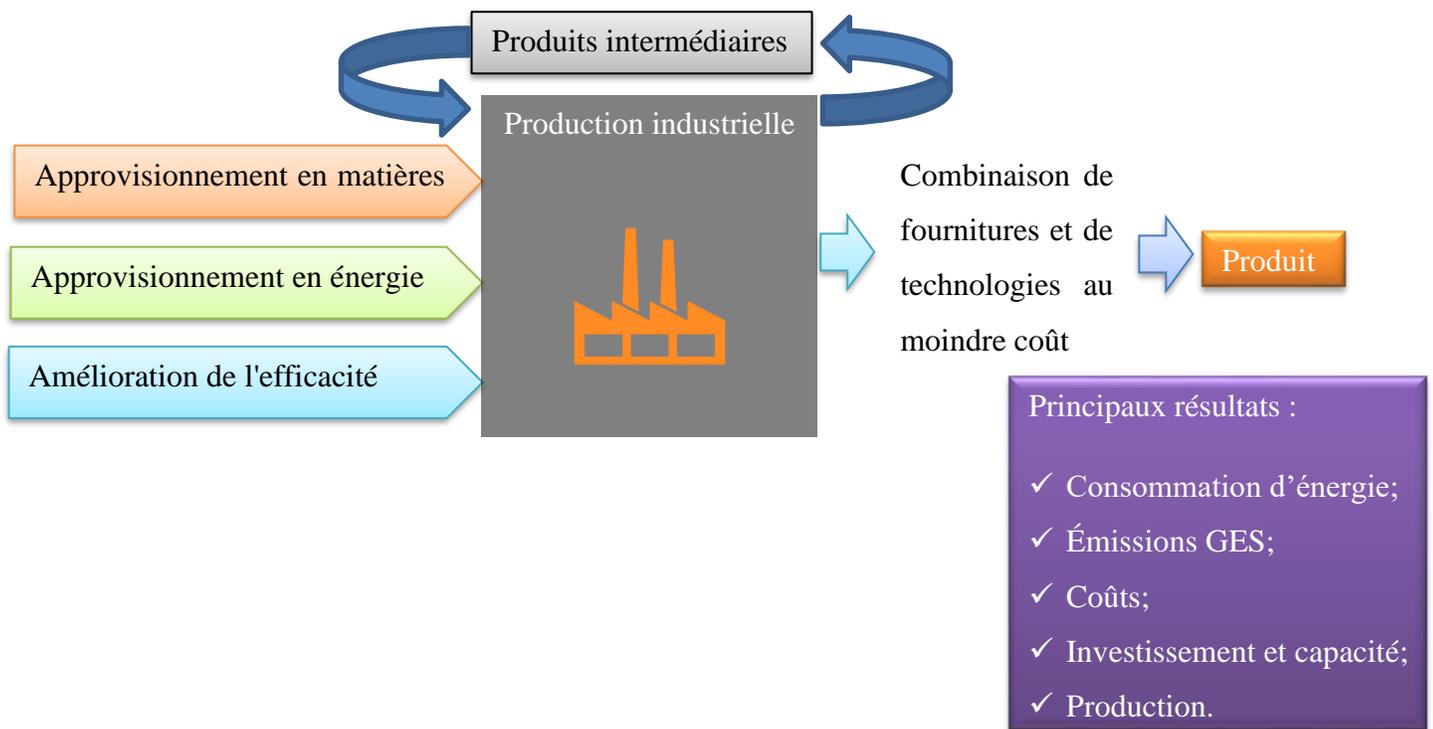


Figure 7. Structure de base de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel.

Mathématiquement, l'efficacité énergétique est un rapport entre une sortie de performance, de service, de biens ou d'énergie, et une entrée d'énergie, elle est exprimée en pourcentage de l'énergie d'entrée par rapport à l'énergie de sortie [52]:

$$Efficacité = \frac{\text{Énergie sortante}}{\text{Énergie rentrante}} \times 100\% \quad (1)$$

Améliorer l'efficacité énergétique consiste à augmenter le rapport entre l'énergie d'entrée et l'énergie de sortie par des changements technologiques, comportementaux et/ou économiques [53].

2.2.2 Concept de l'industrie 4.0 pour améliorer l'efficacité énergétique

En raison de l'augmentation du coût de l'énergie, de la concurrence à bas prix [54, 55] et de la législation environnementale [47, 55], aujourd'hui, la principale mission pour une société d'exploitation est la réduction du coût total de possession (CTP), mais aussi la fabrication durable de biens avec un minimum d'énergie [56, 57]. La meilleure façon de relever ces défis est de développer des mesures afin de réduire la consommation d'énergie et augmenter l'efficacité énergétique. Pour y parvenir, la consommation énergétique des usines, des installations et des machines doit être totalement transparente. La gestion systématique de l'énergie est ici la clé. La fabrication et la production peuvent être enrichies par la gestion des données et les réseaux. À cette fin, des systèmes informatiques peuvent être intégrés dans les installations et les machines. Ils peuvent acquérir des valeurs de mesure à partir de capteurs et de contrôleurs, enregistrer des données sur les produits et faire fonctionner des systèmes complexes [58].

Par conséquent, l'efficacité énergétique traite trois cas : bâtiment, machines et processus ; et elle se manifeste de deux façons : la gestion de l'énergie et les dispositifs énergétiques.

2.2.2.1 Domaines d'applications (bâtiment, machines, processus)

Premier cas : Bâtiment

Les bâtiments sont des systèmes énergétiques importants, les dernières recherches montrant qu'ils sont responsables de 40% de la consommation totale d'énergie et de 36% des

émissions des GES dans les pays de l'union européen [21]. Les technologies d'efficacité énergétique des bâtiments neufs sont plus accessibles à mettre en œuvre que les bâtiments anciens ou les rénovations [21, 59, 60]. Ainsi, maîtriser et réduire la consommation énergétique des bâtiments est un véritable casse-tête. Il existe trois actions principales pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. La première consiste à améliorer l'isolation pour réduire les coûts de chauffage et de refroidissement. La deuxième est d'adapter les systèmes de contrôle automatique de la gestion des bâtiments. La troisième consiste à modifier les technologies énergétiques utilisées en changeant les dispositifs d'éclairage (installation de lampes D.E.L.) et en utilisant des capteurs et des actionneurs pour automatiser la gestion de l'énergie. Dans le passé, l'installation de capteurs et d'actionneurs nécessitait une modification importante de la structure du bâtiment. Cependant, les technologies plus récentes introduisent des capteurs et des actionneurs dits "intelligents" et peuvent utiliser des communications sans fil, ce qui présente un avantage technologique et financier. L'intégration et le développement des capteurs, de dispositifs et de protocoles intelligents basés sur l'IdO peuvent faciliter la transition vers des bâtiments intelligents [21]. En outre, la gestion de l'énergie 4.0 est conçue pour contrôler le chauffage, le refroidissement, la ventilation et le système thermodynamique en utilisant les données reçues des capteurs et des dispositifs et en les traitant avec une technologie d'intelligence artificielle [61, 62]. Elle permet d'organiser les activités énergétiques entre consommateurs et fournisseurs en coordonnant les capacités de production d'énergie et les besoins des consommateurs [62] (Figure 8).

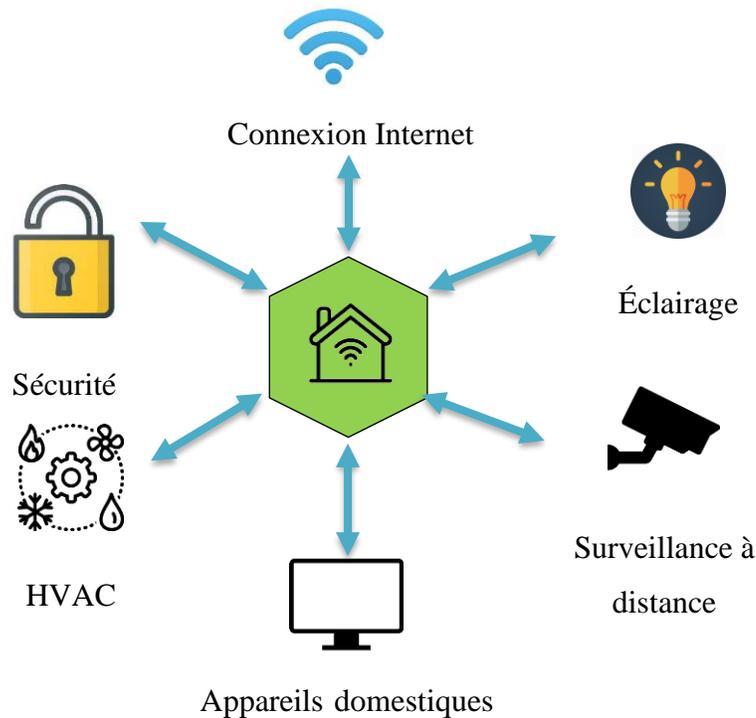


Figure 8. Le concept d'un bâtiment intelligent [61].

Deuxième cas : Machinerie

De nos jours, la consommation énergétique économique est l'une des principales préoccupations des entreprises industrielles dans les systèmes de fabrication de l'industrie 4.0 [63]. La consommation d'énergie de l'usinage doit être surveillée en temps réel pour atteindre une consommation d'énergie efficace (production économe en énergie). Néanmoins, il n'est pas facile d'établir un modèle de consommation d'énergie. Par conséquent, l'industrie 4.0 peut apporter une solution en déployant divers capteurs intelligents, en collectant des données de consommation d'énergie et en appliquant une méthode d'IA pour déterminer les caractéristiques de la demande d'énergie. Par exemple, un réseau neuronal profond (DNN) est une méthode d'apprentissage automatique qui traite et analyse les mégadonnées pour définir les caractéristiques ou les tendances de consommation d'énergie des équipements de fabrication à partir des données obtenues par la surveillance de la consommation d'énergie [64]. Il procède par la suite en modifiant et en optimisant les paramètres de l'équipement sans intervention humaine [21].

Troisième cas : Procédé

Les procédés de fabrication font intervenir de nombreux mécanismes physiques pour transformer une matière première en un produit fini en modifiant sa forme et/ou sa composition (Figure 9) [65, 66]. Par rapport à l'énergie totale consommée, l'énergie dépensée dans le processus lui-même est faible [66]. Cependant, elle n'est pas négligeable, car la consommation d'énergie de divers procédés industriels varie avec le temps et la nature dynamique de l'énergie du procédé [60, 67].

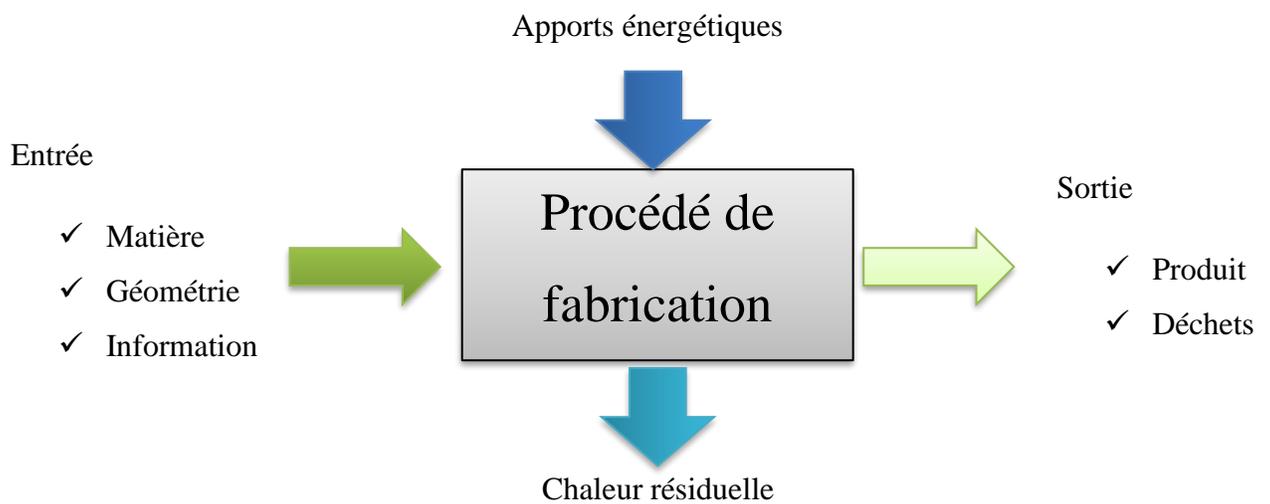


Figure 9. Procédé industriel du point de vue énergétique [66].

Il faut d'abord sensibiliser à la consommation d'énergie, puis la surveiller et l'analyser en temps réel pour améliorer l'efficacité énergétique et optimiser la consommation d'énergie des procédés de fabrication [68]. La plupart des systèmes de production standard ne peuvent pas collecter les données de consommation d'énergie dans les processus de fabrication [68, 69]. À cet égard, l'industrie 4.0 contient une communication de processus dynamique, efficace, automatisée et en temps réel pour gérer et contrôler un environnement de fabrication dynamique à l'aide de l'IdO [63]. En outre, l'IdO utilise des systèmes d'acquisition et de contrôle des données pour détecter, collecter, stocker, analyser, afficher et contrôler les processus des installations [70, 71]. Les données sont collectées par des capteurs intelligents ou d'autres équipements de mesure [70] et traitées pour fournir des informations. Les données collectées par les capteurs intelligents sont stockées sous forme de mégadonnées par des

outils d'analyse [64] dans l'infonuagique [63]. Elles sont ensuite surveillées et analysées en temps réel, intégrées dans des outils de gestion de l'énergie (logiciels de gestion de l'énergie, outils de simulation, par exemple) et définies en stratégies et en pratiques pour améliorer l'efficacité énergétique [68] et réduire la consommation d'énergie [21].

2.2.2.2 Dispositifs énergétiques

Se doter d'une usine efficace du point de vue énergétique, selon le concept de l'industrie 4.0, consiste en premier lieu à équiper l'usine avec les équipements adéquats pour garantir une consommation d'énergie optimale, c'est-à-dire, une bonne climatisation et une bonne isolation, et des dispositifs tels que des capteurs, des actionneurs et des machines à faible consommation d'énergie et à connexion réduite entre eux ; dans ce cas, nous utilisons des dispositifs intelligents connectés à un réseau sans fil industriel.

En industrie 4.0, on remplace la technologie analogique ou numérique par la technologie dite « intelligente ». Par exemple, au lieu d'avoir des capteurs analogique ou numérique, on aura des capteurs intelligents. Ils ont la capacité de s'organiser automatiquement, d'apprendre et de conserver des informations sur l'environnement pour analyser les comportements et les capacités. Par conséquent, les capteurs intelligents peuvent prendre des décisions qui leur permettent de s'adapter aux changements de l'environnement [11]. Ces capteurs sont conçus comme des composants IdO qui convertissent les informations en temps réel en données numériques pouvant être transmises à une passerelle [11, 64, 72]. La communication entre les dispositifs se fait par réseau WIFI industriel ou RFID [73].

2.2.2.3 Gestion de l'Énergie 4.0 (Energy Management 4.0)

La norme DIN EN ISO 50001:2011 définit le système de management de l'énergie comme la somme d'éléments totalement intégrés ou en interaction conduisant à la mise en place d'une politique énergétique et d'objectifs énergétiques stratégiques, ainsi que le processus et les procédures qui permettent d'atteindre ces objectifs stratégiques [74]. La gestion de l'énergie peut être considérée comme la mesure, le suivi, l'évaluation et le contrôle

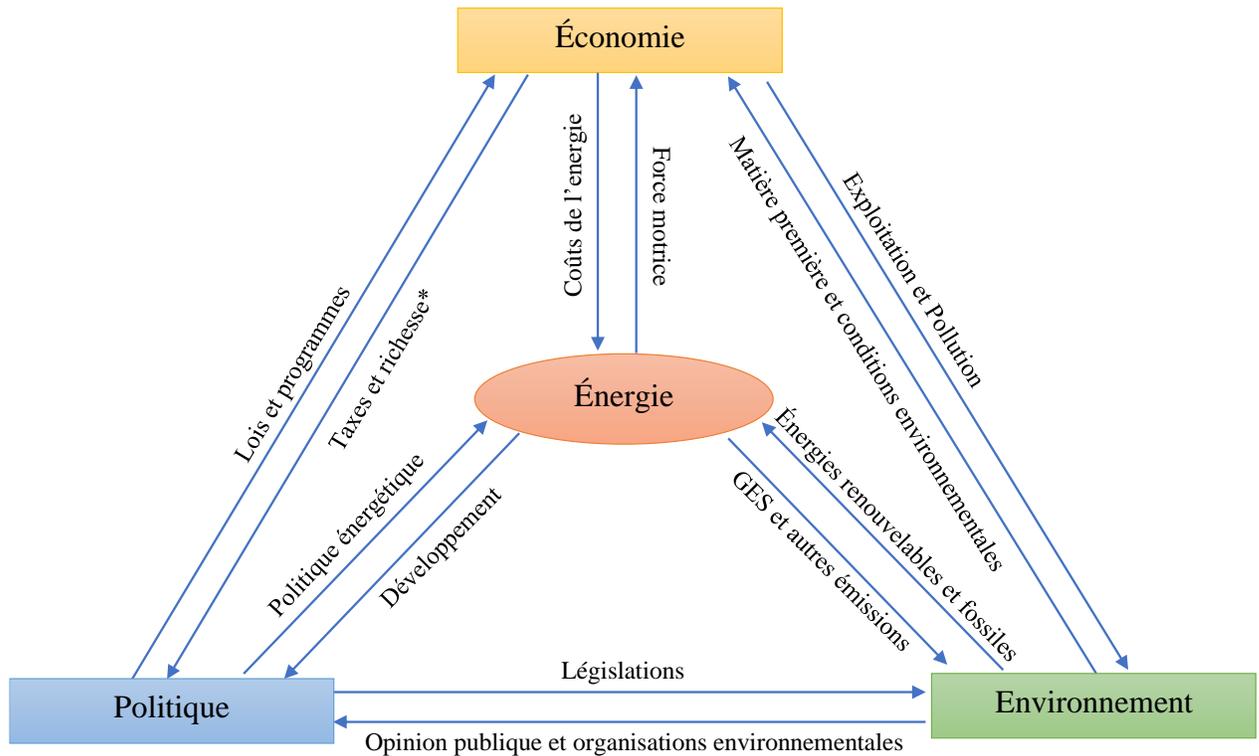
de l'énergie tout en tenant compte des compromis avec d'autres domaines de performance de fabrication conventionnels tels que le coût, la qualité et la livraison [75]. L'objectif de la gestion de l'énergie est de fournir des consignes aux installations industrielles pour intégrer l'efficacité énergétique dans leurs pratiques de gestion [50]. Dans l'industrie 4.0, la gestion de l'énergie est appelée gestion de l'énergie 4.0. Le rôle de la gestion de l'énergie 4.0 est de proposer des décisions fondées sur les données énergétiques, de surveiller les systèmes énergétiques et d'optimiser la consommation d'énergie de manière autonome [54, 64]. Pour améliorer l'efficacité énergétique, les données énergétiques doivent être collectées et synthétisées à partir de compteurs intelligents, de capteurs et d'autres outils (dispositifs énergétiques) [63, 76], puis il faut intégrer ces données dans la gestion de la production [63].

2.2.3 Les secteurs impactés par l'efficacité énergétique

L'efficacité énergétique est un domaine partagé entre de nombreux secteurs tels que l'ingénierie, l'économie, la politique, l'environnement, la gestion, etc. les trois secteurs les plus influents sont :

- ✓ Secteur économique : réduire la consommation d'énergie conduit à augmenter la productivité et améliorer la compétitivité (c'est toujours un sujet de débat).
- ✓ Secteur environnemental : réduire la consommation d'énergie réduit les émissions des GES et les rejets.
- ✓ Politiques et programmes : les gouvernements adoptent des lois qui garantissent à la fois un développement économique durable et la réduction de rejets polluants en tenant compte des engagements internationaux (exemple : COP 26)

La Figure 10 illustre les interactions entre les trois secteurs en centralisant le secteur énergétique.



* La richesse est utilisée pour exprimer le produit intérieur brut (PIB)

Figure 10. Influence de l'économie, de l'environnement, et de la politique sur le secteur énergétique.

2.3 RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

La recherche bibliographique consiste à étudier les travaux antérieurs qui traitent la manière d'appliquer les concepts de l'industrie 4.0 dans le domaine énergétique, afin d'obtenir une meilleure efficacité et de meilleures performances pour l'industrie en général et l'industrie du bois en particulier. À cause de la complexité du concept étudié, l'étude nécessite un développement en plusieurs étapes. Premièrement, nous nous baserons sur la définition des notions précédentes pour déterminer les points de jonctions entre eux. Deuxièmement, nous appliquerons un algorithme de recherche pour trouver les articles en relation avec les termes étudiés, puis nous utiliserons la méthode PRISMA pour sélectionner les plus importants, en

éliminant les doublons et en excluant les articles qui ne mentionnent pas l'efficacité énergétique et l'industrie 4.0 dans l'industrie manufacturière ou du bois. Troisièmement, nous classifions les résultats selon des catégories.

Le premier résultat obtenu nous a donné 2154 articles, mais le nombre de résultats a été affiné après avoir éliminé les doublons et exclu les articles qui ne faisaient que mentionner le terme, mais n'approfondissaient pas son utilisation ou qui ne faisaient pas référence à la problématique de l'efficacité énergétique et de l'industrie 4.0 dans le domaine manufacturier comme ceux de la logistique ou le transport. Nous avons sélectionné les articles moyennant l'ordinogramme PRISMA (Figure 11) [77], après on les a classifiés selon trois catégories.

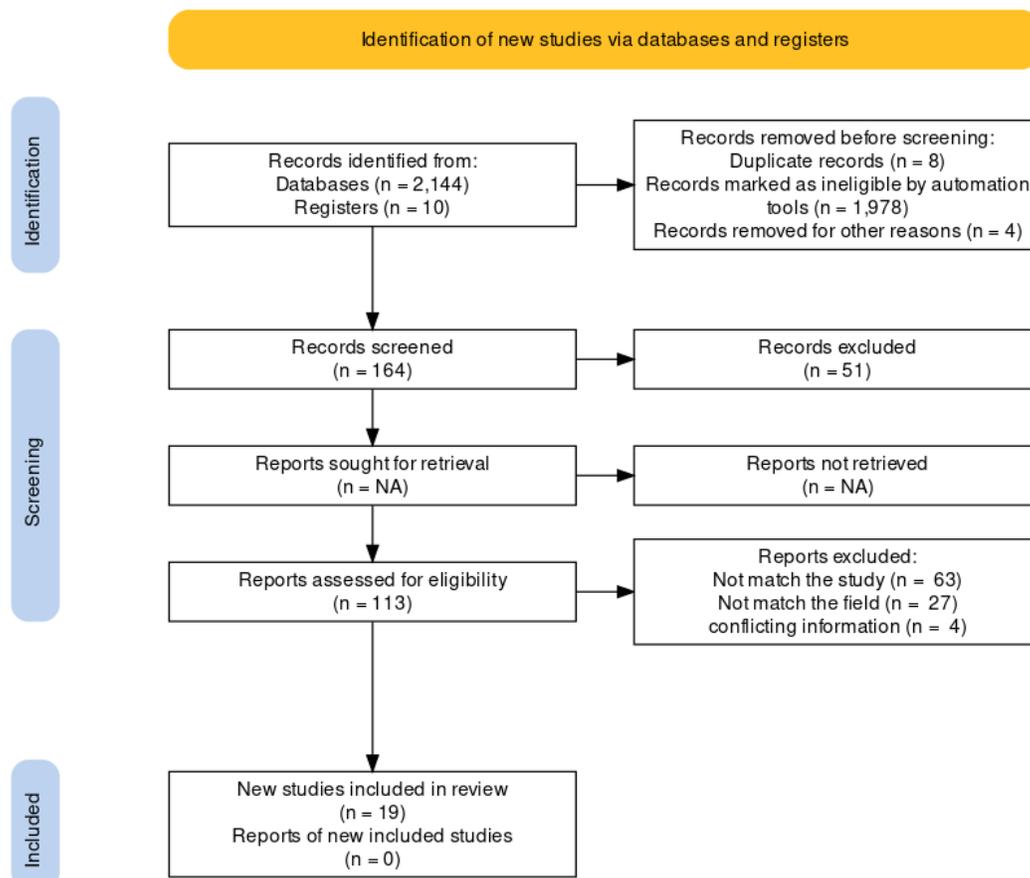


Figure 11. Ordigramme PRISMA de la sélection des articles sur l'efficacité énergétique, l'industrie 4.0 et l'industrie du bois [77].

Le nombre final d'articles est de dix-neuf articles : six articles traitent de la revue de littérature précédente (catégorie A), un seul article qui traite l'efficacité énergétique et l'industrie 4.0 en lien direct avec l'industrie du bois (catégorie B) et douze articles qui traitent de l'efficacité énergétique et de l'industrie 4.0 avec l'industrie manufacturière en général (catégorie C).¹

Le Tableau 3 illustre la classification de chaque article selon le domaine d'étude et les informations détaillées.

Tableau 3
Cartographie des articles publiés sur l'efficacité énergétique et l'industrie 4.0 dans l'industrie manufacturière (en particulier l'industrie du bois).

Articles		Efficacité énergétique		Industrie 4.0				Application		
Catégorie	Référence	Gestion de l'énergie	Dispositif énergétique	IoT	BIG DATA	AR	Simulation	Autres	Industrie du bois	Autres
A	[68]	X		X	X			X		
	[78]	X		X				X		X
	[79]	X	X	X	X			X		X
	[80]	X	X	X	X		X	X		
	[73]	X						X		
	[81]	X	X			X		X		
B	[82]	X	X	X	X			X	X	
C	[54]	X			X			X		
	[56]	X	X	X	X	X	X	X		

¹ Les articles trouvés avant novembre 2020

[58]	X		X	X				X
[64]	X			X			X	
[63]	X	X	X	X				
[83]		X	X	X	X			
[84]	X			X			X	
[85]	X	X		X			X	X
[86]		X			X			X
[87]	X	X	X	X			X	
[88]	X			X			X	
[89]	X	X	X	X	X	X	X	

Les travaux de la recherche bibliographique ont abouti à la publication d'un article dans le journal MDPI-Energies, intitulé : « Energy Efficiency and Industry 4.0 in Wood Industry: A Review and Comparison to Other Industries » , 24 Mars 2022, Volume 15, 2384. doi.org/10.3390/en15072384 [90]. Une partie de cet article a été introduite à Encyclopedia sous le thème de « Relation between Energy Efficiency and Industry 4.0. »

CHAPITRE 3

INDUSTRIE DU BOIS ET DE SES DÉRIVÉES - VOLET ÉNERGÉTIQUE

L'industrie du bois, comme d'autres industries, est affectée par les fluctuations du marché mondial. Ces fluctuations peuvent être de nature économique (prix de vente et de la matière première, énergie, concurrence, etc.), sociale (main d'œuvre), ou bien géopolitique (accords, conflits, environnement, etc.). Le Canada, le Québec, et le Bas-Saint-Laurent constituent des acteurs principaux dans l'industrie du bois locale et mondiale, et cette dernière présente une part non négligeable de leur économie.

Dans ce chapitre, on abordera le concept de l'énergie dans l'industrie du bois et de ses dérivées. La nécessité de traiter ce concept en détail vient du fait que chaque industrie a ses caractéristiques et particularités, notamment celle du bois. Cette nécessité nous permettra de comprendre et interpréter les phénomènes physiques afin de construire un modèle fiable et robuste. Tout d'abord, on mettra l'accent sur les caractéristiques socio-économiques de cette industrie, ensuite, on va définir le bois en tant qu'un matériau de base et le rôle de l'énergie dans ses différentes transformations. Ce chapitre nous permettra aussi de déterminer les conséquences de la négligence de ces caractéristiques.

3.1 IMPACT SOCIO-ECONOMIQUE DE L'INDUSTRIE DU BOIS ET DES DERIVEES

3.1.1 Ressources naturelles

D'après Statistique Canada, la surface des terres forestières est estimée à plus de 347 millions d'hectares à travers le Canada, soit 8.5 % des forêts mondiales. Environ 94 % de cette terre appartient à l'état (dont 76.6% aux provinces), tandis que le privé ne possède que 6 % [91].

Au Québec, la ressource forestière recouvre près de 50% du territoire québécois (761 100 km² sur 1 667 712 km²), soit l'équivalent de la Suède et de la Norvège et elle représente 20% du territoire forestier canadien et 2.2 % de l'ensemble des forêts mondiales [92].

Pour sa part, la région du Bas-Saint-Laurent est une région avoisinant le fleuve Saint Laurent, connue par sa richesse forestière, elle couvre une superficie totale de 22 185 km² dont 19 367 km² de forêt [92], soit 87 % du territoire.

3.1.2 Ressources économiques et sociales

Le Canada est un leader mondial dans la production de nombreux produits forestiers, l'industrie forestière occupe une place importante dans l'économie du Canada surtout dans les régions rurales et éloignées où peu d'autres industries sont actives. Pour exprimer cette importance dans la vie économique et sociale, on ne trouve pas mieux que les statistiques suivantes [93].

En 2019, le secteur forestier canadien contribuait pour 23.7 milliards de dollars du PIB (Produit Intérieur Brut) nominal du Canada (1.1%) et la valeur des exportations canadiennes de produits forestiers est d'environ 33 milliards de dollars [94].

Le Québec est la deuxième province productrice de bois d'œuvre au Canada, derrière la Colombie-Britannique. Cette situation lui confère un poids important sur l'échiquier canadien et nord-américain, avec environ 23% de la production canadienne, soit plus de 18 millions de m³ par année [93]. Elle a enregistré pour sa part en 2020 une valeur de contribution d'environ 5.6 milliards de dollars au PIB du Québec soit un taux de 1.6 % [92].

En 2020 le nombre d'usines de transformation primaire du bois est estimé à 275 usines au Québec dont 28 sont enregistrées au Bas-Saint-Laurent [92], tandis que la main d'œuvre est estimée à 60 000 travailleurs dans le secteur forestier pour la récolte et la transformation du bois et du papier, y compris les 2e et 3e transformations de ces produits qui représentent 31% des emplois dans le même secteur au Canada [93].

Finalement, au Canada, l'industrie forestière a participé à la réduction des émissions de GES provenant de combustibles fossiles d'environ 42 % entre 2007 et 2017 [93].

3.1.3 Caractéristiques et problèmes

L'industrie du bois, par rapport aux autres industries, est caractérisée par sa grande dépendance aux facteurs extérieurs, ces facteurs peuvent être communs aux autres industries comme ils peuvent être spécifiques à l'industrie du bois.

La concurrence, le changement climatique, les conflits géopolitiques ainsi que la bourse mondiale sont des facteurs qui influent directement sur l'ensemble des secteurs industriels dans le monde. De plus, le secteur de l'industrie du bois est affecté par d'autres facteurs comme les conditions météorologiques, les feux de forêt et le marché immobilier.

- Les conditions météorologiques au Québec favorisent la diversité biologique et la poussée de certaines espèces, ces conditions se résument par la quantité de pluie et la neige durant l'année, les journées ensoleillées, la durée du jour en une journée et l'humidité dans l'air. Ces conditions météorologiques ont un effet inverse sur le bois lors de sa mise en forme en diminuant la qualité du produit final et sa valeur.
- Les feux de forêt sont aussi un facteur non négligeable dans la chaîne d'approvisionnement du bois. Yamasaki [95] a publié en 2022 un rapport de projet intitulé: « Analyse des risques de feux de forêt dans la région Nord-du-Québec » qui démontre l'impact des feux de forêt sur la récolte et l'aménagement de la forêt. Il a pris un exemple des données du feu dans la région Nord-du-Québec et ensuite il a utilisé différentes méthodes de modélisation pour évaluer les répercussions des perturbations naturelles sur l'état des forêts et dans les plans d'aménagement forestier intégré. Ses résultats ont montré qu'il est possible de réduire partiellement l'impact des feux (impact des feux sur la récolte est toujours présent).
- Pour comprendre comment le marché de construction influe sur l'industrie du bois ; on prend deux exemples. Le premier exemple est la crise de 2009. Cette crise a eu des effets désastreux sur l'industrie de la construction aux États-Unis et sur l'économie mondiale par conséquent,

la diminution des demandes en matériaux de construction engendrant une diminution des exportations de bois [96]. Le deuxième exemple est la pandémie de COVID 19 et la relance économique. On a découvert la notion de télétravail. Les gens cherchent à habiter dans des maisons plus grandes mêmes un peu éloignées de la ville ce qui a augmenté les prix des maisons, par la suite les coûts de la construction et par conséquent les prix des matériaux, surtout le bois qui atteignait 300 % de son prix avant la pandémie [97].

3.1.4 Cas de l'industrie des meubles

L'industrie des meubles représente un secteur très important dans l'industrie du bois, elle rentre dans la catégorie de la deuxième ou la troisième transformation (selon la matière utilisée) qui consiste à utiliser les produits de la première ou de la deuxième transformation. Dans le système de classification des industries de l'Amérique du Nord, elle est codée SCIAN 337, fabrication de meubles et de produits connexes.

En 2021, le montant des exportations totales du Canada était 4,725.821 millions \$, tandis que celui des importations totales était à 7,073.73 millions de dollars [98].

De 2005 à 2013, les livraisons manufacturières québécoises de l'industrie du meuble de maison sont passées de 1,635 millions de dollars à 955 millions de dollars (diminution de 42 %). La principale cause est la concurrence asiatique sachant que 51% des importations du Québec de meubles de maison proviennent de la Chine [98].

3.2 ANATOMIE DU BOIS

Le bois est considéré comme l'un des matériaux les plus anciens utilisés par l'homme. Sa définition est à la fois simple et complexe. Chacun dans son domaine le voit de manière différente. Les biologistes le définissent comme un matériau naturel composé de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et d'extraits [99, 100]. Les techniciens le définissent comme un matériau naturel de structure utilisé dans la construction [101], la fabrication des meubles, papiers, biomasses et objets décoratifs [99]. Les environmentalistes de leur côté le voient d'une façon très différente. Le bois et sa récolte présentent un épuisement pour les forêts, les forêts qui constituent un maillon très important dans la

biodiversité, la lutte contre les changements climatiques et le cycle du carbone autrement dit la réduction des GES. En plus, le bois est un matériau qui demande un délai important pour être renouvelable et il est peu recyclable. Par conséquent, ils recommandent une gestion rationnelle des forêts, et promeuvent une utilisation durable des produits du bois [101]. La Figure 12 illustre le cheminement des produits à base de bois de la forêt jusqu'au produit prêt à l'emploi.

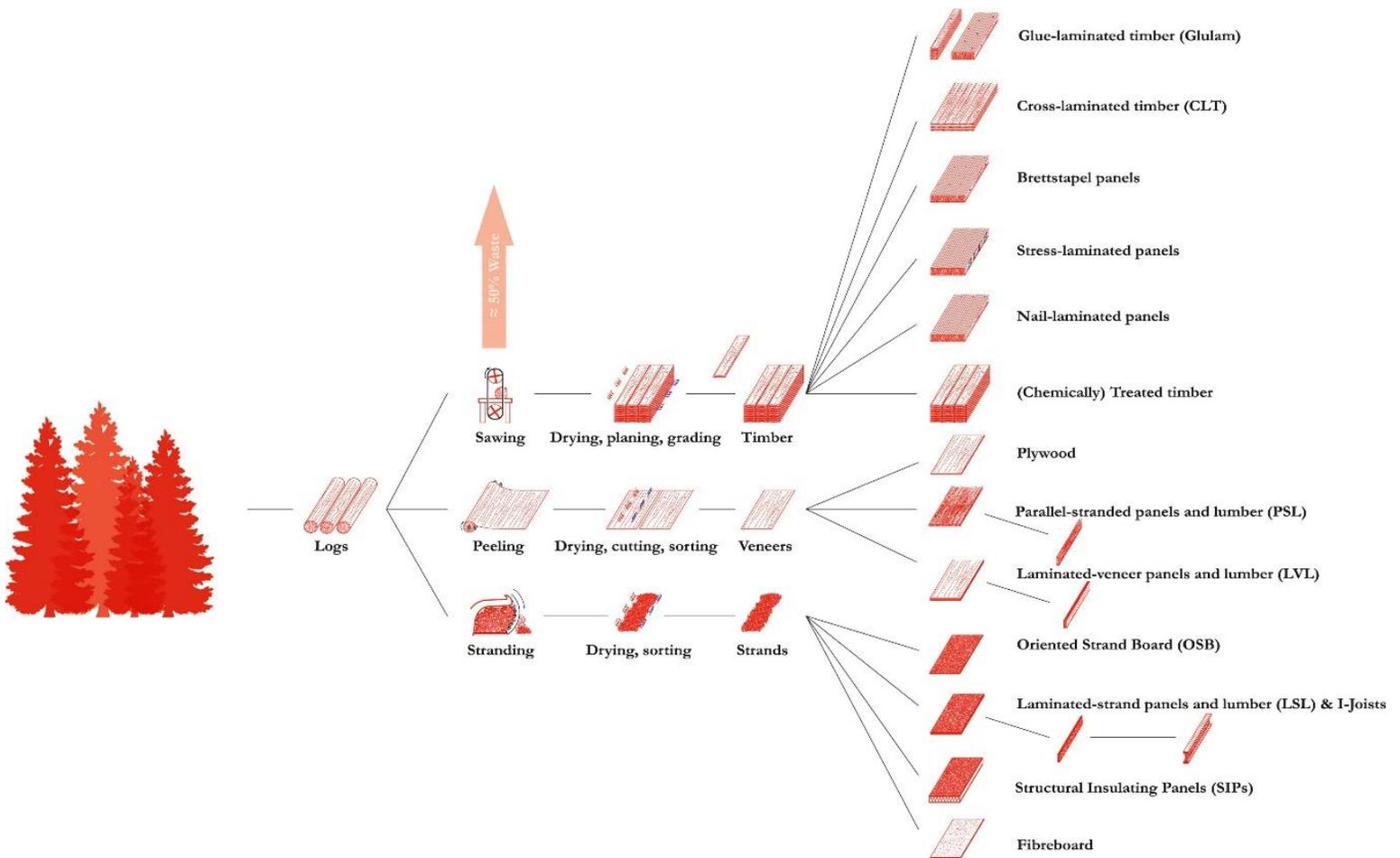


Figure 12. La chaîne de transformation des produits du bois [101].

3.2.1 La macroscopie du bois

Le bois est le tissu dur et fibreux qui compose la majeure partie des tiges, branches et racines des arbres (et arbustes) appartenant aux groupes végétaux connus sous le nom de gymnospermes et d'angiospermes dicotylédones. Le bois est un matériau hétérogène et anisotrope, son hétérogénéité vient du fait qu'il est composé de différents éléments résultants du métabolisme de l'arbre [102] (Figure 13).

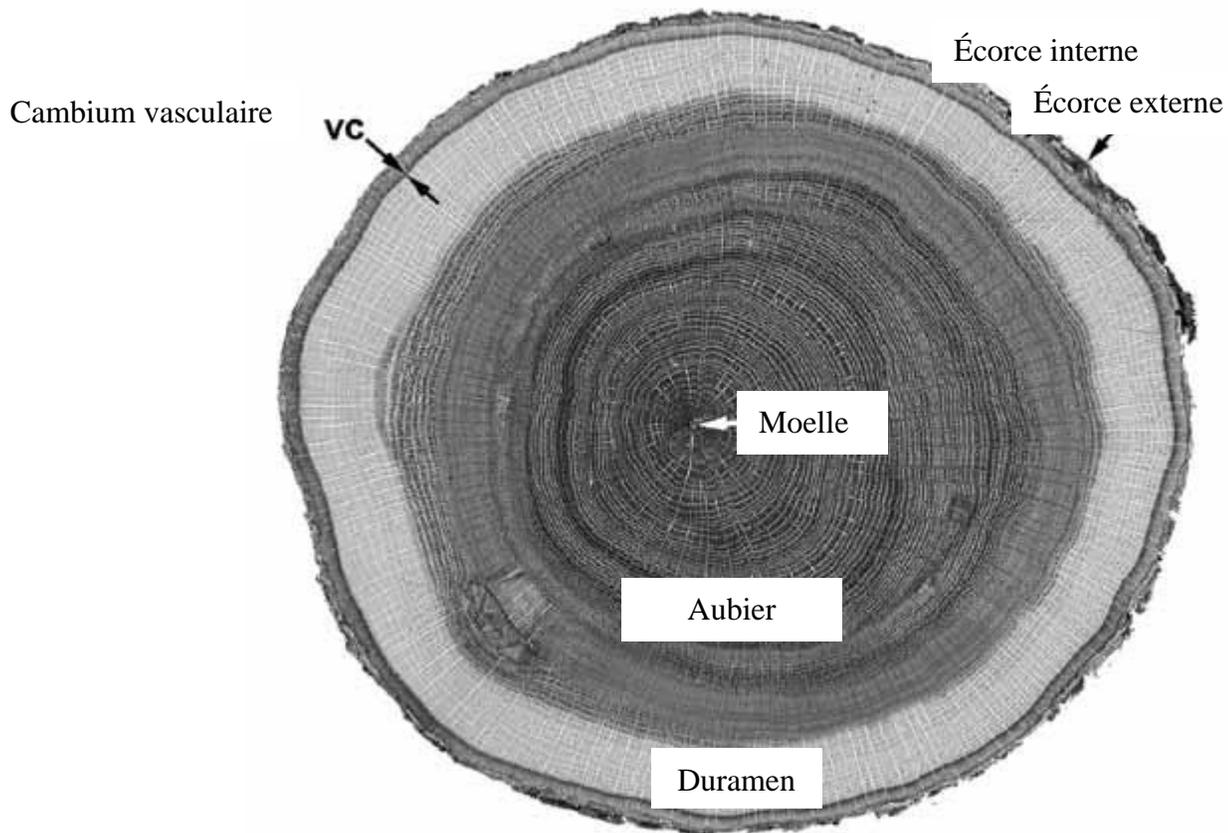


Figure 13. Vue macroscopique d'une coupe transversale [103].

3.2.2 La microscopie du bois

Le bois est un matériau hygroscopique, essentiellement composé de cellulose, d'hémicellulose, lignine et des quantités mineures (généralement moins de 10 %) de substances étrangères. La

variation dans les caractéristiques et proportions de ces composants et les différences de structure cellulaire rendent les bois lourds ou légers, rigides ou flexibles, et durs ou mous [99-101]. Son caractère hygroscopique lui permet d'absorber ou de dégager de l'humidité avec son environnement en fonction des conditions de température et d'hygrométrie [104]. La Figure 14 est une image d'un échantillon de bois obtenue par un MEB (x 760) qui montre la structure hygroscopique du bois.

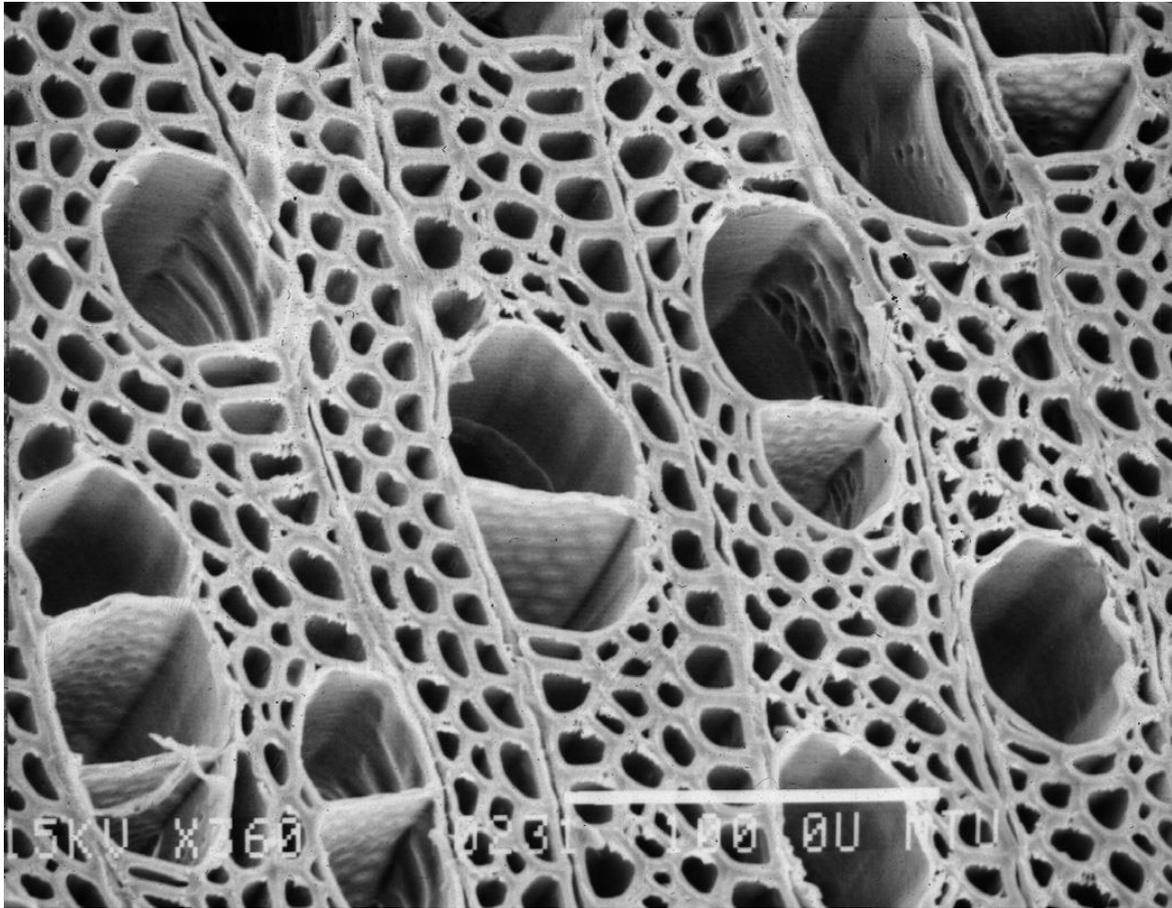


Figure 14. Image de coupe transversale de bois (*Populus tremuloides*), vue par le Microscope Électronique à Balayage (MEB) [105].

3.2.3 Propriétés thermiques et mécaniques

Dans les manuels du bois [106, 107], les auteurs ont défini les propriétés du bois en détail. Nous citerons dans ce qui suit les plus importantes :

3.2.3.1 Propriétés thermiques

- a) Conductivité thermique : La conductivité thermique est une mesure du débit de chaleur à travers une unité d'épaisseur d'un matériau soumis à un gradient de température. La conductivité thermique du bois est affectée par un certain nombre de facteurs de base : densité, teneur en humidité, teneur en matières extractives, le sens du fil, les irrégularités structurelles telles que les gerces et nœuds, l'angle des fibrilles et la température. Exemple : la conductivité du bois de charpente résineux à 12 % d'humidité est comprise entre 0.1 et 1.4 W/(m K).
- b) Capacité calorifique : La capacité calorifique (thermique) est définie comme la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter une unité de masse (kg ou lb) d'une unité de température (K ou °F). La capacité calorifique du bois dépend de la température et de la teneur en humidité du bois, mais est pratiquement indépendante de la densité ou de l'essence. La capacité calorifique du bois contenant de l'eau est supérieure à celle du bois sec. En littérature, il existe plusieurs formules pour définir la capacité calorifique du bois en fonction de la température, de l'humidité et d'autres paramètres. Les formules utilisées dans notre étude seront détaillées dans le § 4.3.1.3.
- c) Diffusivité : la diffusivité est définie comme le rapport de la conductivité au produit de la capacité calorifique et de la densité. La diffusivité thermique du bois est bien inférieure à celle des autres matériaux structuraux.
- d) Coefficient de dilatation thermique : le bois, comme les autres matériaux, se dilate en chauffant et se contracte en refroidissant. Le coefficient de dilatation thermique est une mesure du changement de dimension causé par le changement de température. La dilatation thermique du bois change entre la direction radiale et tangentielle et aussi sur la direction parallèle aux grains.

3.2.3.2 Propriétés mécaniques

Le bois est un matériau orthotrope ; les propriétés mécaniques sont uniques et indépendantes dans les directions de trois axes : longitudinal, radial et tangentiel (Figure 15).

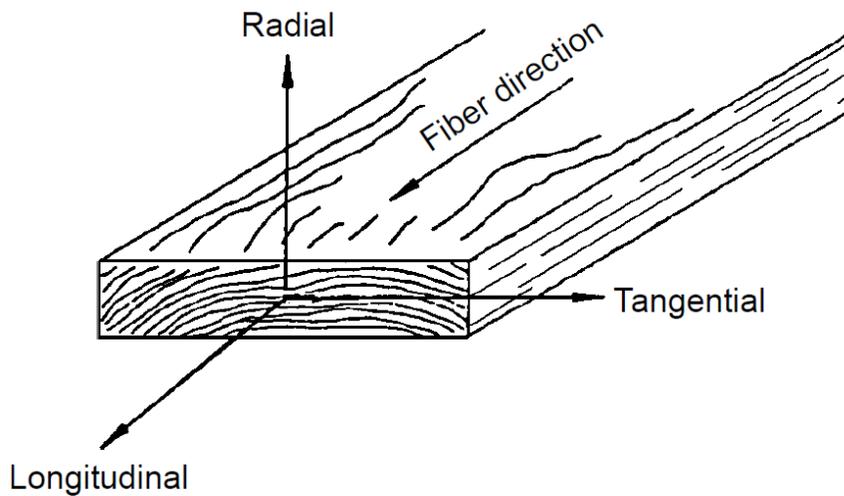


Figure 15. Trois principaux axes du bois [105].

- a) Élasticité : Le fait d'avoir une indépendance dans les trois directions de l'espace, fait qu'on aura trois modules d'élasticité E , trois modules de rigidité G et six coefficients de Poisson μ pour décrire le comportement élastique du bois.
- b) Résistance : Les propriétés mécaniques dites « propriétés de résistance » sont : le module de rupture en flexion, la contrainte maximale en compression parallèle au fil, la contrainte de compression perpendiculaire au fil et la résistance au cisaillement parallèle au fil. Des mesures supplémentaires sont souvent effectuées pour évaluer le travail à la charge maximale en flexion, la résistance à la flexion par impact, la résistance à la traction perpendiculaire au fil et la dureté.
- c) Propriétés moins courantes : Ces propriétés sont d'une importance extrême dans le domaine de la construction et moins dans notre sujet de recherche comme les propriétés liées aux vibrations ou les propriétés sonores.

3.2.3.3 Propriétés spécifiques au bois

Les propriétés caractérisant le bois sont : résistance à la torsion, dureté, fluage et durée de charge, fatigue, résistance au cisaillement roulant, résistance à la rupture. Ces propriétés sont plus propres et uniques au bois par rapport à d'autres matériaux à cause des paramètres qui influent sur ces valeurs comme la température (T) et le teneur en humidité (TH), aussi bien que la densité et la

gravité spécifique qui sont des propriétés physiques d'une importance non-négligeable. La densité (ρ) est la masse du bois divisé par le volume de l'échantillon à un taux d'humidité donné [103, 106], tandis que la gravité spécifique (GS ou G) est la densité du matériau divisée par la densité de l'eau [105].

3.3 L'EAU ET LE BOIS

3.3.1 Description générale

L'eau contenue dans le bois peut être sous trois formes différentes : 1) l'eau libre ou capillaire, 2) l'eau liée et 3) la vapeur d'eau [104]. La teneur en humidité TH (appelée aussi teneur en eau TE) représente la quantité d'eau dans un matériau à base de bois, exprimée en pourcentage du poids du bois sec. Elle peut être calculée par [108] :

$$TH = \frac{m_{eau}}{m_{bois}} \times 100\% \quad (2)$$

D'un point de vue opérationnel, la teneur en humidité à base sèche d'un échantillon de bois donné peut être calculée comme suit :

$$TH_{sec} = \frac{m_{humide} - m_{sec}}{m_{sec}} \times 100\% \quad (3)$$

Tandis que la teneur en humidité à base humide d'un échantillon de bois donné sera calculée comme suit :

$$TH_{humide} = \frac{m_{humide} - m_{sec}}{m_{humide}} \times 100\% \quad (4)$$

où m_{humide} est la masse de l'échantillon à une teneur en humidité donnée et m_{sec} est la masse de l'échantillon séché au four [106].

Dans le paragraphe §4.2 on détaillera davantage les phénomènes physiques qui engendrent le transfert de l'eau dans le bois ainsi que les formulations mathématiques qui gèrent ces phénomènes.

3.3.2 Effet de l'eau sur le bois

3.3.2.1 Déformations

Le bois subit des changements de dimension avec la variation de l'humidité relative. Un air plus humide causera un gonflement et un air plus sec provoquera un rétrécissement [106, 107].

Le gonflement est dû principalement à une absorption intense d'humidité (Figure 16), tandis que le rétrécissement est dû à un séchage intense ou non contrôlé. Dans le paragraphe §3.6 on détaillera davantage le procédé de séchage.

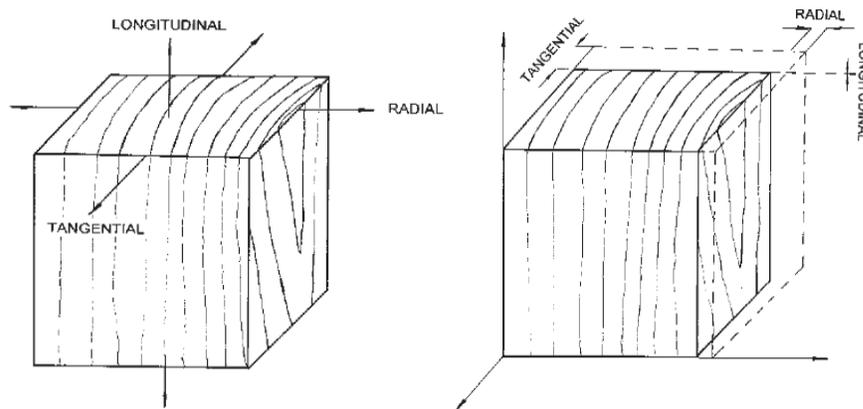


Figure 16. Gonflement d'un bloc en bois dans les trois directions [109].

3.3.2.2 Dégradation

Sous certaines conditions d'humidité et de température, des organismes dégradant le bois se développent. Ces organismes sont principalement des champignons, insectes, bactéries et térébrants marins [110, 111]. Un exemple de l'effet dégradant sur le bois sont les taches fongiques, souvent appelées taches bleues ou taches de sève. Elles sont causées par des champignons qui poussent dans l'aubier et se bleuissent. Le bleuissement peut se développer si le séchage initial est trop lent ou bien la température est inadéquate (Figure 17).



Figure 17. Tache de sève ou bien de couleurs du gris bleuté au noir sur le pin [112].

3.4 LES PANNEAUX DERIVEES DU BOIS

Le secteur industriel du bois est composé de trois éléments essentiels qui définissent les opérations sur le bois depuis sa récolte jusqu'au consommateur final. (1) les opérations forestières ou bien l'exploitation et la récolte du bois (scierie), (2) l'activité reliée au secteur des pâtes (papier et carton) et (3) la fabrication de produits en bois [96]. La fabrication de produits en bois, quant à elle, est classifiée selon la taille du bois utilisé et la nature du procédé de fabrication. La Figure 18 illustre le cheminement du bois de la récolte jusqu'au produit prêt à la transformation finale.

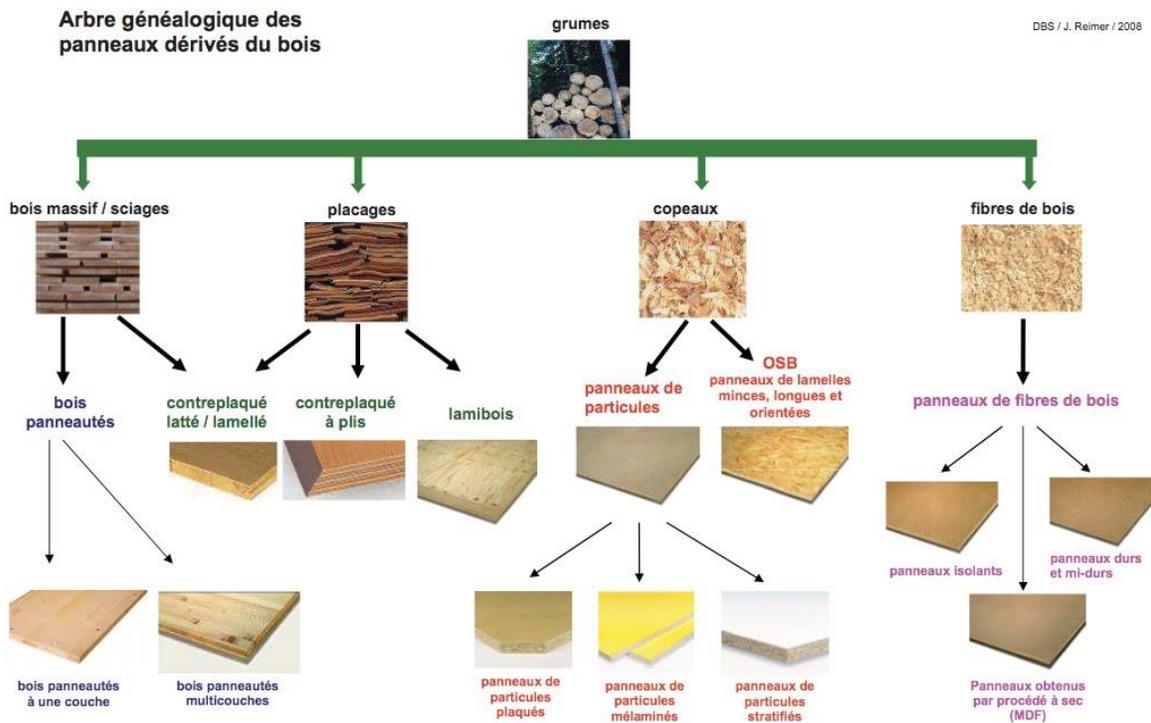


Figure 18. Arbre généalogique de transformation du bois [113].

Les panneaux de bois rentrent dans la fabrication de nombreux produits comme la décoration intérieure et la fabrication de meubles. Contrairement au bois massif qui varie en largeur et en épaisseur de quelques millimètres [114], les panneaux de bois sont caractérisés par leur stabilité dimensionnelle, leur usinabilité [115] et leur aspect économique, ce qui rend les opérations de plus en plus faciles et rentables.

Les opérations telles que le découpage, l'usinage, et le collage consistent à donner au panneau une forme souhaitée afin de répondre aux exigences de dimension et de qualité. La qualité du produit final est influencée par des paramètres endogènes et exogènes de la matière première (panneau à base de bois). Les facteurs endogènes les plus connus qui influencent la qualité finale du produit sont : taux d'humidité, taille des grains, essence du bois, et les facteurs de fabrication, tandis que les facteurs exogènes se résument au type et à la géométrie de l'outil, aux conditions d'usinage, et d'entreposage.

3.5 L'ENERGIE ET L'INDUSTRIE DU BOIS

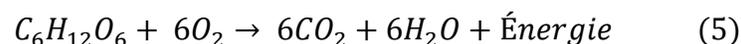
Avant qu'il soit un matériau de construction, de fabrication des meubles ou bien d'articles domestiques, l'homme a connu le bois sous une forme de combustible puis des armes et des abris. Avec le temps et le développement de la technologie, l'utilisation du bois a changé de vocation. Elle a laissé sa place comme une source d'énergie aux énergies fossiles (gaz, pétrole, charbon), l'énergie nucléaire, l'hydroélectricité et les énergies renouvelables. Maintenant le bois occupe une place différente dans notre quotidien et il est devenu un consommateur d'énergie plus qu'une source d'énergie.

En industrie, la transformation du bois nécessite d'importants processus physiques et chimiques très énergivores [116]. Ceci conduit à une consommation d'énergie très importante [117]. Les principaux procédés utilisés pour les produits du bois sont la coupe, le formage, le séchage, la fabrication et la finition [116]. Dans ce qui suit, on donnera des exemples sur la consommation énergétique dans l'industrie du bois.

L'industrie du bois : de la production à la consommation d'énergie

À l'origine, le bois est un matériau naturel qui peut produire de l'énergie (bûches) ou en consommer (fabrication de meubles). Cette particularité lui confère une position intermédiaire entre les végétaux et les matériaux solides. Il peut subir des transformations en tant qu'une plante végétale comme le séchage, le broyage et le brûlage, ou bien en tant qu'un matériau solide comme l'usinage, le pressage et le pliage. Cette particularité vient du fait que le bois est à la base une matière organique (contient du carbone). De plus, le bois est un matériau solide et hygroscopique.

Quand le bois est brûlé, le carbone se libère selon un processus inverse de la photosynthèse et une quantité d'énergie se produit sous forme de chaleur [118]:



Ces dernières années, une branche de l'industrie du recyclage s'est développée d'une façon remarquable. Cette branche dite « biomasses » a pour objectif de valoriser les déchets organiques

afin de produire des combustibles. Des produits à base de bois ou bien les bûches énergétiques sont des biomasses combustibles domestiques à grande performance.

D'autre part, l'industrie du bois est l'une des industries les plus énergivores non seulement à cause de la complexité et la diversité des processus, mais aussi à cause de la nature de la matière première. Le bois est fourni sous différentes espèces, tailles, et conditions (teneur en humidité). Ceci implique des processus additionnels comme le triage, le séchage et le taillage.

Les ressources d'énergie diffèrent d'une transformation à l'autre. Dans notre cas, on se concentre sur l'industrie des meubles ou bien la troisième transformation. Cette industrie utilise beaucoup de formes d'énergie, parmi lesquelles on cite :

- Électricité : la forme la plus répandue est l'énergie électrique, elle est utilisée en premier pour faire fonctionner les machines et les processus dans les usines de transformations du bois. On utilise l'électricité pour l'éclairage, le fonctionnement des appareils connexes et, dans certains cas, on utilise l'électricité pour le chauffage.
- Gaz : il est utilisé essentiellement pour le chauffage à cause de sa capacité de combustion et son prix (on ne considère pas le cas particulier de fluctuation des marchés) que ce soit pour les bâtisses ou bien pour le séchage du bois. De plus, la plupart des chariots élévateurs utilisés pour le transport du bois roulent avec le gaz.
- Énergie solaire : Dans certains cas, l'énergie solaire est utilisée pour le séchage du bois, comme une source principale dans les pays aux taux d'ensoleillement élevés ou secondaire dans les pays aux taux d'ensoleillement moins élevés.
- Énergie récupérée : Lors de l'utilisation des différentes machines et appareils ; une énergie sera dégagée sous forme de chaleur, cette chaleur influencera sur la température à l'intérieur de l'usine. D'autre part, dans les usines où la découpe constitue une opération importante et basique, comme les scieries et les usines de meubles, la poussière du bois résultante de ces opérations est un facteur crucial à gérer

non seulement parce qu'il faut garder l'environnement du travail sain, mais aussi parce que la récupération de la poussière peut être une source non négligeable de l'énergie.

Le rôle d'un système de dépoussiérage est d'éliminer la poussière dégagée par des opérations au niveau de certaines machines (scies, perceuses, centres d'usinage, etc.) pour fournir un environnement de travail confortable et respecter les règles de sécurité et de santé. Il prend les particules de poussière et les achemine à l'extérieur pour des possibilités d'élimination ou de réutilisation [119]. Ensuite, il récupère la chaleur de ces particules pour l'introduire dans l'usine afin de diminuer l'utilisation d'autres sources de chauffage comme le chauffage au gaz (Figure 19).

Le système de dépoussiérage consomme plus que la moitié de l'énergie électrique dans une usine et il est considéré avec le système d'air comprimé comme les deux systèmes les plus consommateurs d'énergie électrique dans une usine de meubles [120].

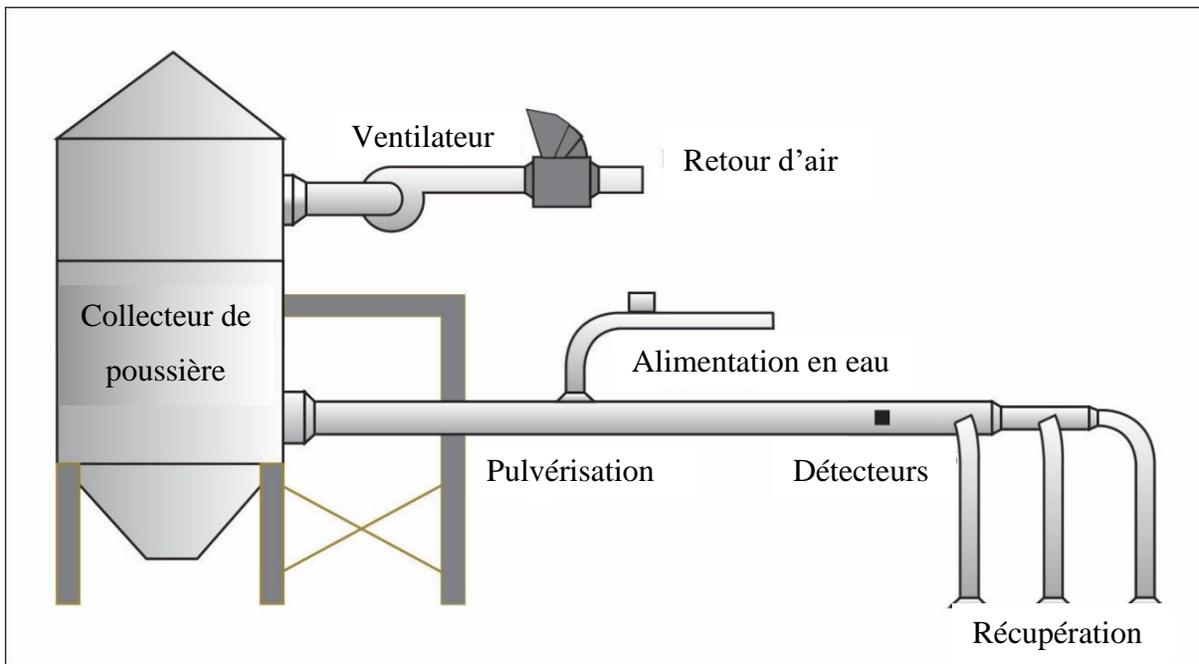


Figure 19. Schéma d'un système de dépoussiérage [119].

Parmi les opérations les plus consommatrices de l'énergie, le séchage vient en tête avec une estimation de plus de 40 % de l'énergie totale consommée dans une usine de bois.

3.6 TECHNOLOGIE DE SECHAGE

Le séchage est un processus complexe qui consiste à amener le bois à une teneur en humidité (TH) précise, tout en respectant les contraintes techniques et économiques [121]. Le séchage est réalisé à l'aide d'un équipement appelé séchoir. Il existe différents types de séchoirs tels que les sècheurs à bande, à convoyeur, à tambour, à lit fluidisé, sous vide, rotatifs, à pulvérisation et à cyclone [122], ou bien des séchoirs à gaz, électriques et solaires.

Durant le séchage, on procède par la détermination de la quantité d'humidité dans le bois qui est exprimée en pourcentage de masse de bois séché au four. Quatre méthodes pour déterminer la teneur en humidité sont couvertes par la norme ASTM D 4442-07 [123]. Les deux méthodes les plus courantes sont le séchage au four et électrique. La méthode de séchage au four a été la méthode la plus acceptée pour déterminer la teneur en humidité, mais elle est lente et nécessite de couper le bois. De plus, la méthode de séchage au four peut donner des valeurs légèrement supérieures au taux d'humidité réel avec des bois contenant des extraits. La méthode électrique est rapide, ne nécessite pas de découper le bois, et peut être utilisée sur du bois installé dans une structure. Cependant, il faut prendre grand soin d'utiliser et d'interpréter les résultats correctement. L'utilisation de la méthode électrique est généralement limitée à des valeurs d'humidité inférieures à 30 % [112].

3.6.1 Paramètres de séchage

Selon la température de séchage (T_s) de l'air utilisé, les procédés de séchage se classifient en trois catégories [121]:

- Le séchage à basse température ($T_s < 50^\circ\text{C}$) où l'on retrouve le pré-séchage, le séchage solaire et le séchage par déshumidification en début de cycle ;
- Le séchage à moyenne température ($50^\circ\text{C} < T_s < 100^\circ\text{C}$) où l'on retrouve le séchage par déshumidification, le séchage par air chaud climatisé à moyenne température, dit aussi « séchage conventionnel », et le séchage sous vide ;

- Le séchage à haute température ($T_s > 100^\circ\text{C}$) où l'on retrouve le séchage par air chaud climatisé à haute température, le séchage par ondes radio et le séchage par microondes.

Le procédé de séchage doit suivre des étapes définies au préalable pour aboutir aux résultats désirés, ces étapes sont appelées le programme de séchage, dans le but de maximiser le taux de séchage et minimiser les contraintes mécaniques et les variations d'humidité dans le bois. Il consiste à adopter une série de températures sèche et humide permettant de soumettre le bois à des conditions variables de température et d'humidité relative, adaptées aux différentes phases de séchage, à l'épaisseur des pièces et à l'espèce considérée [121].

Dans notre cas, le séchage est de type à basse température effectué à l'air ambiant.

3.6.2 Défauts liés au séchage

La plupart des défauts liés au séchage qui apparaissent dans les produits en bois sont classés comme fracture ou distorsion, gauchissement ou décoloration. Les défauts dans l'une de ces catégories sont causés par une interaction des propriétés du bois avec des facteurs de transformation. Le retrait du bois est principalement responsable des ruptures du bois et de la déformation de sa forme (Figure 20). La structure cellulaire et les extraits chimiques du bois contribuent aux défauts associés à une teneur en humidité inégale et à une couleur et texture de surface indésirable. La température de séchage est le facteur de traitement le plus important, car elle peut être responsable de défauts dans chaque catégorie [112, 124].

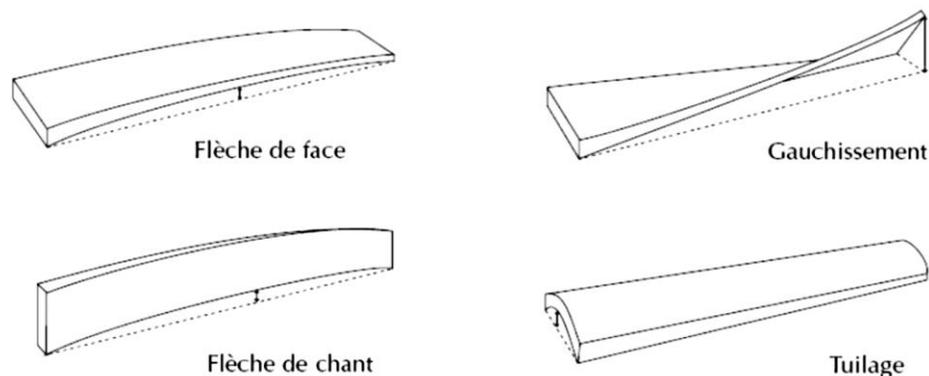


Figure 20. Les déformations les plus connues dans le bois [125].

CHAPITRE 4

ÉTUDE DU COMPORTEMENT THERMO-HYDRIQUE DES DÉRIVÉES DU BOIS

Dans ce chapitre, on abordera une étude approfondie de la matière première à base de bois entreposée dans l'aire commune de l'atelier. Ceci nous permettra de comprendre le comportement sous certaines conditions de température et d'humidité de l'air. Cette étude est divisée en quatre volets qui comprennent : formulation mathématique du phénomène, simulation numérique avec un logiciel commercial, étude expérimentale dans des conditions de laboratoire et la modélisation par les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA). À la fin, on comparera les résultats pour valider les approches et justifier leur utilisation dans les étapes suivantes.

Les essais expérimentaux dans le paragraphe §4.4 ainsi que l'étude de cas du chapitre 5 ont été effectués en collaboration avec SEREX, un centre de recherche spécialisé dans la transformation du bois et ses dérivées. Ce centre est doté d'installations de haute technologie permettant les travaux de recherche requis.

4.1 NOTION DE CONFORT THERMIQUE

Comme il a été expliqué dans la problématique, pour la majorité des entreprises manufacturières de la troisième transformation du bois (industrie des meubles) l'aire d'entreposage de la matière première est commune avec l'usine de transformation. Ceci nécessite, d'une part, un maintien de l'environnement adéquat pour l'utilisateur, appelé le « *confort thermique* » et d'autre part, un respect des exigences particulières d'entreposage et d'utilisation de la matière première qui se manifeste par la teneur en humidité (TH) qui doit être comprise entre 8% et 12%.

La Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) a établi un règlement sur la santé et la sécurité du travail concernant le confort thermique à l'intérieur d'un établissement. Elle le définit comme étant la satisfaction exprimée à l'égard de l'ambiance thermique du milieu environnant.

Pour l'environnement, il faut prendre en considération les points suivants :

- La température de l'air et ses fluctuations.
- Le rayonnement thermique.
- L'humidité.
- La vitesse de l'air.
- La température des objets avec lesquels la personne est en contact.

Le confort thermique est déterminé par des législations basées sur des recherches et des normes sur les conditions d'un environnement thermique acceptable. Elles sont définies dans la norme 55-1992 et son addenda 1995 (**ANSI/ASHRAE 55a-1995 de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.**), intitulée « Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy » [126]. Elles illustrent les conditions environnementales thermiques pour l'occupation humaine en activité par un graphique de la température opérationnelle et du taux d'humidité de l'air en hiver et en été (Figure 21).

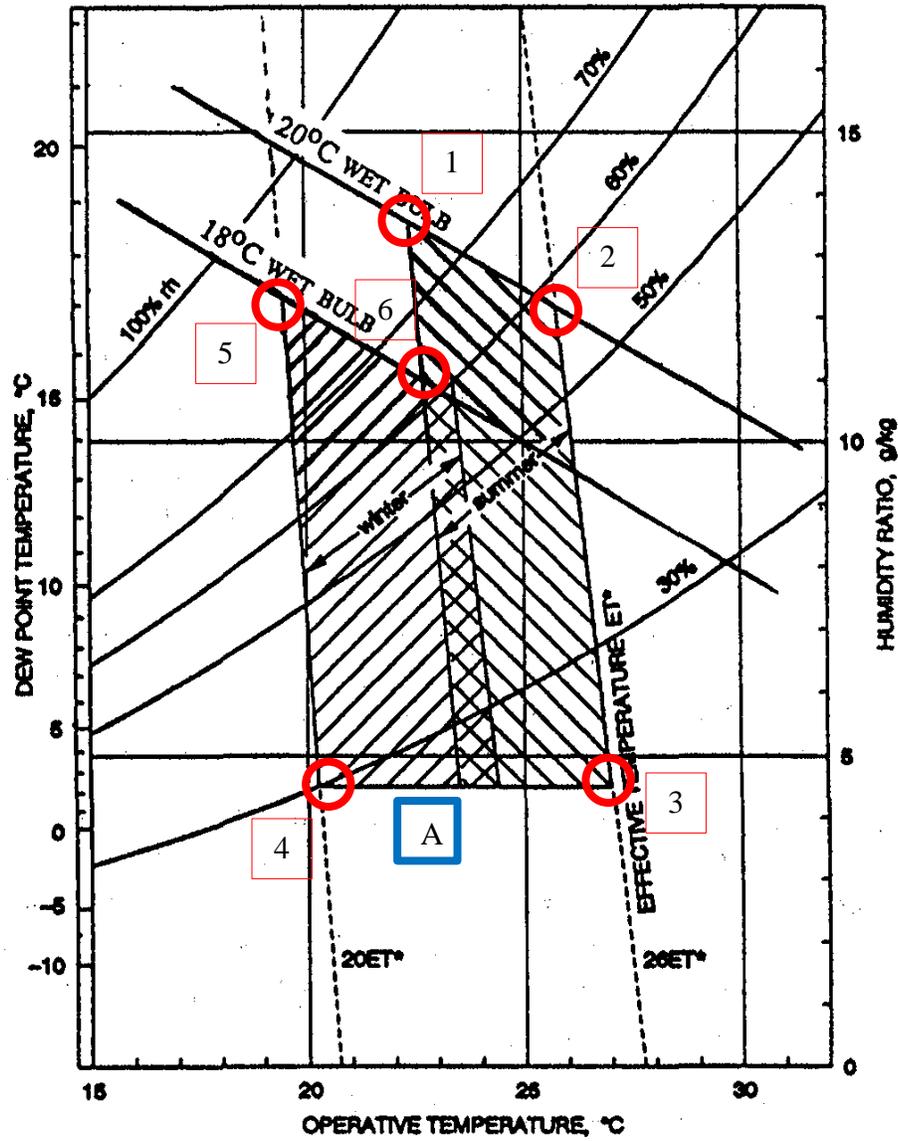


Figure 21. Plages acceptables de température et d'humidité opérationnelle pour des personnes portant des vêtements d'été et d'hiver typique pendant une activité légère [126].

Six points extrêmes ont été choisis représentant les limites de la zone de confort thermique. Ces points, identifiés en rouge à la Figure 21, seront utilisés dans les étapes suivantes de l'étude.

4.2 FORMULATION MATHÉMATIQUE

Dans cette section, on présentera les formules mathématiques et les équations qui décrivent le phénomène de transfert d'humidité dans le bois et dérivées ainsi que leurs limites.

4.2.1 Teneur en humidité (TH)

Comme mentionné dans le paragraphe §3.3.1, la teneur en humidité (TH) représente la quantité d'eau dans un matériau à base de bois, exprimé en pourcentage du poids du bois sec. Dans notre cas, on prendra la teneur en humidité à base sèche d'un échantillon de bois en appliquant la formule de l'équation (3).

4.2.2 Teneur en Humidité d'Équilibre (THE)

Une teneur en humidité (TH) stable dans le temps à une température et humidité relative données est appelée teneur en humidité à l'équilibre (THE) [127]. La relation entre la teneur en humidité à l'équilibre et l'humidité relative à une température constante est illustrée dans un diagramme appelé isotherme de sorption. Le terme sorption présente deux phénomènes physiques, *adsorption* et *désorption* (Figure 22).

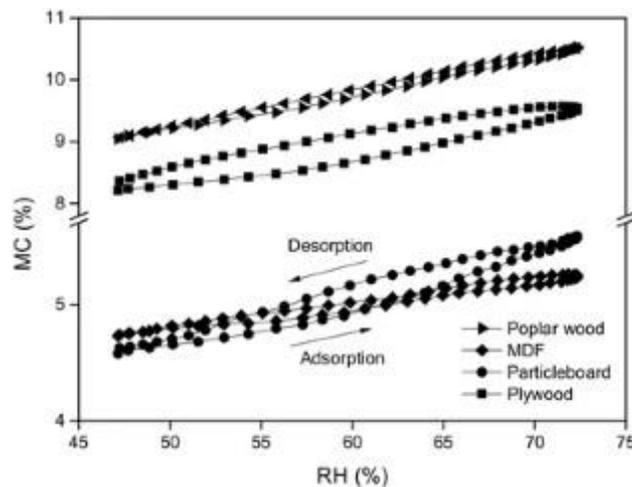


Figure 22. Isothermes de sorption (adsorption et désorption) en fonction de l'humidité relative pour le bois de peuplier et trois types de panneaux à base de bois [128].

Les isothermes de sorption sont différentes d'un matériau à un autre (bois massif plus important que les dérivées du bois) et d'un état à une autre (désorption plus importante que celui d'adsorption). Typiquement, les panneaux de particules et les panneaux de fibres de densité moyenne (MDF) ont une teneur en humidité inférieure de 1 à 2 % à une température et une humidité donnée par rapport au bois massif [129] (Figure 22).

Une illustration qui regroupe la teneur en humidité à l'équilibre, l'humidité relative et la température est présentée à la Figure 23.

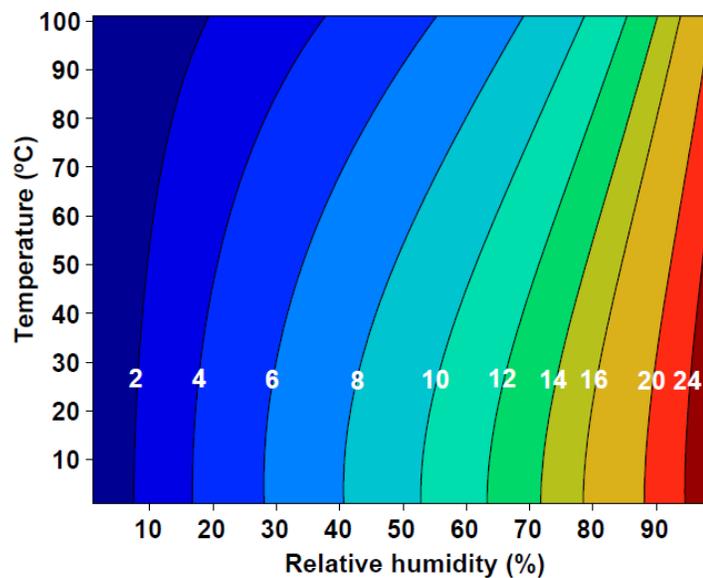


Figure 23. La teneur en humidité à l'équilibre (THE) pour le bois en fonction de la température et de l'humidité relative [106].

Mathématiquement, Nelson (1983) [130] a développé un modèle basé sur l'énergie libre de Gibbs pour décrire le comportement de sorption des matériaux cellulosiques. Ce modèle est de la forme [131] [130]:

$$\frac{RH}{100} = \exp \left\{ \left(-\frac{W_w}{R \cdot T} \right) \exp \left[A \left(1.0 - \frac{EMC}{M_v} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

La forme inverse de l'équation (6) donne :

$$EMC = M_v \left\{ 1.0 - \frac{1}{A} \ln \left[\left(-\frac{R.T}{W_w} \right) \ln \left(\frac{RH}{100} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

RH = humidité relative en pourcentage ;

W_w = poids moléculaire de l'eau (18 g.mol⁻¹) ;

R = constante universelle des gaz (1,9858 cal. mol⁻¹ . K⁻¹)

T = température absolue (K)

A = logarithme naturel (ln) de l'énergie libre de Gibbs par gramme d'eau échangée lorsque l'humidité relative approche de zéro (ΔG_0 cal/g) $A = \ln(\Delta G_0)$

M_v = une constante du matériau qui se rapproche du point de saturation de la fibre pour la désorption (%).

4.2.3 Profil de l'humidité et diffusion

Le mouvement de l'eau entre l'intérieur et la surface du bois désigne *la diffusion*. La résistance interne au mouvement de l'humidité est caractérisée par le coefficient de diffusion D, qui dépend de plusieurs facteurs, dont la teneur en humidité du bois et la température.

La distribution d'humidité du bois, M, en fonction du temps est basée sur une solution de différence finie de la deuxième loi de Fick. Elle dépend des variables directes (temps t, distance x et de la diffusion D) [132, 133].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(M) \frac{\partial M}{\partial x} \right] \quad (8)$$

D(M) = coefficient de diffusion en fonction de M (m²/s), t = temps (s), x = distance (m).

L'équation (8) est un résultat de l'approximation de la première loi de Fick et les équations de Stamm dont la solution peut être graphique ou algébrique. Les deux solutions sont basées sur des conditions isothermes [132]. Les études précédentes montrent qu'il n'existe pas une formule

algébrique directe pour définir la distribution de l'humidité en fonction du temps et de la distance. Cependant, il existe des méthodes de résolution basées sur des techniques d'approximation.

4.2.4 Méthodes de résolution mathématique du problème

L'équation (8) est l'une des formules les plus utilisées dans les équations de diffusion ou de flux de chaleur, mais les approximations peuvent influencer la précision. Elle est basée sur des conditions isothermes. Elle peut être résolue par sa transformation en une équation descartisée par la méthode des différences finies suivie d'une solution algébrique itérative en utilisant un calculateur numérique. De plus, l'utilisation d'une méthode donnant une solution analytique de l'équation (8) est une alternative plus compliquée [127].

Dans la littérature, les méthodes utilisées pour représenter ce phénomène sont classées en deux grandes catégories 1) les modèles basés sur une approche potentielle ; et 2) les modèles multi composants [134]. Voici quelques exemples des travaux précédents qui traitent de ce phénomène et les méthodes de résolution de l'équation (8).

Crank et Park [135] ont proposé une méthode pour déterminer le coefficient de diffusion D , basée sur une combinaison d'expériences et de techniques mathématiques. La procédure expérimentale consiste à observer les variations de poids (la vitesse d'absorption) d'une feuille d'épaisseur l dans une atmosphère de vapeur maintenue à température, pression, et vapeur constante. La formule mathématique a été déduite d'une première approximation.

Plus tard, en 1956, Crank [136] a développé une nouvelle formule en utilisant une succession d'approximations. Cette solution est basée sur la condition limite selon laquelle la surface atteint un équilibre immédiat de la teneur en humidité avec l'atmosphère environnante. Elle permet de déterminer la dépendance du coefficient de diffusion par rapport à la teneur en humidité lorsque la moitié de la sorption totale s'est produite.

Luikov [137] décrit le phénomène comme étant un transfert de chaleur et de masse dans les corps capillaires poreux. Le transport par les forces capillaires est représenté en termes de gradients de la teneur en humidité et de la température. Il a proposé une forme destinée au cas de séchage. La

forme repose sur les hypothèses de vitesse constante dans des conditions de pression constante, le résultat est un processus de transfert de chaleur et de masse quasi stationnaire.

Les travaux de Simpson [138] traitent au début la prédiction du taux en humidité à l'équilibre du bois massif en utilisant les données fournies par « The Wood Handbook of the U.S. Forest Products Laboratory (1955)» et en comparant les différentes théories pour trouver la mieux adaptée, il a adopté une procédure expérimentale consistant à mesurer l'absorption d'humidité entre 0% d'humidité et une série de huit teneurs en humidité plus élevées en appliquant une méthode numérique qui comprend l'utilisation de la méthode des différences finies pour résoudre l'équation de diffusion avec un coefficient de diffusion qui dépend de la concentration. Son analyse a montré que le coefficient de diffusion augmente avec la teneur en humidité. Entre 2,5% et 18,0 % d'humidité, le coefficient de diffusion augmente d'un facteur 8.

Liu [139] a développé une équation alternative qui sépare le coefficient de diffusion D du coefficient d'émission de surface S . L'utilisation de D et de S peut fournir des méthodes numériques qui traitent des cas où la surface n'atteint pas un équilibre immédiat. L'auteur a développé une procédure analytique pour séparer les coefficients de diffusion et d'émission de surface dans la solution de Newman de l'équation de diffusion en régime instationnaire de la deuxième loi de Fick à partir d'une seule courbe de séchage du bois tandis que les méthodes précédentes nécessitaient deux à quatre courbes de séchage. Il a montré que la nouvelle procédure réduit la démarche expérimentale de 50 % et plus. De plus, la séparation des deux coefficients permettra d'étudier la dépendance du coefficient de diffusion à la concentration d'humidité et celle du coefficient d'émission de surface à la viscosité et à la vitesse du flux d'air dans tout environnement de séchage spécifié.

Simpson et Liu [140] ont publié un article qui traite la dépendance du coefficient de diffusion de l'eau dans le tremble (*Populus sp.*) par rapport à la teneur en humidité (TH) entre 0% et 18 % à 43°C. D'abord, ils ont élaboré une étude sur les travaux précédents qui traitent la relation entre le teneur en humidité (TH) et le coefficient de diffusion D et les méthodes numériques d'approximation. Ensuite, ils ont présenté une application de la technique mathématique de Crank et Park [135] et réanalysé les données expérimentales de Simpson [138]. Ils ont élaboré une méthode numérique

pour résoudre l'équation de diffusion avec un coefficient de diffusion dépendant de la teneur en humidité qui nécessite une série d'expériences d'adsorption. Ils ont constaté que le coefficient de diffusion augmente de façon exponentielle avec la teneur en humidité. La méthode numérique comprend des conditions aux limites variables, définies par le coefficient de diffusion de surface, afin de pouvoir examiner l'effet de la teneur en humidité à l'équilibre de la surface. Les courbes expérimentales de teneur en humidité en fonction du temps sont prédites par la méthode numérique et ont montré un écart moyen de 0,2% de teneur en eau, l'écart le plus important étant de 0.7% de teneur en eau.

En se basant sur les équations de transport dans les milieux continus, Whitaker [141] traite le phénomène de séchage comme étant un transport de chaleur et de masse dans un milieu poreux. Dans son approche, il a étudié la teneur en eau et de la température en fonction de l'espace et du temps, il a proposé une approche à composantes multiples qui repose sur :

- Le mouvement de l'eau à travers d'un milieu poreux rigide sous les formes d'eau liquide, de vapeur d'eau et de mélange gazeux (vapeur d'eau + air).
- Le gradient de la pression totale est considéré comme la force motrice du mélange gazeux et le gradient de pression à l'intérieur du liquide est considéré comme la force motrice de l'état liquide.
- Le flux de vapeur d'eau est obtenu en prenant la composante du mélange gazeux en ajoutant une expression de la diffusion de la vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient de pression et de la concentration de vapeur dans le but de décrire les équations macroscopiques et les interactions multi-composants au niveau microscopique.
- L'équilibre énergétique est traité par l'application d'équations qui contribuent à chaque composant du système.

Néanmoins, cette théorie est limitée par des restrictions et hypothèses.

Siau a introduit dans son ouvrage [127] plusieurs concepts concernant les relations entre le bois et son environnement. Surtout, il a présenté et expliqué les théories du transport non isotherme

de l'eau liée dans l'état stable et instable en tenant compte de la relation bois-structure. Dans ses hypothèses, il a considéré la diffusion comme étant un flux de masse moléculaire sous l'influence d'un gradient de concentration et le gradient du potentiel hydrique est considéré comme la force motrice du transport de l'eau en phase liquide et en phase vapeur y compris l'eau liée dans le bois.

Dans le cas des corps à faces parallèles, il s'est basé sur les travaux de Crank [136] ainsi que sur le calcul et le traçage du poids de l'échantillon en fonction de la racine carrée du temps de sorption pour déterminer la diffusivité moyenne D , en calculant la pente de la partie linéaire de la courbe de sorption. Il va déduire une formule utile qui détermine les coefficients de diffusion de l'humidité par la méthode de l'état instable.

Stanish et al. [142] ont développé une approche qui combine la modélisation mathématique et l'expérience. Le modèle mathématique dédié à la simulation du séchage dans les milieux poreux hygroscopiques est basé sur l'identification de tous les modes de transport significatifs, tout en donnant à chaque mode une expression mathématique quantitative. Des expériences de taux de séchage ont été réalisées en utilisant un matériau hygroscopique (bois) et non hygroscopique (solide céramique poreuse) qui sont ensuite comparées graphiquement aux simulations du modèle afin de vérifier les approches. Ils ont constaté que les prédictions du modèle mathématique concordent avec les résultats expérimentaux.

Les travaux de Fortin [143] dans le cadre d'une thèse de doctorat ont mis en évidence la relation potentielle matricielle de la teneur en eau et les propriétés d'écoulement de l'eau de bois dans le cas des teneurs en humidité élevées. Fortin a montré que ce facteur est une fonction exponentielle de la teneur en humidité. De plus, il est probable qu'il soit une fonction de la température. Un concept lié au potentiel hydrique, le potentiel chimique, a également été utilisé pour décrire le mouvement de l'eau liée dans le bois. En se basant sur la loi de Darcy, il a proposé un modèle de séchage du bois en conditions isothermes qui repose sur le concept du potentiel hydrique, afin de caractériser l'eau du bois sous ses trois phases d'énergie libre. Il détermine la conductivité hydrique effective à l'état de saturation intégrale, ou la perméabilité, de la pruche de l'ouest. Un ensemble d'expériences ont été menées pour étudier les propriétés du bois pour l'application de ces théories. Les limitations de

son étude se trouvent dans à la gamme des teneurs en humidité très hautes et le temps assez longs pour établir un mouvement de masse en régime de flux constant.

Sur cette base, Cloutier et Fortin dans [144] ont pris le même concept du potentiel hydrique et l'ont appliqué aux relations bois-eau en le combinant avec des techniques expérimentales. Ils ont établi une relation entre la teneur en eau-potentiel hydrique du bois dans des conditions saturées du bois au séchage (désorption) en tenant compte de toute la gamme des valeurs de la teneur en humidité. Comme procédure expérimentale, ils ont utilisé deux méthodes différentes. La première a été utilisée pour les taux d'humidité élevés et la deuxième pour les taux d'humidité faibles. Les résultats obtenus démontrent que ces méthodes peuvent être utilisées en combinaison afin d'établir la relation dans toute la gamme des taux d'humidité. Ils ont constaté que le potentiel hydrique a augmenté avec la température pour une teneur en humidité donnée à cause d'un autre paramètre, non étudié dans cet article, qui serait la conductivité effective de l'eau.

En 1993, Cloutier et Fortin ont publié un article [134] basé sur leurs travaux précédents. Ils ont proposé un modèle qui décrit le mouvement de l'humidité dans le bois pendant le séchage dans le cas isotherme en utilisant le gradient de potentiel hydrique comme force motrice et la conductivité effective de l'eau comme coefficient de transport d'humidité. La conductivité effective de l'eau est une fonction de la teneur en humidité, de la température et de la direction de l'écoulement. Les résultats ont montré que la conductivité effective de l'eau augmente d'une façon exponentielle avec la teneur en humidité et la température tandis que la relation le flux-gradient est linéaire ce qui a confirmé la validité du modèle avec les conditions expérimentales.

Ganev et al. [133] ont étudié l'effet de la teneur en humidité et de la densité du panneau sur le mouvement d'humidité dans des panneaux de fibres à densité moyenne (MDF) en examinant, d'une part, l'effet de la densité et de l'état de sorption sur les isothermes de sorption et d'autre part, l'effet de la teneur en humidité et de la densité des panneaux sur la conductivité effective de l'eau et le coefficient de diffusion. Dans cette étude, le MDF est supposé être un matériau poreux non gonflant comme le cas de celui utilisé par Cloutier et Fortin [134]. La composition de base du MDF est l'épinette noire verte (*Picea mariana*), considérée comme une matière première typique pour le MDF dans la région. Les expériences consistent à exposer les échantillons de MDF à des humidités

relatives contrôlées et utiliser par la suite une technique standard pour déterminer les isothermes de sorption et la méthode du profil instantané pour déterminer la conductivité effective de l'eau. Les résultats obtenus ont montré que dans l'intervalle entre 0% HR et 100% HR, la THE du MDF varie entre 0% et 20%. Pour n'importe quel niveau de densité, la différence de TH est de 2% (désorption plus importante que l'adsorption). Cependant, l'impact de la densité s'est avéré relativement faible et proportionnel au niveau du TH. Ils ont constaté qu'en adsorption, plus le taux d'humidité est élevé, plus la conductivité effective de l'eau est faible. De plus, la conductivité effective de l'eau est plus élevée pour les densités de 540 kg/m³ et 600 kg/m³ que pour une densité de 800 kg/m³, et inversement en désorption. Mais tant en adsorption qu'en désorption, les échantillons de MDF avec des niveaux de densité plus élevés s'équilibraient à des niveaux plus élevés de TH, ce qui signifie que la TH a un effet plus fort que la densité sur la conductivité effective de l'eau.

Cai et Deku [145] ont étudié la possibilité d'utiliser la méthode des éléments finis (MEF) pour décrire les processus de transfert d'humidité dans les panneaux de particules. Ils ont opté pour une approche comparative entre une méthode expérimentale et une méthode par les éléments finis afin de déterminer les paramètres physiques de quatre types de panneaux de particules. La méthode expérimentale consiste à prélever des mesures de poids des échantillons et déduire par la suite les concentrations de chaque échantillon puis utiliser la méthode de régression linéaire et les formules de Siau [127] afin de déterminer les coefficients de diffusion en régime stationnaire D et les coefficients d'émission de surface de l'humidité pour chaque panneau de particules. Cette méthode a démontré que la relation entre la diffusion D et la teneur en eau M peut être exprimée avec un polynôme de degré trois. La méthode des éléments finis est basée sur la loi de Fick (Eq 8) et les équations de Galerkin, la discrétisation a été faite en deux dimensions et la formule générale sera une matrice de n équations. Pour comparer les résultats, l'erreur dans cette étude a été estimée à 10%.

Cai et Wang [146] ont élargi l'étude pour déterminer les coefficients de diffusion à l'état stable (régime stationnaire ou permanent) et à l'état instable (régime instationnaire ou transitoire) en optant pour une démarche purement expérimentale. Les résultats des expériences ont démontré que la diffusion est à la fois perpendiculaire et parallèle à la surface du panneau, et le coefficient de

diffusion D peut être exprimé en fonction de la teneur en humidité M (%) avec un polynôme du troisième degré. De plus, les coefficients de diffusion à l'état stable parallèlement à la surface du panneau sont de 10 à 20 fois plus grands que ceux perpendiculaires à la surface du panneau et que les coefficients de diffusion à l'état instable parallèlement sont de l'ordre de 3 à 5 fois plus grand que ceux perpendiculaires à la surface du panneau dans les panneaux de particules d'essai. Ils ont constaté que la raison de cette différence est due à l'orientation des copeaux dans les panneaux de particules.

Wu et Suchsland [132] ont abordé le cas de diffusion dans les panneaux superposés, ils ont pris trois configurations, la première est constituée des panneaux de particules, la deuxième est la superposition d'un panneau de particules avec un seul panneau stratifié à haute pression (appelé HPL) et la troisième est la superposition d'un panneau de particules avec un panneau stratifié à haute pression en avant et un autre en arrière (connu sous le nom de support). Ces configurations sont très utilisées en industrie à cause des avantages économiques et esthétiques. L'objectif de cette étude était d'examiner le comportement de sorption du substrat de panneaux de particules et des superpositions HPL et la répartition de l'humidité à l'intérieur de différents panneaux en fonction d'humidité relative de l'air. Pour cela, l'étude a été divisée en deux parties dont la première vise à développer des données expérimentales sur les isothermes de sorption et les coefficients de diffusion des panneaux stratifiés à haute pression et les panneaux de particules, et la deuxième vise à développer une procédure pour prédire TH et sa distribution dans un panneau de particules superposées. Les mesures de la teneur en humidité à l'équilibre (EMC) et les coefficients de diffusion à différentes valeurs d'humidité relative (HR) montrent une concordance avec les isothermes de sorption de Nelson. C'est-à-dire, le modèle de Nelson [130] décrit bien le phénomène de sorption pour les matériaux à base de bois avec des différences de valeurs dues principalement au matériau, mode de sorption et position. Un modèle basé sur la théorie de la diffusion a été développé pour prédire la TH et la distribution de l'humidité pour un panneau composite en bois multicouches. La procédure analytique a démontré qu'une distribution d'humidité très asymétrique s'est développée à l'intérieur d'un substrat de panneau de particules en raison de l'ajout d'un revêtement HPL sur l'une de ses surfaces. La comparaison entre le modèle de prédiction de la TH pour les trois configurations et les données expérimentales est favorable. À la fin, ils ont recommandé que cette méthode, couplée

à l'analyse des contraintes internes, puisse être utilisée dans l'évaluation du potentiel de gauchissement d'un panneau composite de bois multicouches.

Wu (1998) [131] a appliqué la formule de Nelson pour des matériaux à base de bois pour déterminer les isothermes de sorption, la formule de Nelson (équation (6)) présentée dans §4.2.2 décrit la relation entre la teneur en humidité à l'équilibre THE , la température T et l'humidité de l'air RH pour un matériau donné (bois). Dans cet article, Wu a démontré que cette formule est applicable pour n'importe quel matériau à base de bois, la différence est causée par les paramètres intrinsèques du matériau (dans la formule de Nelson sont A et M_v). Une procédure expérimentale a été établie en prenant des échantillons des matériaux de : panneau à copeaux orientés (OSB), panneau de particules, panneau de fibres à densité moyenne (MDF), panneau de fibres dur (HB), panneau stratifié à haute pression (HPL et HPL Backer), et le bois (Pinus). Pour chaque échantillon; il a fixé la température à $25^{\circ}C$ et a varié l'humidité de l'air (RH). Il a utilisé une analyse de régression pour mesurer la teneur en humidité à l'équilibre, en tant que variable dépendante et transformée, RH^T , dans le cas d'adsorption et de désorption. La conclusion de ses travaux montre que la formule de Nelson est applicable pour tout matériau à base de bois.

Wu et Xiong [147] ont proposé un modèle qui simule le processus de diffusion de l'humidité dans les panneaux MDF destinés aux meubles. Ce modèle linéaire, empirique et simple relie le coefficient de diffusion, la position et la pression du vapeur dans une seule équation.

Le Tableau 4 présente un récapitulatif de ces méthodes et leurs formules ainsi que les points forts et les limites de chaque méthode.

Tableau 4

Méthodes utilisées dans la littérature pour déterminer la distribution d'humidité M et/ou la diffusion D pour les panneaux à base de bois.

Année	Auteur (s)	Expression	Avantages	Limites
1949	Crank et Park [135]	$D = (0.049 a^2)/t_{0.5}$	➤ Facile dans l'application et le calcul.	➤ Température limitée; ➤ Erreur importante; ➤ Beaucoup de paramètres manquants.
1956	Crank [136]	$D = (0.1976 l^2)/t_{0.5}$	➤ Facile dans l'application et le calcul.	➤ Erreur importante ➤ Beaucoup de paramètres manquants
1966	Luikov [137]	$\frac{M_c - M_s}{M_0 - M_e} = \frac{1}{2} K i_m (1 + \varepsilon P_n K_0 L_u)$ $\frac{T_s - T_c}{T_a - T_0} = \frac{1}{2} K i_m \varepsilon K_0 L_u$ <p>K_{im}, ε, P_n, K_0 et L_u: paramètres Variables</p>	➤ Résolution analytique ➤ Formule générale ➤ Considérant à la fois le transfert de masse et de chaleur.	➤ En fonction de nombreux paramètres ➤ Différence entre la surface de l'échantillon et le centre

1974	<p>Simpson [138]</p>	$\frac{\partial S}{\partial T} = D \frac{\partial^2 S}{\partial X^2}$ $\frac{\hat{S}_m - S_m}{\Delta T} = D \left(\frac{S_{m+1} - 2S_m + S_{m-1}}{(\Delta X)^2} \right)$ <p>S: Moyens traitant la concentration en fonction du coefficient de diffusion.</p> <p>S'_m et S_m sont les valeurs de S aux points X = m(ΔX) at T = (n + 1) ΔT and</p> <p>T = n (ΔT), respectivement, et S_{m+1} et S_{m-1} sont les valeurs de S à X=(m+1)(ΔX) et X = X=(m-1)(ΔX) à T = n (ΔT).</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Série d'approximations répétées jusqu'à ce que certaines valeurs expérimentales et calculées concordent ➤ Bonne correspondance avec les résultats d'expérience 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Grand nombre d'approximations successives. ➤ Un ordinateur haute vitesse est nécessaire pour appliquer la méthode
1977	<p>Whitaker [141]</p>	$\left(\frac{\partial S}{\partial t} \right) = \nabla \cdot (D \nabla S)$ <p>D: coefficient de diffusion de séchage</p> <p>S: saturation d'humidité fractionnaire</p> $D = K_e + \left[\left(\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial S} \right) \frac{D_{\text{eff}}^{(1)}}{\epsilon_\gamma} \right]$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Résolution analytique. ➤ Basé sur le transfert simultané de chaleur, de masse et de quantité de mouvement dans les milieux poreux 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Nombreuses suppositions (paramètres négligeables) et approximations pour résoudre le problème. ➤ Limitations par restrictions et hypothèses ➤ Beaucoup de calculs

1984	Siau [127]	$\dot{D} = \frac{E^2 L^2}{5.10t}$ <p>L = épaisseur dans le sens de l'écoulement, cm; t = temps, sec. E = terme sans dimension. D' = coefficient de diffusion qui comprend le coefficient de diffusion D et coefficient d'émission surfacique S</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Équation analytique ➤ Simple à calculer 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inclure la variable inconnue S (coefficient d'émission de surface) qui est difficile à déterminer
1986	Stanish [142]	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_a) = -\frac{\partial}{\partial z}(n_a)$ <p>(L'équation de conservation de l'air)</p> $\frac{d}{dt} \begin{vmatrix} \rho_a \\ \rho_m \\ T \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathcal{A} \\ \mathcal{M} \\ \mathcal{e} \end{vmatrix}$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les résultats simulés et expérimentaux ont révélé des changements mineurs dans l'ensemble de paramètres du modèle. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Résolution numérique par éléments finis
1989	J.Y Liu [140]	$D = \frac{-0.165 (a/2)^2}{0.701 dt^{0.5} / dE + 2.05 t_{0.5}}$ $S = \frac{0.701 D}{(a/2) \left[Dt / (a/2)^2 - 0.196 \right]}$ $\frac{t_{0.5}}{0.2} \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{(L/2)}{D} + \frac{3.5}{S}$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Séparation du coefficient d'émission surfacique S et la diffusion D pour obtenir une compréhension globale des phénomènes 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Erreur importante ➤ Beaucoup de paramètres manqués

1991	Simpson et J.Y Liu [140]	$D = A \exp(B m)$ A et B sont des coefficients déterminés par régression non linéaire	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Traiter l'humidité élevée; ➤ Facile à appliquer. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Procéder par deux approximations ➤ A et B valeur numérique changeant avec approximation ➤ Paramètres ajustés par expérience
1993	Cloutier et Fortin [134] (basé sur les travaux [143], [144] et [137])	$[K_x]_{xi,tj} = \frac{\left[\frac{\partial I}{\partial t}\right]_{xi,tj}}{\left[\frac{\partial \psi}{\partial x}\right]_{xi,tj}}$ $I = \int_{xq=0}^x C dx$ <p>$[K_x]_{xi,tj}$ = conductivité effective de l'eau dans le sens d'écoulement x à la position xi et le temps tj;</p> <p>$[\partial I/\partial t]_{xi,tj}$ = - (s'écouler à travers le plan xi au temps tj);</p> <p>$[\partial \psi/\partial x]_{xi,tj}$ = ψ gradient à xi et tj.</p> <p>C: concentration d'humidité ψ: Potentiel hydrique</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Combiner résolution analytique et expérimentale ➤ Moins d'erreurs et plus de précision que les autres formules. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ De nombreuses notions et équations à prendre en compte. ➤ Nécessite un petit écart entre les points, donc plus de ressources informatiques.
1992	L. Cai et S. Deku [145]	$D' = b_0 + b_1 M + b_2 M^2 + b_3 M^3$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Exprimer la diffusion D'et en fonction de la teneur en eau M avec un polynôme de degré trois. ➤ Utilisation de la méthode MEF avec ses avantages 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Négliger la résistance de la surface dans le régime instationnaire. ➤ Erreur de l'ordre de 10 % entre l'expérience et MEF.

1994	L. Cai et F. Wang [146]	<p>1) Les coefficients de diffusion de mouvement d'humidité perpendiculaire (d_{\perp}) et parallèle (d_{\parallel})</p> <p>2) Utilisation des équations de Liu [140] et Siau [127] pour déterminer le coefficient de diffusion</p> <p>3) Équation de régression $Y=b+aX$</p> <p>a,b en fonction des paramètres des matériaux et de la direction</p> <p>4) Déterminer une relation simple entre l'humidité M, la diffusion D et le temps t, pour chaque cas (exemple: $M = 1.4774 t^{0.178}$ avec coefficient de corrélation $r = 0.9710$)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Traiter à la fois l'état stable et l'état instable; ➤ Déterminer le coefficient de diffusion D sur la direction parallèle et perpendiculaire; ➤ Déterminer la relation linéaire entre la diffusion D et l'humidité M pour chaque cas. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pas d'équation générale (équation pour chaque cas); ➤ Beaucoup d'approximations ; ➤ Utilisation de l'expérience et de l'analyse graphique pour déterminer la diffusion D pour l'état stationnaire (donnant les résultats en valeurs directes).
------	-------------------------	---	---	--

1996	Wu and Suchsland [132]	<p>Déterminez la teneur en humidité MC de deux manières et comparez-les:</p> <p>1- Prédire: Eq (8) et D</p> $D = \left(\frac{\pi L^2}{4} \right) \left[\frac{E_2 - E_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right]^2$ $E_i = (W_i - W_1) / (W_E - W_1)$ <p>W_i = poids de l'échantillon au moment "i"</p> <p>W_1 = poids initial de l'échantillon,</p> <p>W_E = poids de l'échantillon à l'équilibre,</p> <p>L = demi-épaisseur de l'éprouvette.</p> <p>1) Mesure : Utilisation de l'équation de Simpson [138] pour déterminer le coefficient de diffusion</p> <p>2) Comparaison entre deux approches</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bon accord entre TE prédit et mesuré testé sur trois panels différents. ➤ Démontrer que le support peut réduire l'étendue du différentiel d'humidité et du déséquilibre des contraintes de gonflement 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Le profil d'humidité est supposé uniforme sur toute l'épaisseur de l'échantillon ➤ Utiliser des résultats expérimentaux qui ne peuvent pas entièrement créer les conditions supposées.
2001	Wu Q, Xiong M [147]	$K(p,x) = 0.00431 - 0.00107p + 0.00192x + 0.0005p^2 - 0.0192x^2 + 0.000206.x.p$	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pas de gros calcul et de formule complexe; ➤ Petite différence entre l'expérience de fin de calcul pour les petites différences de température; ➤ Validation des travaux antérieurs. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ne pas considérer la vaporisation de l'eau libre et la formation de phase vapeur à l'intérieur du bois.

4.2.5 Développement du modèle mathématique

Notre modèle est basé sur les travaux de Wu et Xiong [147] qui définissent le coefficient de diffusion $K(p,x)$ comme :

$$K(p,x) = 0.000431 - 0.00107p + 0.00192x + 0.0005p^2 - 0.00192x^2 + 0.000206.x.p \quad Eq. (9)$$

L'humidité relative de l'air (HR) peut être exprimée comme le rapport de la pression de vapeur partielle dans l'air à la pression de vapeur saturante en pourcentage [127] :

$$RH = \frac{P}{P_{sat}} \quad Eq. (10)$$

$$P = RH \times P_{sat} \quad Eq. (11)$$

D'autre part, Monteith et Unsworth ont développé une nouvelle forme de la formule de Tetens pour des températures supérieures à 0°C donnant la pression de saturation en kPa [148] :

$$P_{sat} = e_s(T) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27(T - 273)}{T - 36}\right) \quad Eq. (12)$$

De l'équation. (11) et (12); la pression P (kPa) est définie par :

$$P(RH, T) = RH \times 0.611 \exp\left(\frac{17.27(T - 273)}{T - 36}\right) \quad Eq. (13)$$

À partir des équations (9) et (13) le coefficient de la diffusion K peut être exprimée en fonction de l'humidité relative RH, la température T et la position x comme ci-dessous :

$$\begin{aligned}
K(RH, T, x) = & 0.000431 - 0.00107 \left(RH \times 0.611 \exp \left(\frac{17.27 (T - 273)}{T - 36} \right) \right) + 0.00192x \\
& + 0.0005 \left(RH \times 0.611 \exp \left(\frac{17.27 (T - 273)}{T - 36} \right) \right)^2 - 0.00192x^2 \\
& + 0.000206 \cdot x \cdot \left(RH \times 0.611 \exp \left(\frac{17.27 (T - 273)}{T - 36} \right) \right) \quad Eq. (14)
\end{aligned}$$

Cependant, le coefficient de diffusion K dans la formule de Wu et Xiong [147] est en (g/cm.mmHg.h) tandis que dans la plupart des ouvrages et logiciels de simulation utilisent le système international MKSA pour exprimer le coefficient de diffusion D (m²/s), alors une analyse dimensionnelle s'impose. L'analyse dimensionnelle nous permet de valider l'homogénéité de la formule par ses unités.

$$\begin{aligned}
D &= \frac{L^2}{T} \quad et \quad K = \frac{M}{L \times P \times T} \\
\frac{D}{K} &= \frac{L \times P \times T}{M} \times \frac{L^2}{T} = \frac{L^3 \times P}{M}
\end{aligned}$$

Pour homogénéiser l'équation, on prévoit un coefficient sans dimension α à déterminer par la suite. Dans ce cas, la formule sera comme suit :

$$\frac{D}{K} = \alpha \times \frac{L^3 \times P}{M}$$

P (M L⁻¹ T⁻²) : unité de la pression Pascal (Pa), L : unité de la longueur en mètre (m), M : unité de la masse (kg). Le rapport L³/M représente 1/ ρ considéré comme une constante.

$$K = \left[\frac{g}{cm \times mmHg \times h} \right] = \left[\frac{0.001 Kg}{0.1m \times 133.32 Pa \times 3600 s} \right] = 2.084 \times 10^{-8} \left[\frac{Kg}{m \times Pa \times s} \right]$$

$$\alpha = 2.084 \times 10^{-8}$$

$$D = 2.084 \times 10^{-8} \times \frac{P}{\rho} K$$

La forme finale de l'équation (14) sera :

$$\begin{aligned}
 D(RH, T, x) = & 2.084 \times 10^{-8} \times \frac{RH \times 611 \exp\left(\frac{17.27(T - 273)}{T - 36}\right)}{\rho} \\
 & \times \left[0.000431 - 0.00107 \left(RH \times 611 \exp\left(\frac{17.27(T - 273)}{T - 36}\right) \right) + 0.00192x \right. \\
 & + 0.0005 \left(RH \times 611 \exp\left(\frac{17.27(T - 273)}{T - 36}\right) \right)^2 - 0.00192x^2 \\
 & \left. + 0.000206 \cdot x \cdot \left(RH \times 611 \exp\left(\frac{17.27(T - 273)}{T - 36}\right) \right) \right] \quad Eq. (15)
 \end{aligned}$$

Par la suite, cette formule sera adaptée et utilisée dans la simulation en tenant compte des conditions de notre étude, à savoir les autres paramètres d'entrée, les matériaux à base de bois (mélamine et MDF) et la géométrie des échantillons.

4.3 SIMULATION DU PHENOMENE DE TRANSFERT

La plupart des recherches décrivent le phénomène de séchage dans les dérivées du bois comme étant un transfert de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux. Le transfert simultané de chaleur et de masse à travers le milieu poreux des matériaux à base de bois joue un rôle important dans une large mesure pour la réduction de la teneur en humidité (TH) et la capacité de transformation [127]. Pour simuler les phénomènes, un modèle Multiphysics a été développé via le logiciel COMSOL (COMSOL Multiphysics Version 6.0) modélisant le transport couplé de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux (*ham*) basés sur la méthode des éléments finis (FEM). Normalement, ce modèle peut décrire le transfert d'humidité dans la mélamine et le MDF. Cependant, il est nécessaire d'ajuster les paramètres pour se rapprocher du cas réel. Les paramètres à régler sont les paramètres dépendant de la température et du matériau tels que la diffusivité, la porosité et la densité. Le choix de ce logiciel s'explique par la simplicité et la performance du couplage des modèles de transfert de chaleur et de masse dans les matériaux à base de bois [149].

4.3.1 Équations gouvernantes

Fondamentalement, les matériaux à base de bois sont considérés comme des milieux poreux. Dans COMSOL, les équations gouvernantes sont incluses dans les modèles mathématiques utilisés par le logiciel, mais nous devons ajuster les paramètres pour obtenir un modèle adéquat proche de la réalité. Les hypothèses suivantes sont considérées pour déterminer les équations gouvernantes :

- 1) Le transfert de masse se fait sous forme de vapeur d'eau.
- 2) Seuls les transferts naturels de chaleur et de masse sont responsables du séchage (séchage naturel).
- 3) La diffusion est une équation approximative (Éq.15).

Les phénomènes à prendre en considération sont « Transfert de chaleur en milieu poreux » et « Transport d'humidité en milieu poreux ».

4.3.1.1 Transfert de chaleur dans les milieux poreux

Les milieux poreux sont caractérisés par le mouvement de l'humidité de l'intérieur du matériau vers l'air ambiant. Le transfert de chaleur est utilisé pour augmenter la température du produit, ce qui conduit à un état thermodynamique qui favorise le transfert d'humidité dans les milieux poreux. Le transfert de chaleur dans l'air humide est déterminé comme suit :

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad Eq. (16a)$$

$$q = -k_{eff} \nabla T \quad Eq. (16b)$$

4.3.1.2 Transport de l'humidité dans les milieux poreux (modèle de diffusion)

Dans notre cas, le transport de l'humidité est modélisé en considérant le flux de vapeur comme la seule forme de transport de l'eau. Cependant, la température et l'humidité relative seront les paramètres qui influencent le plus l'humidité finale et le temps de séchage des matériaux à base de bois, les équations suivantes décrivent les phénomènes de transfert d'humidité.

$$\frac{\partial w(\phi_w)}{\partial t} + \rho_g u_g \cdot \nabla \omega_v + \nabla g_w = G \quad Eq. (17a)$$

$$w(\phi_w) = \varepsilon_p s_g \rho_g \omega_v \quad Eq. (17b)$$

$$\omega_v = \frac{M_v \phi_w c_{sat}}{\rho_g} \quad Eq. (17c)$$

$$g_w = \rho_g D_{eff} \nabla \omega_v \quad Eq. (17d)$$

4.3.1.3 Paramètres d'entrée

Les paramètres initiaux sur COMSOL sont définis à partir du matériau (bibliothèque des matériaux). Toutefois, l'utilisateur a la possibilité -voire l'obligation- de modifier ces paramètres selon le phénomène à étudier. Dans le cas des produits dérivés du bois ; les paramètres d'entrée peuvent varier en fonction d'autres grandeurs.

Selon les études précédentes, la capacité thermique spécifique lors du transfert de chaleur dans les milieux poreux varie en fonction de la température. La diffusion dans le phénomène de transport d'humidité dans les milieux poreux varie aussi en fonction de la température, de l'humidité relative de l'air et de la position dans le matériau. Le Tableau 5 détaille les paramètres initiaux et aux frontières du modèle à simuler.

Tableau 5
Paramètres de simulation

Paramètre	Type	Définition	Valeur / Expression	Référence
T	Conditions aux limites	Température (K)	292.15-300.15	Présente étude
RH	Conditions aux limites	Humidité Relative	20% - 65%	Présente étude
T_ini	Conditions initiales	Température initiale (K)	291.15	Présente étude
MC_ini	Conditions initiales	Taux d'humidité initial	18%	Présente étude
MC_fin	Conditions aux limites	Taux d'humidité final	8%, 12%	Présente étude
D		Diffusion	Équation (15)	Présente étude
CP_melamine		Capacité thermique spécifique de la Mélamine (J/kg.K)	$6 \cdot 714 \times T - 604 \cdot 53$	[150, 151]
CP_MDF		Capacité thermique spécifique du MDF (J/kg.K)	$3.867 \times T + 103 \cdot 1$	[152, 153]

Les conditions aux limites représentent les valeurs de la température et l'humidité relative de chaque condition limitant la zone du confort thermique en ajoutant les valeurs du TH ciblées (8% et 12%), tandis que les conditions initiales seront les mêmes conditions appliquées à la partie expérimentale (voir §4.4.3.1).

4.3.2 Géométrie et génération de maillage

La géométrie choisie des échantillons est un parallélépipède rectangle en 3D de dimension 200 x 100 x 15.8 (mm³) pour la mélamine et 200 x 200 x 12.7 (mm³) pour le MDF. Cette géométrie est la même utilisée dans la partie expérimentale, l'objectif de ce choix est de reproduire les phénomènes de la façon la plus fidèle afin de les comparer par la suite avec le modèle expérimental. Le maillage prédéfini a une géométrie de tétraédrique libre, il sera généré automatiquement par COMSOL, la taille du maillage est choisie selon la précision et la vitesse de calcul (Figure 24).

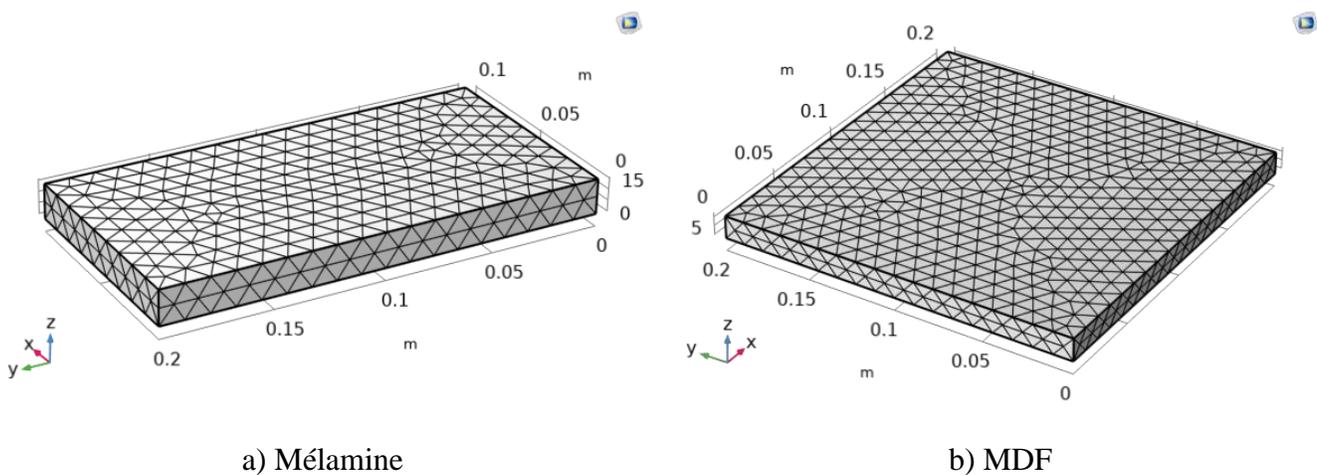


Figure 24. Maillage du modèle à simuler a) Mélamine, b) MDF.

Par conséquent, une étude de la sensibilité au maillage s'impose. Elle assure le meilleur choix de maillage. L'étude de sensibilité consiste à chercher un compromis entre la précision et la vitesse de calcul. On a choisi un point au centre afin de comparer la valeur du TH obtenue à partir des équations (7) et (15) avec celle de la simulation, ensuite calculer l'erreur comme étant la différence entre ces deux valeurs. Pour les conditions initiales et les conditions aux limites, on a choisi les paramètres du Tableau 4 avec un temps de 120h, jusqu'à la stabilité. Chaque variation de la taille du

maillage nous permet de déduire les valeurs de l'erreur et le temps de calcul, les valeurs sont présentées dans le Tableau 6.

Tableau 6
Résultats de calcul de la sensibilité au maillage.

Test #	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max												
Taille du maillage (mm)	14	100	10.8	60	8	38	5.6	30	3.6	20	2	16	0.8	11	0.3	7	0.04	4
Temps de calcul	14m21s		4m58s		6m20s		4m57s		7m53s		11m22s		45m31s		1h50m40s		2h15m21s	
Erreur relative	21.67%		19.22%		16.90%		15.28%		11.69%		4.70%		2.50%		Erreur		Erreur	

Le graphe de la Figure 25 montre à la fois la variation de l'erreur et le temps de calcul en fonction de chaque type de maillage.

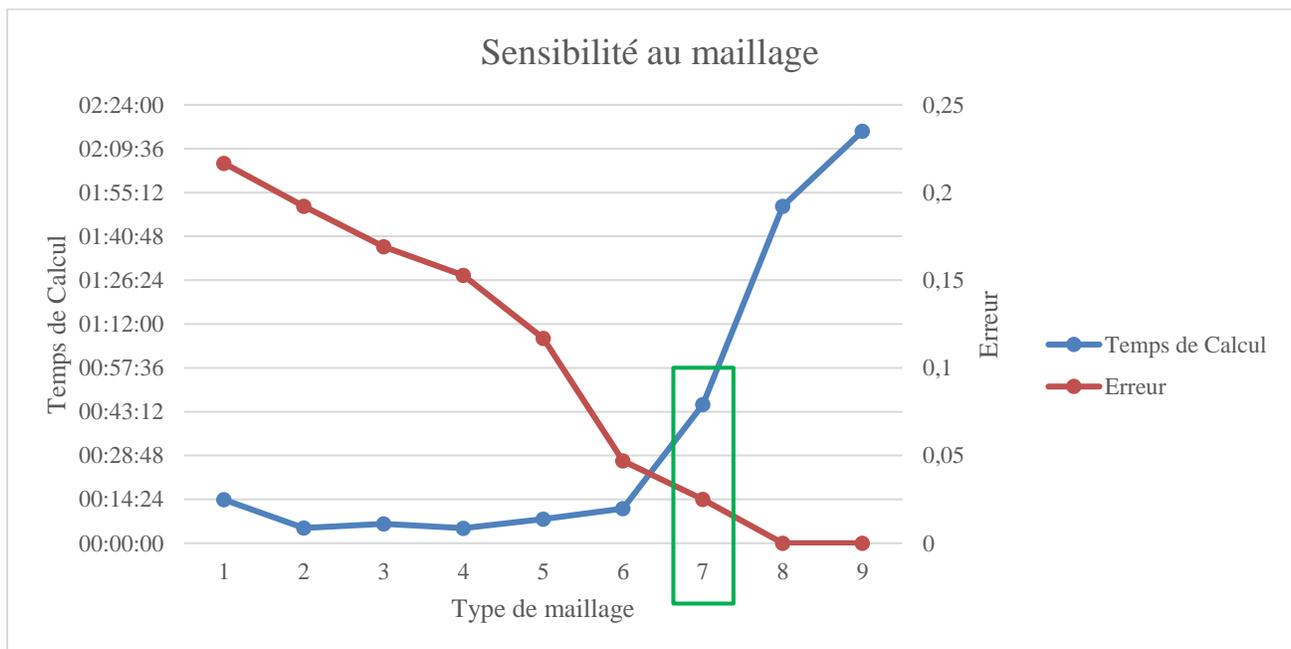


Figure 25. Graphique de la sensibilité au maillage.

En analysant le Tableau 6 et la Figure 25, on choisira le maillage qui offre un compromis entre la précision et la vitesse de calcul. Le choix du type du maillage sera le maillage N° 7 qui correspond au maillage « **Plus fin** » dans COMSOL.

4.3.3 Résultats de simulation

Les résultats obtenus par simulation sont exprimés sous deux formes :

1) Distribution de la chaleur et de l'humidité : Pour montrer l'évolution du phénomène à l'intérieur des matériaux. On a procédé par une découpe transversale au centre du panneau qui illustre le comportement tridimensionnel du phénomène. Les Figures 26 et 27 montrent les changements d'état dans le cas du transfert combiné de chaleur et de masse dans la mélamine et le MDF respectivement. Selon la variation des paramètres du Tableau 4, le transfert de chaleur illustre la distribution et l'évolution de la température en fonction du temps de 0 h à 2 h pour atteindre l'état d'équilibre qui dépend des conditions initiales. L'atteinte de l'équilibre thermique est plus rapide pour le MDF que pour la mélamine en raison de la différence de capacité thermique entre la mélamine et le MDF pour une température finale entre 292.15K et 300.15K ($C_p(\text{mélamine}) > C_p(\text{MDF})$). De plus, les bordures de la pièce sont influencées en premier avant le centre. Le transfert d'humidité pour le MDF est plus rapide que pour la mélamine. Aussi, le transfert d'humidité prend plus de temps que le transfert de chaleur. Dans le cas où le transfert d'humidité est combiné au transfert de chaleur, le séchage est plus rapide que dans le cas du transfert d'humidité seul (délai de séchage de plus de 240 heures).

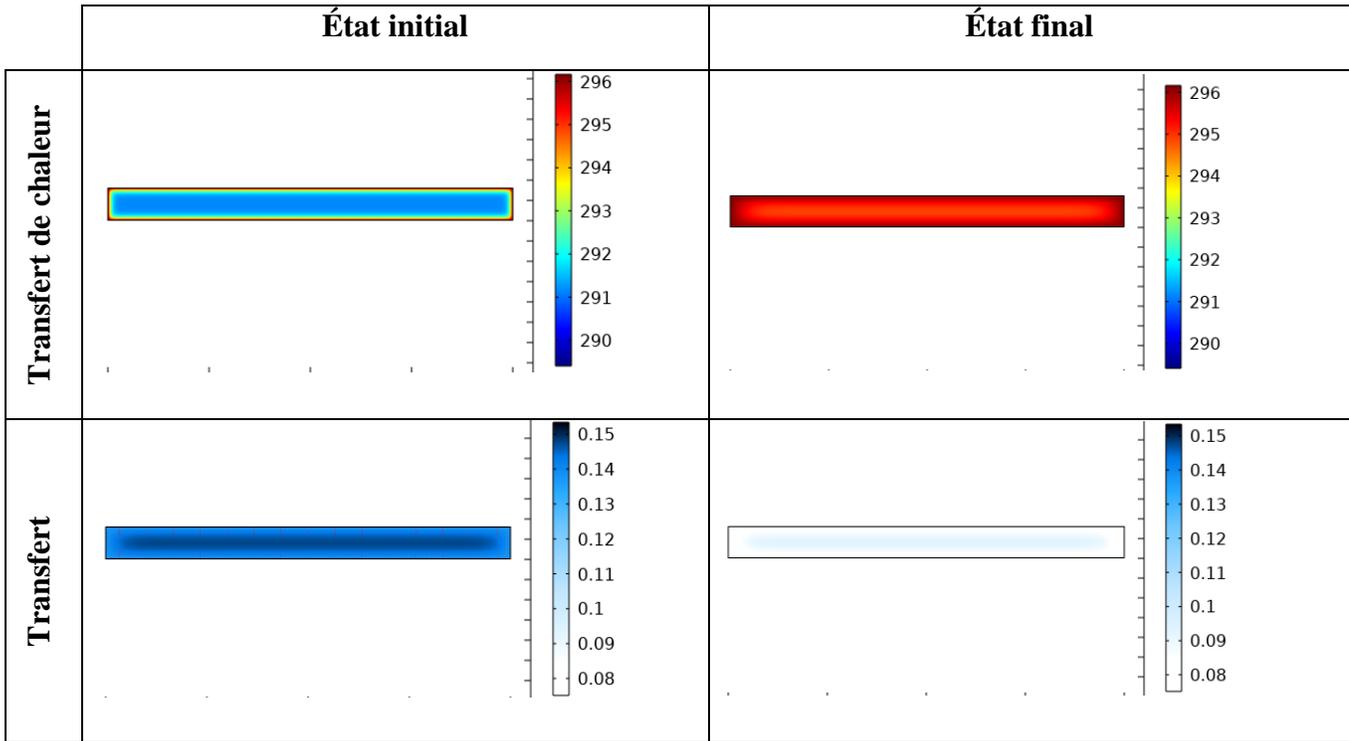


Figure 26. Transfert de chaleur et d'humidité dans la mélamine.

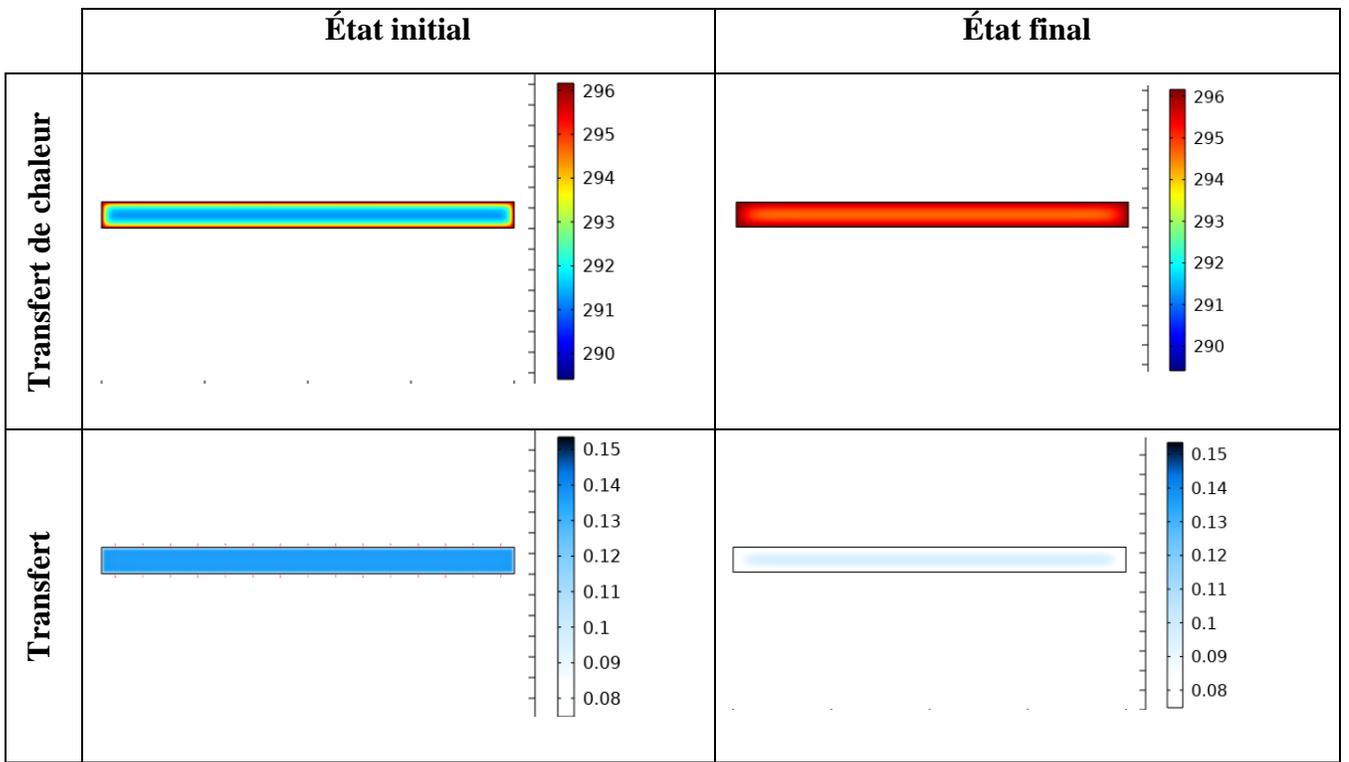


Figure 27. Transfert de chaleur et d'humidité dans le MDF.

2) Graphique de la teneur en humidité : les Figures 28 et 29, pour le point de contrôle de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustrent le processus de séchage divisé en deux étapes. La première étape est caractérisée par la chute soudaine de la TH en peu de temps (2 h), ce phénomène est dû au transfert combiné de chaleur et d'humidité. La deuxième étape est caractérisée par une diminution progressive due à la stabilisation de la température à travers la pièce jusqu'à atteindre la THE ou les valeurs ciblées. L'allure générale de la courbe est la même pour toutes les conditions. La différence entre les conditions se manifeste dans le temps de chaque étape et dans la TH finale qui dépendra des conditions et de la nature du matériau.

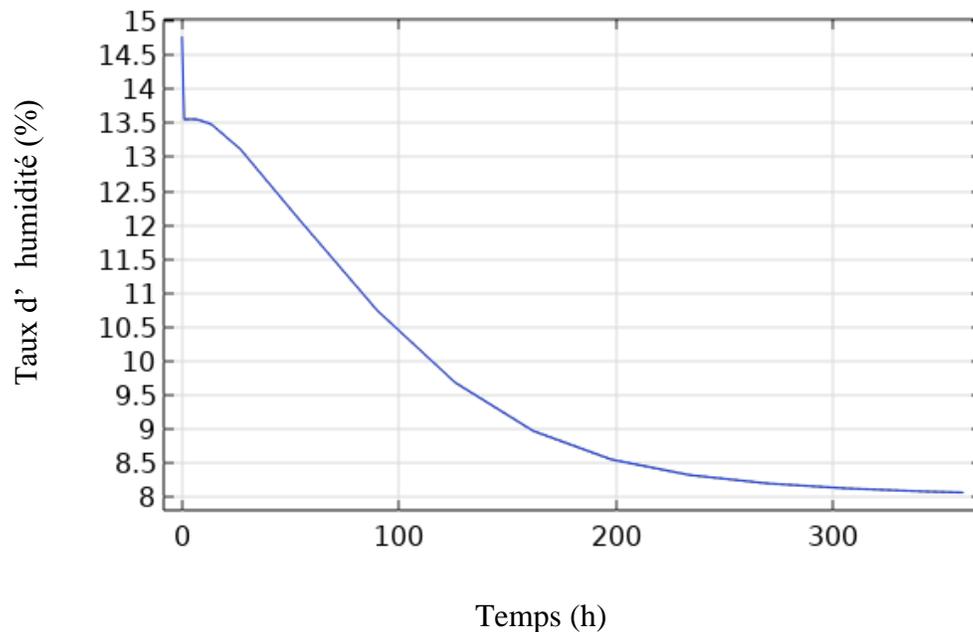


Figure 28. Simulation de l'évolution de la teneur en humidité au cours de séchage pour la mélamine.

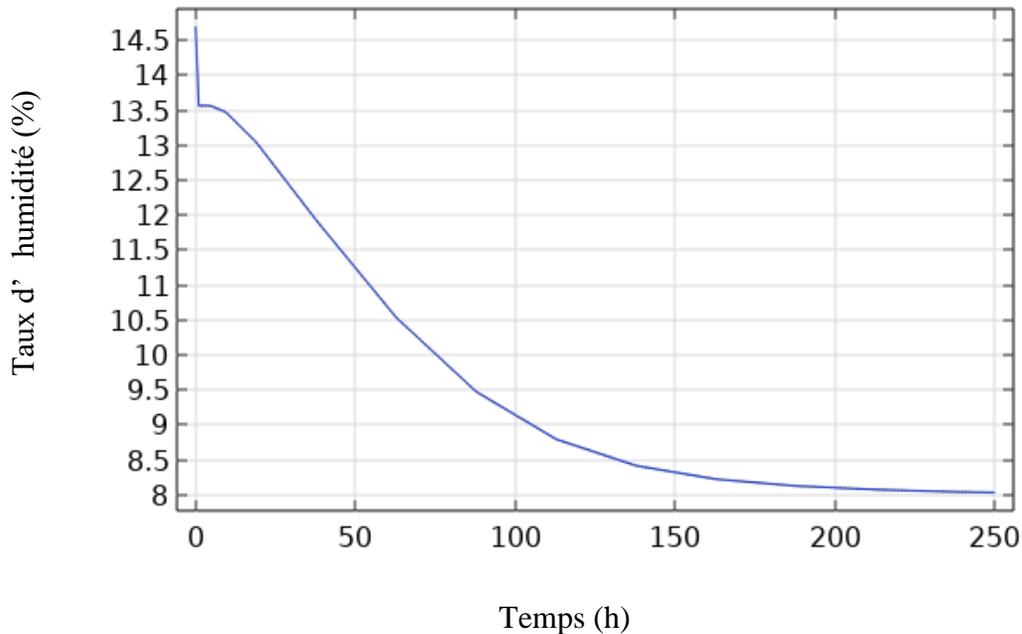


Figure 29. Simulation de l'évolution de la teneur en humidité au cours de séchage pour le MDF.

Les résultats des simulations nous ont permis de constater les points suivants :

- Les facteurs qui influencent la simulation sont liés aux matériaux (hétérogénéité, nature ou taille des particules, additifs), aux équations d'approximations, et à la complexité du phénomène.
- La température joue le rôle principal dans le processus de séchage, en particulier sur le temps de séchage.
- La simulation nous a permis de montrer l'évolution de la TH à l'intérieur des matériaux et de déterminer les étapes du phénomène.
- Comme tous les matériaux à base de bois, la mélamine et le MDF ont le même comportement général envers leur environnement, la différence de structure fait la différence dans les valeurs numériques.

4.4 ÉTUDE EXPERIMENTALE SUR LA MATIERE PREMIERE

L'interprétation de phénomènes physiques à l'aide de formules mathématiques dont la solution dépend de simulations numériques présente une lacune puisque la résolution numérique est une solution approchée qui nécessite une validation des résultats. Ceci nous amène à adopter plutôt une approche expérimentale. Cette étape consiste à définir expérimentalement la variation de la TH dans les deux types de matériaux à base de bois (mélamine et MDF). Les deux types de matériaux sont soumis à des conditions environnementales contrôlées (température, humidité relative de l'air).

L'objectif de cette partie est de déterminer expérimentalement l'évolution de la TH du bois en fonction du temps de séchage pour les deux matériaux à base du bois sous des conditions particulières de confort thermique afin qu'ils soient admissibles aux différentes transformations, autrement dit, déterminer le temps nécessaire pour atteindre la TH exigée à partir des teneurs initiales extrêmes. Dans ce cas, nous visons à réduire la consommation d'énergie pour le chauffage en utilisant les ressources énergétiques minimales pour le maintien du confort thermique et en même temps de participer au séchage des deux matériaux.

4.4.1 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale (plan d'expérience) ainsi que les méthodes d'analyses des résultats sont choisies en fonction du phénomène étudié, les études précédentes [102, 104, 125, 128, 133] déterminent les procédures expérimentales associées au phénomène afin de déterminer le comportement du bois et ses dérivées sous l'effet des conditions externes, ces conditions sont déduits à partir du graphique de la Figure 21, les points 1-2-3 présentent les limites de la zone d'été, et 4-5-6 les limites de la zone d'hiver. Il existe une zone intermédiaire entre la zone d'été et la zone d'hiver illustrée par A. Toutes les conditions de confort thermique sont comprises dans la zone limitée par les points 1-2-3-4-5 et 6. Par conséquent, les paramètres d'entrée initiaux de l'expérience (conditions) adoptée dans l'étude sont les six points extrêmes.

En transformant l'humidité absolue en humidité relative, nous avons obtenu les points initiaux présentés dans Tableau 7.

4.4.2 Méthodologie expérimentale

À l'énoncé des expériences, notre connaissance des matériaux et de leur comportement est relativement faible. Ainsi, pour déterminer les comportements nécessaires des matériaux à base de bois dans des conditions de confort thermique, nous allons adopter une approche expérimentale basée sur trois étapes :

1) Étape 1 : Séchage jusqu'à l'obtention de la masse d'anhydride m_{sec} . Nous mettons tous les échantillons dans un séchoir à 80°C et nous mesurons quotidiennement le poids avec une balance de précision jusqu'à ce qu'il soit stable. Le poids final est la masse d'anhydride m_{sec} qui représente TH = 0% (Figure 31).

2) Étape 2 : Maximum d'humidité. Après avoir obtenu les échantillons d'anhydrite, nous les plaçons dans une chambre de conditionnement dans des conditions extrêmes d'air humide (23°C, 95%) et nous obtenons la masse maximale mouillée m_{wet} en mesurant le poids jusqu'à ce qu'il soit stable (Figure 32).

3) Étape 3 : Application des paramètres d'essai. L'étape finale consiste à appliquer les paramètres d'essai définis dans le Tableau 7 dans le but de déterminer le temps nécessaire pour atteindre les valeurs de 12% ou 8% d'humidité et illustrer la variation du TH en fonction du temps.

À chaque étape, nous procédons par mesure du poids, en utilisant une balance de précision et en appliquant l'équation 3 pour déterminer TH. Pour chaque condition, nous prévoyons deux échantillons, nous calculons la moyenne dans le but d'avoir plus de précision et nous illustrons les résultats dans le graphique présenté à la Figure 34. Enfin, nous présentons les résultats dans le Tableau 10 afin de les discuter et de les interpréter.

Les échantillons sont identifiés selon la forme iX_j

i : numéro de l'essai (1 à 2), pour la moyenne nous utilisons la lettre M

X : matériau (M pour MDF, P pour mélamine)

j : numéro de la condition de test (1 à 6)

Avant de commencer, il faut valider les paramètres d'essai de l'étape 3 par l'application de l'équation 4 afin d'assurer que la tendance se situe dans les valeurs souhaitées (humidité entre 12% et 8%). Si nous trouvons une condition qui ne satisfait pas la tendance, nous choisissons le point le plus proche, par exemple : si le point de tendance est de 12.5% qui est supérieur à 12%, nous le corrigeons en prenant le plus proche qui satisfait 12%. Les paramètres corrigés sont présentés dans le Tableau 7.

4.4.2.1 Matériaux

Les échantillons de test ont été prélevés dans des matériaux disponibles dans le commerce, deux types de matériaux ont été utilisés : MDF et Mélamine. Pour chaque condition, nous avons deux spécimens pour calculer la moyenne (Figure 30).

1) MDF :

Les échantillons MDF ont les dimensions de 200 (longueur) x 200 (largeur) x 12.7 mm (épaisseur). Nombre d'échantillons : 12 (1M1, 1M2, 1M3, 1M4, 1M5, 1M6, 2M1, 2M2, 2M3, 2M4, 2M5, 2M6). Densité = 728 kg/m³ (calculée).

2) Mélamine :

Les échantillons de mélamine ont les dimensions de 200 (longueur) x 100 (largeur) x 15.8 mm³ (épaisseur). Nombre d'échantillons : 12 (1P1, 1P2, 1P3, 1P4, 1P5, 1P6, 2P1, 2P2, 2P3, 2P4, 2P5, 2P6). Densité = 725 kg/m³ (calculée).

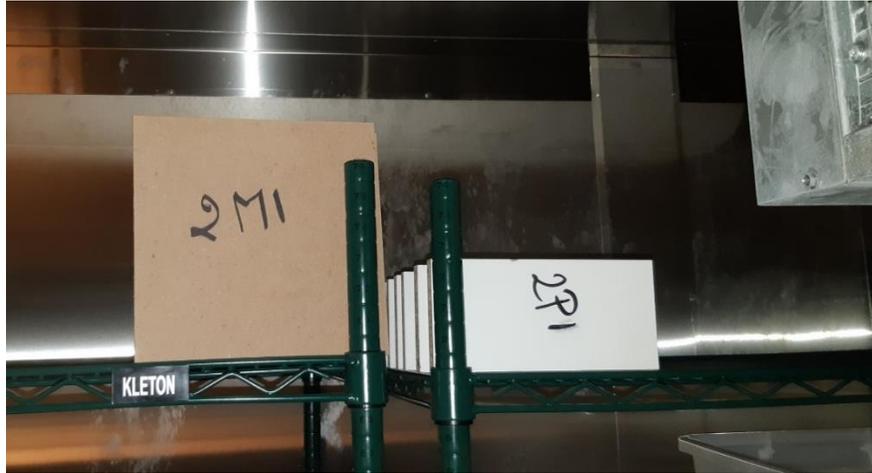


Figure 30. Échantillons d'essai (M pour MDF et P pour mélamine) - dispositifs d'essai.

4.4.2.2 Appareils de test

1) Balance de précision (Pesée)

Pour déterminer l'humidité, nous procédons par mesure de poids et application de l'équation

2. Nous avons utilisé une balance de précision (précision 0.01 g, max 1000 g).

2) Séchoir

Les paramètres d'expérience de la première étape (80 °C) sont assurés par le séchoir (Figure 31).



Figure 31. Séchoir.

3) Chambre de conditionnement

Les paramètres d'expérience de la deuxième et de la troisième étape sont assurés par la chambre de conditionnement.



(a)



(b)



(c)

Figure 32. Chambre de conditionnement : (a) vue extérieure (b) interface de contrôle (c) vue intérieure.

4.4.3 Résultats expérimentaux

4.4.3.1 Validation des paramètres (pour l'étape 3)

L'application de l'équation 7 nous donne les points de tendance (teneur en humidité à l'équilibre THE). Pour la mélamine et le MDF, nous remarquons que les conditions 1 et 5 ne satisfont pas les conditions d'admissibilité (plus de 12%). Des corrections sont donc nécessaires pour être admissibles. Après la correction, les paramètres d'essai adoptés sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7
Paramètres d'essai initiaux et corrigés de l'expérience.

Test #	Conditions initiales	THE Mélamine (%)	THE MDF (%)	Décision	Conditions corrigées
1	23 °C & 77 %	15.0	14.0	À corriger	23 °C & 65 %
2	26 °C & 57 %	11.1	10.2	Accepté	26 °C & 57 %
3	27 °C & 20 %	5.8	4.9	Accepté	27 °C & 20 %
4	20 °C & 31 %	7.5	6.6	Accepté	20 °C & 31 %
5	19 °C & 87 %	18.5	17.5	À corriger	19 °C & 65 %
6	23 °C & 63 %	11.9	11.0	Accepté	23 °C & 63 %

N.B : Généralement, la correction est faite en diminuant l'humidité relative de l'air parce que la variabilité de l'humidité relative de l'air est moins influente sur la TH que la température et, d'autre part, il y a une relation directe entre l'humidité relative de l'air et la TH du bois. Si l'humidité relative de l'air diminue l'humidité du bois diminue et vice versa.

Les conditions # 3 et # 4 sont inférieures à la valeur admissible (8%), mais nous les validons, car la valeur de la TH maximale dans l'étape 2 sera supérieure à 12%, plus d'explications seront données ultérieurement.

4.4.3.2 Résultats de l'étape 1 : Atteindre la masse anhydride (TH = 0%) - tous les échantillons

Les masses des échantillons anhydrides sont mentionnées dans le Tableau 7.

Tableau 8
Échantillons d'anhydride (TH = 0%).

MDF				Mélamine			
Premier test		Deuxième test		Premier test		Deuxième test	
Échantillon	Poids (g)	Échantillon	Poids (g)	Échantillon	Poids (g)	Échantillon	Poids (g)
1M1	355.18	2M1	370.91	1P1	222.45	2P1	227.16
1M2	362.58	2M2	371.37	1P2	237.39	2P2	233.99
1M3	359.39	2M3	378.33	1P3	228.89	2P3	217.08
1M4	369,35	2M4	371.08	1P4	239.87	2P4	235.74
1M5	372.93	2M5	375.71	1P5	222.88	2P5	235.27
1M6	378.50	2M6	385.99	1P6	236.58	2P6	224.70

4.4.3.3 Résultats de l'étape 2 : Atteindre l'humidité maximale - tous les échantillons

Placer les échantillons dans des conditions extrêmes (23°C et 95%) nous permet de déterminer l'humidité maximale pour la mélamine et le MDF et le temps nécessaire pour atteindre l'état stable. Ce phénomène est appelé "adsorption". Le Tableau 9 nous donne les valeurs de la TH pour la mélamine et le MDF dans les conditions extrêmes pendant la période d'évolution, après quoi la TH reste stable. La Figure 33 nous montre l'évolution de la TH en fonction du temps.

Tableau 9
Valeurs de la TH pour la mélamine et le MDF.

Time (Days)	TH (%) Mélamine	TH (%) MDF
0	0.0%	0.0%
1	5.3%	6.6%
4	9.0%	14.8%
5	10.2%	15.4%

7	11.4%	16.1%
12	14.9%	17.3%
18	16.9%	17.9%
19	17.5%	18.1%
20	17.7%	18.1%
21	17.9%	18.2%

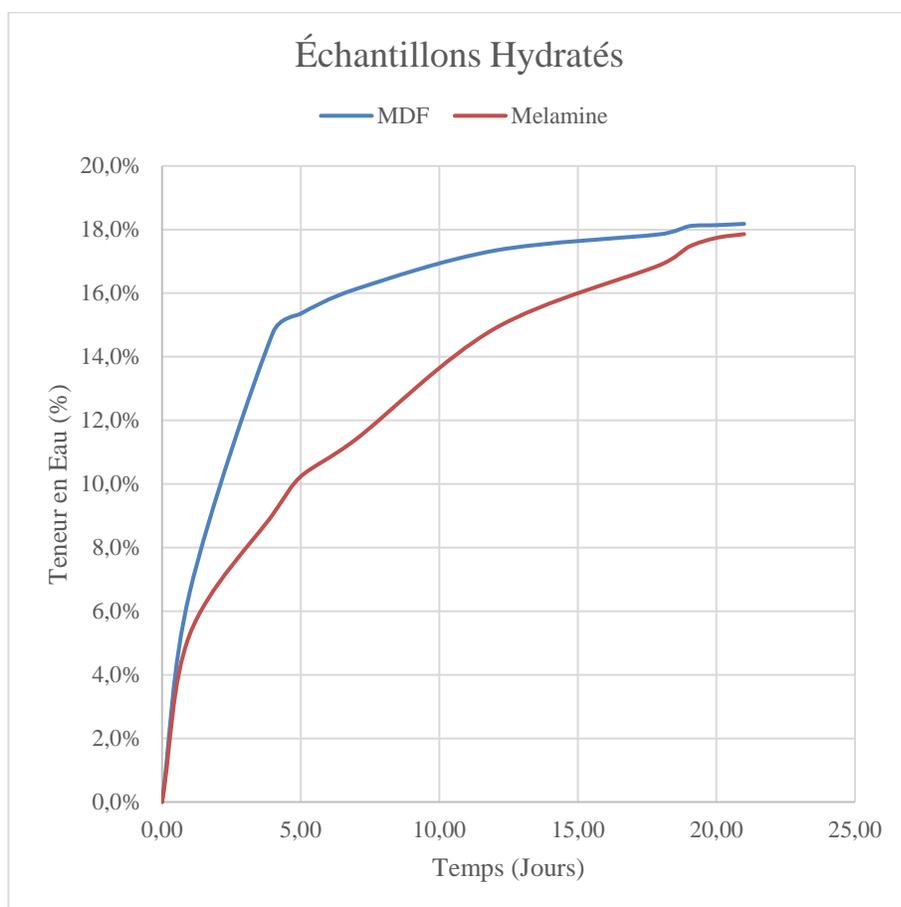
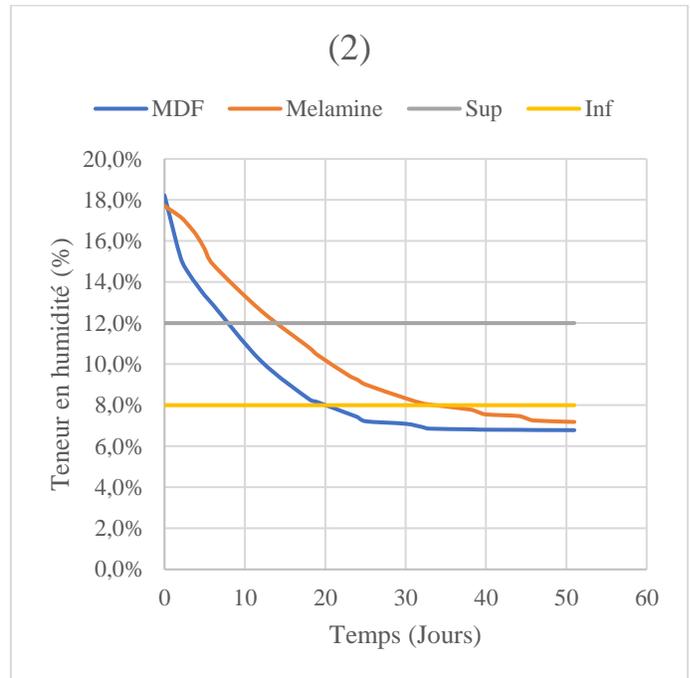
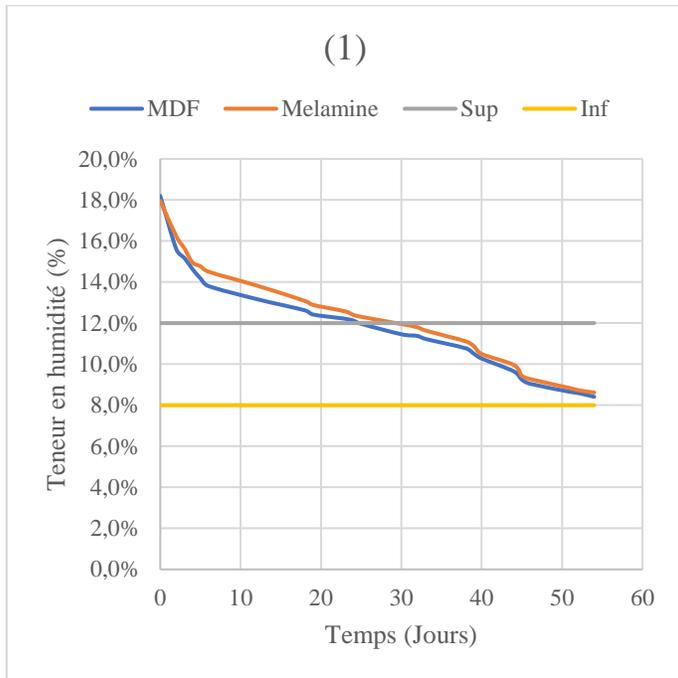


Figure 33. Évolution de la teneur en humidité (TH) dans des conditions extrêmes (23°C et 95%) pour la mélamine et le MDF

4.4.3.4 Résultats de l'étape 3 : Application des conditions de test

L'application des six points de conditions de test nous donne la possibilité d'illustrer l'évolution de la teneur en eau pour la mélamine et le MDF en une fonction temps et déterminer le temps requis pour chaque condition afin d'atteindre l'admissibilité (12% et 8%).



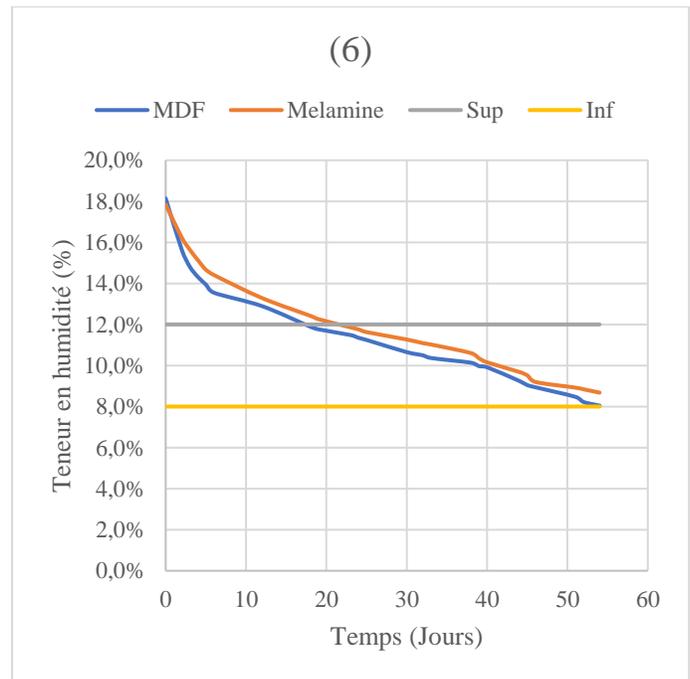
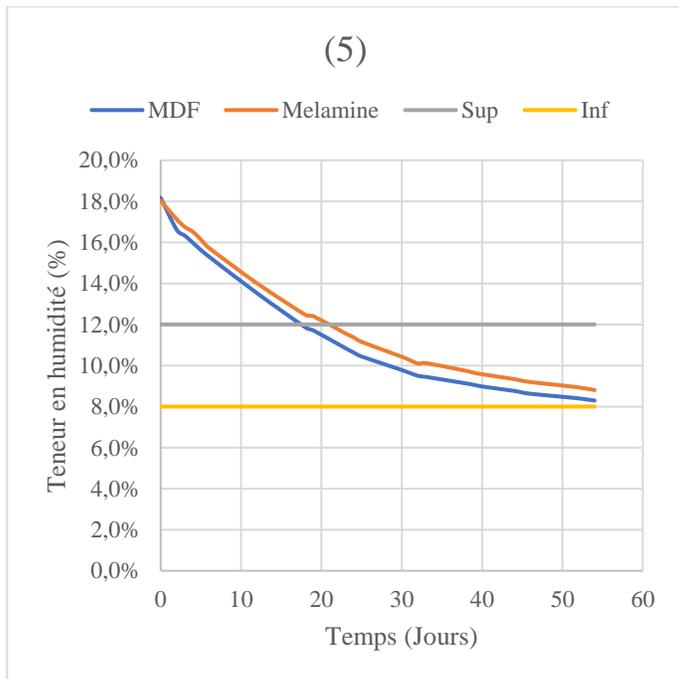
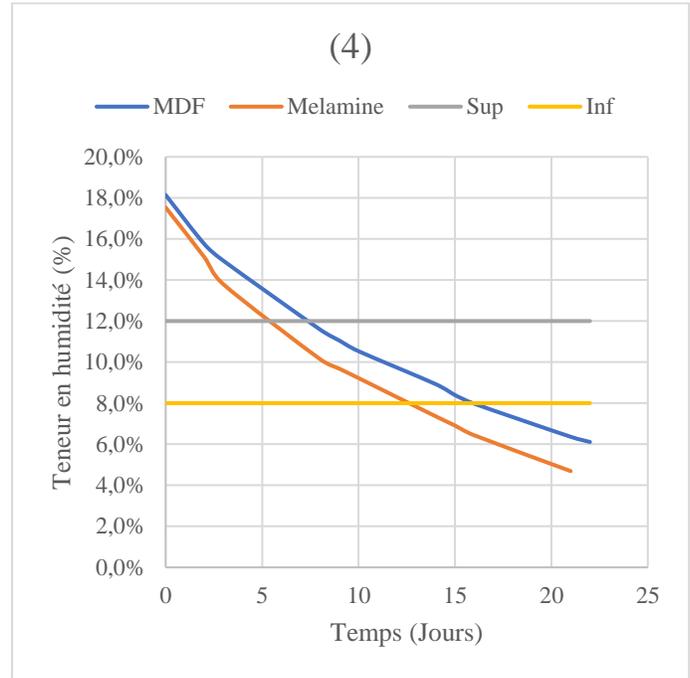
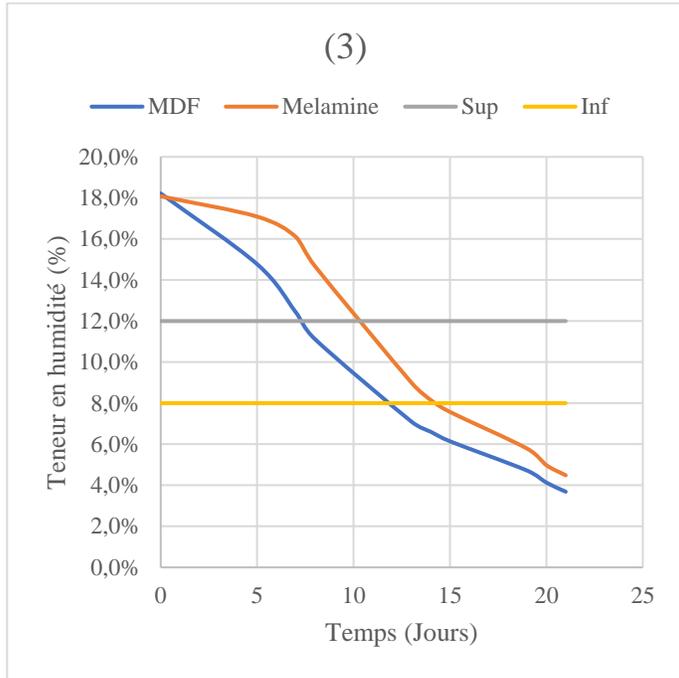


Figure 34. Évolution de la TH en fonction du temps pour les six points de condition 1) 23°C & 65% ; 2) 26°C & 57% ; 3) 27°C & 20% ; 4) 20°C & 31% ; 5) 19°C & 65% ; 6) 23°C & 63%

De plus, le Tableau 10 nous donne les valeurs numériques correspondant à la Figure 34.

Tableau 10

Temps nécessaire pour atteindre la TH appropriée pour chaque condition de test.

Test #	Conditions de test	Temps nécessaire pour la Mélamine (Jours)		Temps nécessaire pour MDF (Jours)	
		12 %	8%	12 %	8%
1	23 °C & 65 %	30	66	25	58
2	26 °C & 57 %	13	33	7	19
3	27 °C & 20 %	10.4	14.3	7.3	10.4
4	20 °C & 31 %	5.4	12.6	7.4	16
5	19 °C & 65 %	21	70	18	60
6	23 °C & 63 %	23	68	18	54

4.4.3.5 Discussion des résultats

Les résultats obtenus nous donnent des réponses à nos questions et aux hypothèses établies concernant le phénomène étudié.

Après ajustement des conditions, les résultats ont démontré que tous les points validés convergent vers la zone limitée par 8% et 12%. Le résultat principal recherché est le temps alloué à l'échantillon pour atteindre cette zone ou la dépasser. En d'autres termes, déterminer le temps de convergence. Or, le temps de convergence est différent d'une condition à l'autre et d'un matériau à l'autre.

En analysant la forme générale des graphiques et les valeurs numériques, nous déduisons les points suivants :

- Le séchage (désorption) et le mouillage (adsorption) ont un aspect différent (inverse).
- Les graphiques présentent une forme pseudo-exponentielle.

- L'échantillon soumis à une température plus élevée converge plus rapidement que celui soumis à une température moins élevée.
- Un échantillon soumis à une humidité de l'air plus faible converge plus rapidement qu'un échantillon soumis à une humidité de l'air plus élevée.
- La convergence du MDF est plus rapide que celle de la mélamine.
- Présence de fluctuation causée par les appareils de mesure et les chambres de conditionnement.

4.5 MODELISATION PAR LES RESEAUX DE NEURONES

La première et la principale difficulté rencontrée lors de l'étude du comportement thermo-hydrrique des dérivées du bois est de transformer les phénomènes de transfert d'humidité dans les matériaux à base de bois en un modèle mathématique [154]. Or, on a démontré l'absence d'un modèle mathématique qui définit directement les paramètres de transfert d'humidité tels que la teneur en humidité, le coefficient de diffusion et le temps de séchage. Ceci nous amène à utiliser un modèle simplifié ou la méthode des éléments finis pour résoudre le problème.

Au cours des dernières années, les RNA ont été utilisées par les chercheurs dans l'optimisation des matériaux à base de bois à cause des avantages qu'offrent par rapport aux méthodes traditionnelles comme la rapidité, l'autoadaptation et la généralisation [154, 155]. Dans cette étude, on traitera la mise en œuvre d'une solution RNA basée sur trois étapes :

- 1) La première étape consiste à déterminer l'architecture RNA.
- 2) La deuxième étape consiste à entraîner le modèle et à valider la configuration finale en calculant les paramètres de performances à savoir l'erreur quadratique moyenne EQM (Mean Square Error MSE) et le coefficient de régression R.
- 3) La troisième étape consiste à simuler le réseau en déduisant les temps nécessaires pour atteindre 8% et 12% de TH afin de les comparer aux résultats de l'étude expérimentale.

Pour des raisons de complexité des phénomènes, nous avons élaboré un réseau dépendant pour chaque matériau (mélamine et MDF) en utilisant MATLAB comme un logiciel de calcul à cause de sa performante et les outils intégrés offerts.

4.5.1 Construction du modèle

L'élaboration d'un modèle RNA est liée au choix de l'architecture générale, les paramètres d'entrée-sortie, l'algorithme d'apprentissage, et les indices de performance. Le choix de l'architecture dépend des phénomènes étudiés. En se référant aux études précédentes [154-156], la plupart des architectures RNA peuvent donner de bons résultats, mais dans les problèmes de prédiction, la méthode de rétropropagation (Back propagation) est considérée comme la plus adaptée, couplée à l'algorithme d'apprentissage de Levenberg Marquardt qui se caractérise par sa simplicité et sa rapidité. Les fonctions de transfert sont la fonction tangente hyperbolique et la fonction linéaire [157].

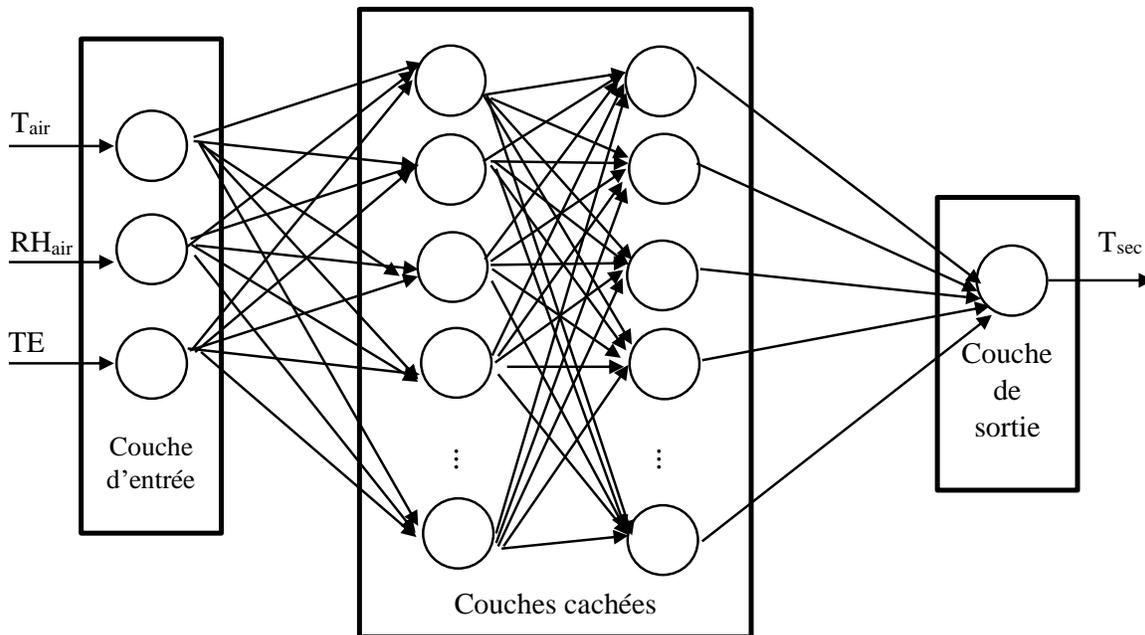


Figure 35. Architecture RNA proposée.

Les paramètres d'entrée sont la température de l'air (T_a), l'humidité relative (RH), la teneur en humidité ciblée (TH). Comme sortie, nous cherchons à obtenir le temps de séchage (T_{sec}).

Par conséquent, le RNA prend la forme générale de 3-n(i,j)-1 (i : nombre de couches cachées, j : nombre de neurones dans chaque couche cachée) (Figure 35). Les indices i et j seront déterminés dans les résultats.

4.5.2 Critères de performance

La détermination des paramètres de performance est nécessaire pour consolider le modèle RNA en calculant le coefficient de régression R et l'erreur quadratique moyenne EQM. Le coefficient de régression R présente la racine carrée de R^2 , il peut être calculé à partir de l'équation 24 :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad Eq. (24)$$

Il mesure la quantité de variation prise en compte par le modèle ajusté et compare les modèles en évaluant celui qui s'ajuste le mieux aux données, tandis que l'EQM mesure la moyenne de l'écart entre les valeurs ajustées et les observations réelles des données [158]. L'équation de l'EQM (MSE) est la suivante :

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad Eq. (25)$$

Le logiciel MATLAB offre un outil intégré appelé Network Toolbox, cet outil permet à l'utilisateur de construire, entraîner, valider et tester le réseau, il offre aussi la possibilité de calculer R et EQM.

4.5.3 Résultats de modélisation par RNA

Pour déterminer l'architecture finale du réseau, nous faisons varier les indices des couches cachées i et j (i : nombre de couches cachées, j : nombre de neurones dans chaque couche cachée) et

nous testons les paramètres d'entrée-sortie. Pour chaque combinaison, nous comparons les valeurs RNA aux valeurs réelles, et nous calculons le R et le EQM (Eqs. 24 et 25).

La configuration finale prend en compte les paramètres de performances EQM et la régression R, ainsi que le temps de réponse (le plus court possible). La configuration la mieux adaptée est 3-10-7-1 pour la mélamine et 3-10-10-1 pour le MDF.

Les données expérimentales issues de §4.4.3.4 seront réparties en trois catégories, 70% des données seront utilisées pour l'entraînement, 15% des données seront utilisées pour la validation et 15% des données seront utilisées pour tester le modèle. Les résultats numériques sont présentés dans le Tableau 11.

Tableau 11
Résultats numériques du RNA pour la mélamine et le MDF.

Matériau	Architecture	MSE (EQM) Entraînement	MSE (EQM) Validation	R	Modèle de régression linéaire
Mélamine	[3-10-7-1]	0.17	0.13	0.99956	Output=1xTarget+0.011
MDF	[3-10-10-1]	0.08	0.33	0.99924	Output=1xTarget+0.071

Les indices de performance du modèle RNA sont présentés dans le Tableau 12 sous forme de graphes, elles indiquent la robustesse du modèle RNA.

Tableau 12

Indices de performance du modèle RNA pour la mélamine et le MDF

Architecture	Mélamine	<p>Network: Melamine</p> <p>View Train Simulate Adapt Reinitialize Weights View/Edit Weights</p>
	MDF	<p>Network: MDF</p> <p>View Train Simulate Adapt Reinitialize Weights View/Edit Weights</p>
EQM	Mélamine	<p>Best Validation Performance is 0.33105 at epoch 157</p> <p>357 Epochs</p>
	MDF	<p>Best Validation Performance is 0.13254 at epoch 65</p> <p>105 Epochs</p>

R	Mélamine	<p>Training: R=0.99966 Output $\approx 1 \cdot \text{Target} + 0.016$</p>	<p>Validation: R=0.9998 Output $\approx 0.99 \cdot \text{Target} + 0.04$</p>
		<p>Test: R=0.99939 Output $\approx 0.98 \cdot \text{Target} + 0.14$</p>	<p>All: R=0.99956 Output $\approx 1 \cdot \text{Target} + 0.011$</p>
	MDF	<p>Training: R=0.99969 Output $\approx 1 \cdot \text{Target} + 0.015$</p>	<p>Validation: R=0.99934 Output $\approx 1 \cdot \text{Target} + 0.021$</p>
		<p>Test: R=0.99589 Output $\approx 1 \cdot \text{Target} + 0.44$</p>	<p>All: R=0.99924 Output $\approx 1 \cdot \text{Target} + 0.071$</p>

4.6 COMPARAISON ET DISCUSSION DES RESULTATS

La comparaison entre le modèle expérimental et le modèle par RNA consiste à déterminer le temps nécessaire à atteindre les valeurs admissibles de TH (8% et 12%) pour chaque condition d'essai et calculer l'erreur relative (ER) entre les résultats des deux modèles ainsi que la moyenne des erreurs pour toutes les conditions de test. La comparaison entre le modèle expérimental et la simulation consiste à superposer les graphes des deux matériaux pour chaque condition d'essai, ensuite calculer l'erreur relative (ER) pour les valeurs admissibles de temps donnés.

4.6.1 Critère de comparaison

L'erreur relative (ER) nous donne la possibilité d'évaluer l'ampleur de la différence entre les valeurs expérimentales de §4.4.3 et les résultats des RNA en §4.5.3, elle est exprimée par la formule suivante :

$$ER = \frac{|Valeur\ Mesurée - Valeur\ Prédite|}{Valeur\ Prédite} \times 100\% \quad Eq. (26)$$

4.6.2 Résultats de comparaison - Expérience Vs RNA

La comparaison entre les résultats expérimentaux et le modèle RNA se fait par un calcul d'erreur. Ce calcul d'erreur est effectué selon les valeurs de la teneur en humidité tout en considérant le cas des valeurs particulières de TH (8 % et 12 %), les résultats de comparaison sont présentés dans le Tableau 13.

En résumé, la moyenne des erreurs entre l'expérience et le modèle RNA est de 1.40% pour une TH de 8 % et 2.85% pour une TH de 12 % dans le cas de la mélamine, et de 1.42% pour une TH de 8 % et 2.25% pour une TH de 12 % dans le cas du MDF. Ces valeurs sont considérées comme acceptables.

Tableau 13

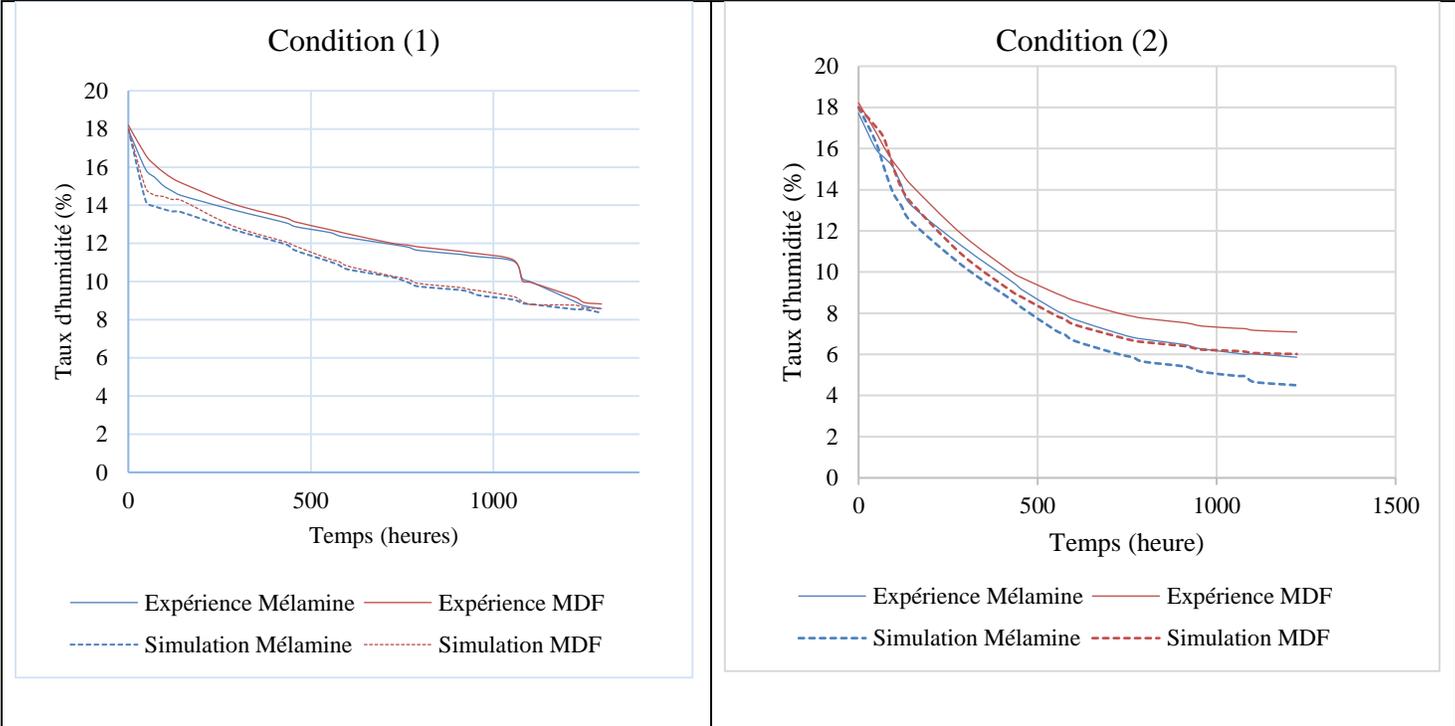
Comparaison des résultats entre le modèle expérimental et le modèle par RNA.

Condition		1	2	3	4	5	6
Mélamine	t 8% (Jour) Expérience	66	33	14,3	12,6	70	68
	t 8% (Jour) RNA	66.3	33.51	14.26	12.76	67.66	69.04
	Erreur Relative	0.46%	1.55%	0.27%	1.27%	3.35%	1.53%
	Moyenne	1.40%					
	t 12% (Jour) Expérience	30	13	10.4	5.4	21	23
	t 12% (Jour)RNA	29.05	12.69	9.91	5.42	20.68	21.86
	Erreur Relative	3.17%	2.39%	4.70%	0.37%	1.52%	4.94%
	Moyenne	2.85%					
	t 8% (Jour) Expérience	58	19	10.4	16	60	54
	t 8% (Jour) RNA	58.44	19.5	10.6	16.15	61.24	54.11
MDF	Erreur Relative	0.77%	2.64%	1.88%	0.94%	2.07%	0.21%
	Moyenne	1.42%					
	t 12% (Jour) Expérience	25	7	7.3	7.4	18	18
	t 12% (Jour) RNA	24.79	7.18	7.51	7.65	17.58	17.73
	Erreur Relative	0.85%	2.60%	2.81%	3.43%	2.31%	1.48%
	Moyenne	2.25%					

4.6.3 Résultats de validation- Expérience Vs Simulation

La comparaison entre les résultats expérimentaux et la simulation consiste en premier lieu à illustrer les résultats expérimentaux et les valeurs issues de la simulation sous forme de graphes et comparer leurs allures. Les graphes de la

Figure 36 montrent l'évolution de la teneur en humidité de la mélamine et le MDF en fonction du temps pour chaque condition. Ensuite, on procède à un calcul d'erreur. Contrairement à la comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats des RNA, l'erreur est calculée sur l'intervalle du taux d'humidité en prenant une valeur fixe du temps. Alors, pour chaque valeur du temps, on calcule l'erreur relative et on déduit pour chaque condition la valeur minimale, la valeur maximale et la moyenne des erreurs, les résultats numériques de comparaison sont présentés dans le Tableau 14.



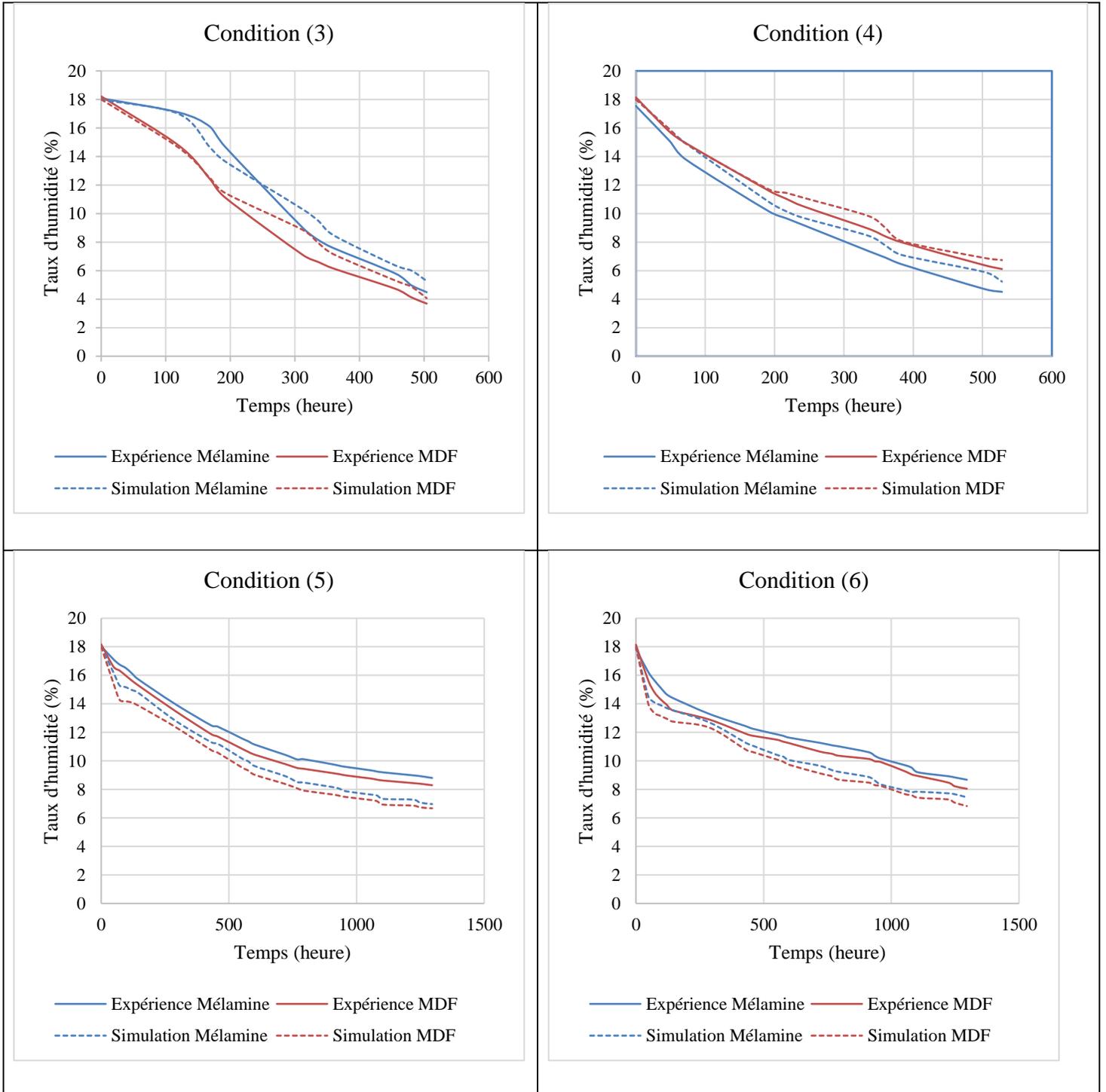


Figure 36. Comparaison entre le modèle expérimental et le modèle de simulation.

Tableau 14

Comparaison des résultats entre le modèle expérimental et le modèle de simulation.

Condition		1	2	3	4	5	6
Mélamine	Erreur minimale	0.3%	1.7%	0.5%	2.7%	0.2%	0.9%
	Erreur maximale	18.6%	14.6%	20.7%	25.4%	20.8%	22.2%
	Moyenne des erreurs	9.6%	8.9%	10.8%	10.1%	13.1%	14.2%
MDF	Erreur minimale	1.1%	1.2%	0.6%	0.2%	0.9%	0.8%
	Erreur maximale	15.7%	15.5%	24.6%	10.3%	19.8%	22.2%
	Moyenne des erreurs	8.3%	10.7%	10.7%	4.4%	13.5%	14.2%

Le maximum des erreurs est à 25.4 % tandis que le minimum des erreurs est à 0.2 %. Les graphes montrent une similitude entre l'expérience et la simulation, la moyenne des erreurs varie entre 4.4% et 14.2%. Globalement, les résultats sont acceptables, mais une interprétation est nécessaire pour comprendre la source des écarts les plus importants.

4.6.4 Interprétation des résultats

Dans le cas de la comparaison entre l'expérience et les RNA, l'erreur est faible et c'est justifiable, car les RNA sont à la base entraînée, validée et testée par des données expérimentales. L'erreur est due à la précision du RNA et le calcul de l'erreur valide les indices de performance calculés dans la partie §4.5.3.

La comparaison entre l'expérience et la simulation se fait par l'analyse de la Figure 36 qui présentent l'évolution du taux d'humidité en fonction du temps. La forme générale montre une similitude entre le graphe de l'expérience et celui de la simulation avec une différence d'amplitude.

L'erreur, qu'elle soit observée ou calculée, est liée à trois principaux facteurs, l'erreur de l'expérience, l'erreur de la simulation et l'erreur lié au phénomène lui-même. L'erreur de l'expérience est due à la lecture, la précision des appareils, les fluctuations des paramètres expérimentaux, la méthodologie adoptée, et le nombre de tests. Toutefois, on a essayé durant nos

expériences de minimiser cette erreur en adoptant une démarche rigoureuse et en utilisant des appareils dotés d'une technologie de pointe, mais l'erreur est inévitable. La simulation peut générer aussi des erreurs commençant par les hypothèses de départ comme l'homogénéité des matériaux et la stabilité des paramètres, passant par le modèle mathématique approximatif et la sensibilité du maillage jusqu'en arrivant à la performance des outils informatiques utilisés. En dernier, l'erreur causée par le phénomène lui-même se résume dans la compréhension globale du phénomène et sa non-linéarité.

Dans les résultats de la comparaison ; on a remarqué que l'erreur est importante dans le cas des températures relativement élevées (27°C et 26 °C dans 2 et 3) par rapport à des températures plus basses, contrairement aux humidités relatives plus basses (20% et 31% dans 3 et 4) qui ont une erreur plus importante par rapport aux humidités plus élevées. Cette constatation est justifiée par deux points. Le premier point est le modèle mathématique approximatif de la simulation qui décrit le phénomène dans un intervalle réduit avec l'hypothèse de transfert de masse sous une forme de vapeur. L'expérience repose sur des mesures et prélèvements incluant le transfert de masse d'eau sous autres formes. Le deuxième point est la modélisation du phénomène. La simulation décrit le phénomène du transfert de la chaleur d'une façon explicite, ce transfert de chaleur se déroule en quelques heures (dépend de la température) tandis que le phénomène du transfert de l'humidité prend plus de temps. Cette combinaison de deux phénomènes et de leurs échelles de temps est plus significative dans la simulation que dans les résultats de l'expérience.

Bien que l'erreur soit présente dans notre démarche, elle est justifiée et on peut considérer que les modèles et les approches sont acceptables.

4.7 PLAN DE PUBLICATIONS

Ce chapitre a abouti à l'élaboration de deux articles qui seront soumis pour publication.

L'article 1: «Predicting the thermo-hydric behavior of wood-based materials under thermal comfort conditions using experimental data and Artificial Neuronal Network».

L'article 2: «A simplified model to simulate the thermo-hydric behavior of wood-based materials under thermal comfort conditions».

CHAPITRE 5

IMPLANTATION DE LA SOLUTION ÉNERGIE 4.0

L'implantation de la solution basée sur les notions de l'industrie 4.0 et la gestion économe en énergie constitue la synthèse de notre projet de recherche et sera présentée sous la forme d'une étude de cas. L'atelier d'usinage du SEREX, dédié à l'usinage du bois et de ses dérivées, représente un exemple idéal, il contient les éléments essentiels que nous retrouvons dans la plupart des ateliers d'usinage de bois.

Le manque d'un support pratique établi au préalable et les notions récentes de l'industrie 4.0 rendent l'implantation de la solution énergie 4.0 un défi. Pour cela, on suivra une méthodologie basée sur une structure simple qui met en évidence les notions traitées auparavant.

La solution énergétique 4.0 est devisée en deux parties. La première consiste à la mise en œuvre des dispositifs énergétiques, à savoir les capteurs et les actionneurs, autrement dit, le matériel (hardware). La deuxième concerne le volet programmation et traitement des données qui se manifeste dans l'interface d'utilisation ou bien la partie logiciel (software).

5.1 ÉTUDE DE CAS (ATELIER D'USINAGE SEREX)

Dédié aux travaux de recherche, l'atelier d'usinage du bois et ses dérivées au SEREX contient les appareils et machines suivantes (Figure 37):

1) Centre d'usinage (CNC) 3 axes :



Marque : TOTAL CUT

Modèle : RTC

Surface d'usinage : 60'' x 144''

Interface de commande : FlashCut

Magasin d'outils : 7 +1 outils

2) Collecteur de poussière (dépoussiéreur) :



Marque : KING CANADA

Modèle : KC-4043

Dimension : 55-1/2'' x 23'' x 99''

Capacité d'aspiration : 2,28 Pi³/min

Moteur: 3 CV

L'application installée sur l'ordinateur permet de calculer et agir sur l'actionneur du chauffage/ventilateur en suivant le chemin inverse. Le calcul prend en considération et par ordre de priorité : 1) le confort thermique ; 2) le taux d'humidité dans les panneaux ; 3) la consommation minimale d'énergie.

5.3 DISPOSITIFS MATERIELS (HARDWARE)

Les dispositifs énergétiques se résument dans les lunettes de la réalité augmentée (RA) qui nous donnent une image thermique combinée à une image réelle, et les capteurs et actionneurs intelligents. En plus, nous avons les appareils connexes comme les ordinateurs, les cellulaires, et les appareils de connexion. La Figure 38 montre le schéma de la structure du matériel installé pour la solution énergie 4.0, autrement dit, les éléments physiques de la solution 4.0.

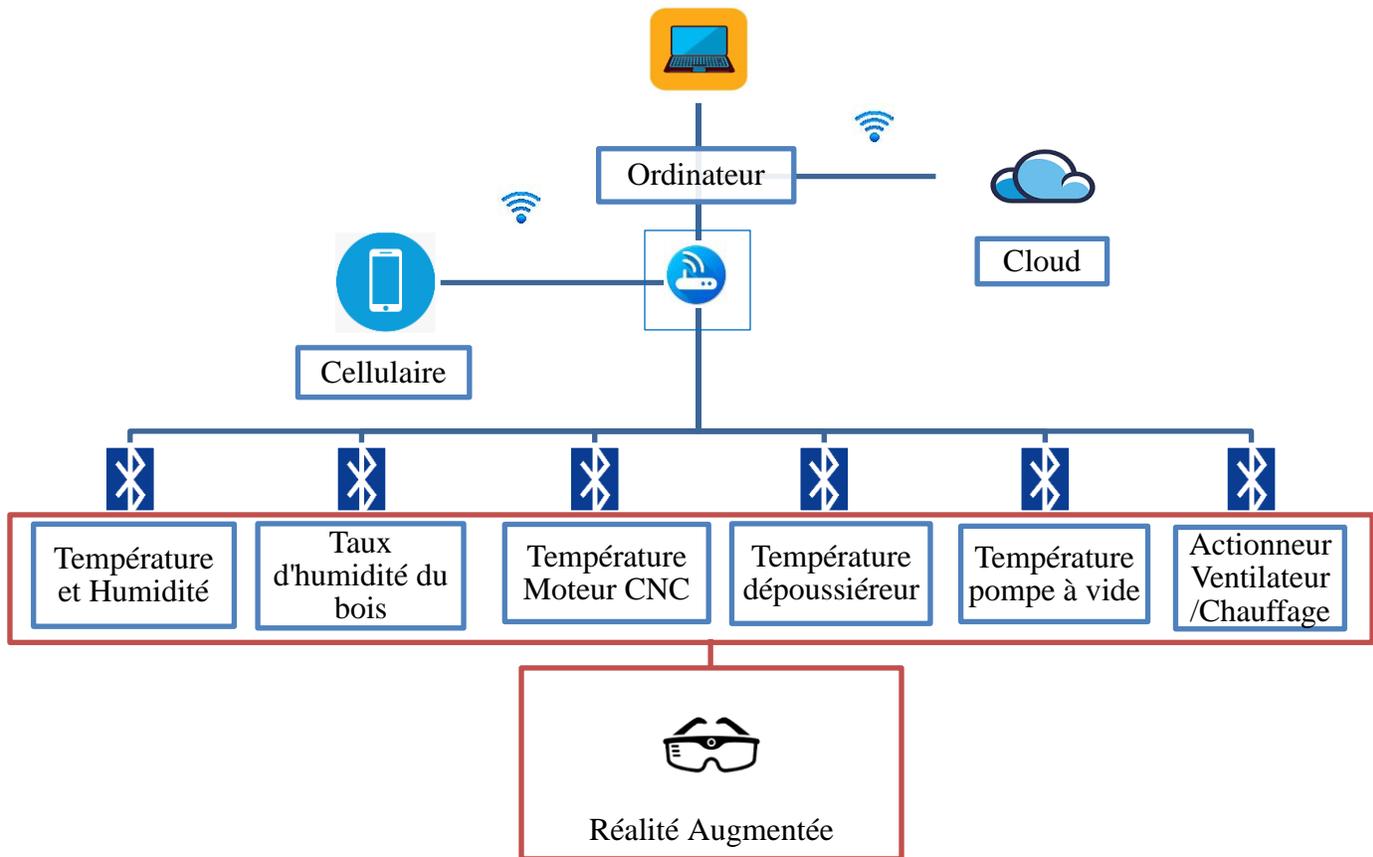


Figure 38. Schéma des éléments physiques de la solution 4.0.

5.3.1 Image thermique et lunette (Réalité Augmentée)

L'ensemble de lunettes de la réalité augmentée (RA) est un dispositif qui permet d'intégrer des éléments virtuels dans un environnement et temps réels. Dans notre cas, on combine une image thermique (FLIR) à des machines en fonction. Sur le marché, il existe plusieurs solutions qui se distinguent les unes des autres par leurs performances et leurs prix.

Notre solution développée est une combinaison d'une lunette de réalité augmentée à un cellulaire doté d'une caméra FLIR. L'ensemble nous donne une solution RA-FLIR (Figure 39).

- Lunettes et casque RA Metaverse marque SCIONE.
- Cellulaire doté d'une caméra FLIR marque BLACKVIEW modèle BV6600Pro.

	Dispositif	Image
Lunette RA		

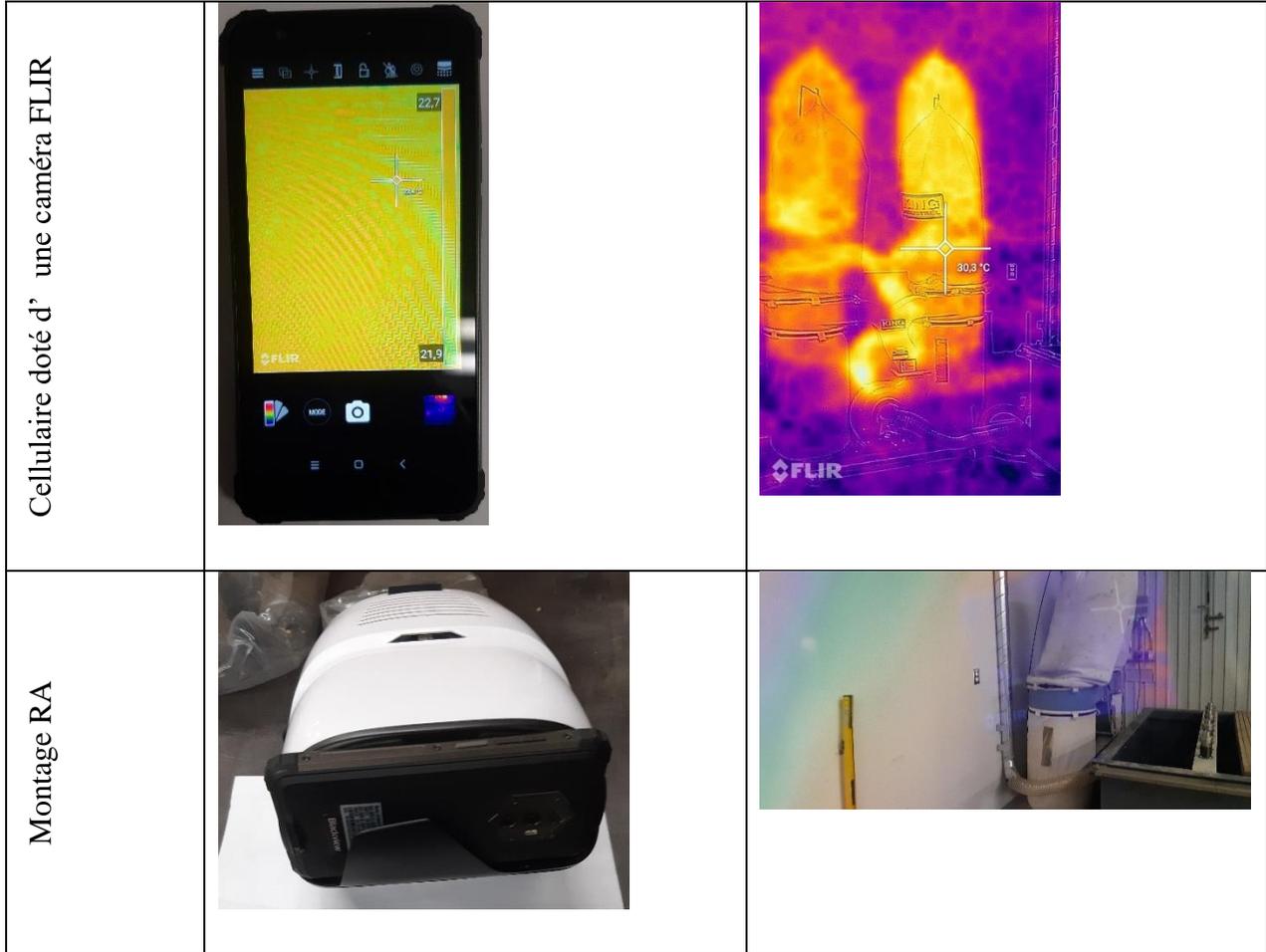


Figure 39. Diagramme d'acquisition de l'image RA.

Cette solution nous a permis d'avoir une image thermique préliminaire qui détermine les principales sources de chaleur dans le but de fixer les endroits où mettre les capteurs.

L'utilisation des lunettes RA est aussi bénéfique pour détecter les anomalies comme les pertes de chaleur ou l'augmentation excessive de la température due au mauvais fonctionnement des appareils et machines. Comme exemples, nous avons les frottements des pièces mécaniques ou le mauvais réglage du chauffage. Ceci permettra aux utilisateurs d'intervenir au bon moment et aux bons endroits pour améliorer l'efficacité ou éviter les accidents.

5.3.2 Capteurs et actionneurs (IdO)

L'industrie 4.0 repose sur les éléments dits « Intelligents. » Par définition, un capteur (actionneur) intelligent est différent d'un capteur classique. Un capteur classique transforme une grandeur physique (température, pression, etc) à un signal électrique descriptible par un dispositif de traitement (API), tandis qu'un capteur intelligent envoie la lecture physique de cette grandeur sous forme numérique en utilisant généralement un moyen sans fil (RF, Bluetooth, WIFI). Un capteur intelligent est caractérisé par :

- Auto-alimentation
- Auto-calibration
- Auto-traitement
- Auto-communication.

Dans notre projet de recherche, on a construit nos propres capteurs selon nos besoins en tenant compte de l'industrie traitée (la troisième transformation du bois) et les constats établis lors des visites aux différentes usines. De plus, l'image fournie par les lunettes AR nous a permis de déterminer le nombre et le type de capteurs et actionneurs à utiliser.

5.3.2.1 Composant commun - Microcontrôleur (Arduino UNO R3)

Arduino UNO R3 est une carte microcontrôleur basée sur l'ATmega2560-16 AU. Il dispose de 54 broches d'entrée / sortie numériques (dont 14 peuvent être utilisés comme sorties PWM), 16 entrées analogiques, 4 UART (ports série matériels), un oscillateur à cristal de 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation, un en-tête ICSP et un bouton de réinitialisation. Il peut être connecté à un ordinateur avec un câble USB ou de l'alimenter avec un adaptateur AC-DC ou une batterie.

Spécifications:

- Microcontrôleur : ATmega2560

- Vitesse d'horloge 16 MHz
- EEPROM 4 ko
- SRAM 8 ko
- Mémoire flash 256 ko dont 8 ko utilisés par le chargeur de démarrage
- Tension de fonctionnement : 5V
- Tension secteur (recommandé) : 7-12V
- Broches d'entrée analogiques 16
- Broches d'E/S numériques 54 (dont 14 fournissent une sortie PWM)
- Courant continu pour broche 3.3V 50 mA
- Courant continu par broche d'E/S 40 mA

Le choix du microcontrôleur Arduino UNO R3 vient du fait qu'il est simple à programmer et disponible sur le marché avec un prix abordable.

5.3.2.2 Composant commun - Bluetooth (HC-06)

HC-06 est un module Bluetooth conçu pour établir une communication de données sans fil à courte portée (<100 mètres). Il est très facile de s'interfacer et de communiquer. Il peut être interfacé avec presque tous les microcontrôleurs ou processeurs, car il utilise l'interface UART. Sa capacité de transmettre des fichiers va jusqu'à une vitesse de 2.1 Mbps et fonctionne sur le protocole de communication Bluetooth 2.0 (Figure 40).

- Tension de fonctionnement : 3.3 V - 6 V;
- Gamme de fréquences de fonctionnements : 2.402 GHz – 2.480 GHz.

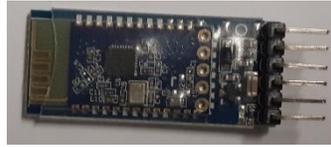


Figure 40. Module Bluetooth (HC-06).

5.3.2.3 Capteur de température et d'humidité de l'air

Le capteur de température et d'humidité de l'air est composé de quatre parties :

- Microcontrôleur Arduino UNO
- Module Bluetooth (HC-06)
- Alimentation indépendante 9 V (Batterie).
- Capteur de température et d'humidité de l'air DHT22.

DHT22 est la version la plus performante et moins chère (un bon rapport qualité prix) de sa catégorie. La plage de mesure de température est de -40 à +125 degrés Celsius avec une précision de ± 0.5 degré, et d'humidité, de 0 à 100 % avec une précision de 2 à 5. Le capteur est installé à un endroit auprès de l'utilisateur (Figure 41).

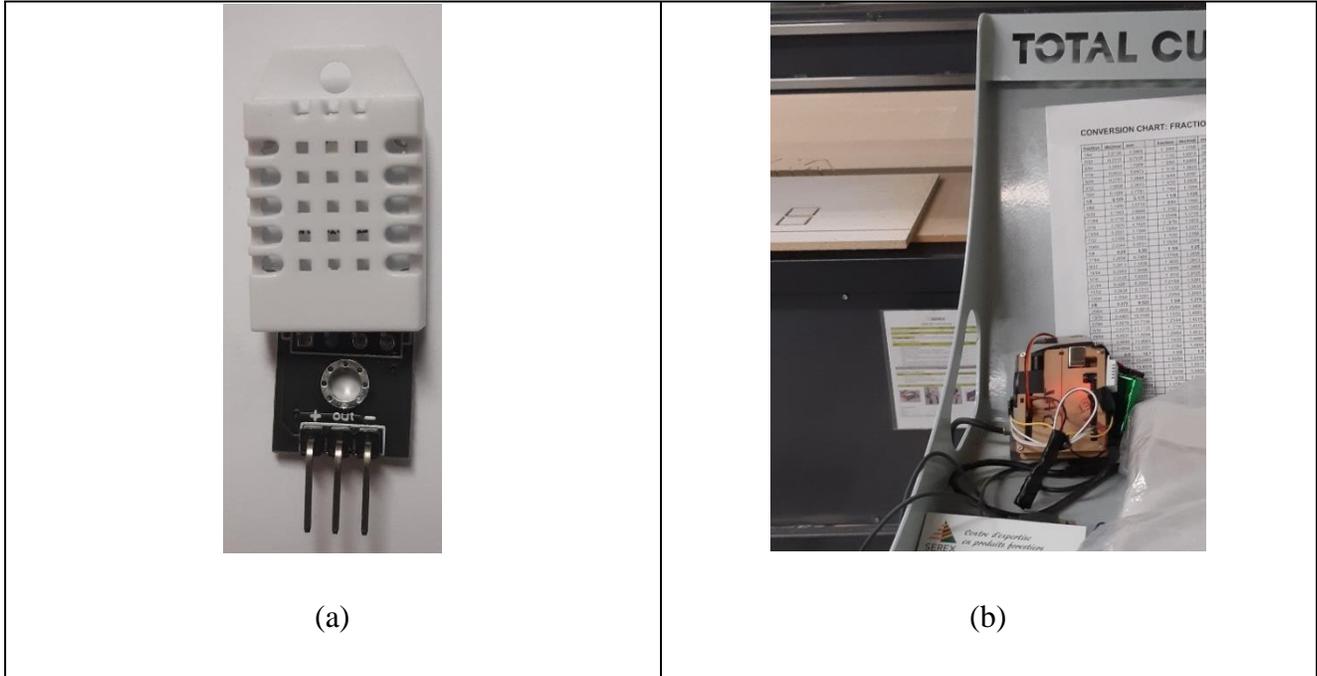


Figure 41. Capteur de température et d'humidité de l'air : a) DHT22, b) Montage complet.

5.3.2.4 Capteur du taux d'humidité des panneaux mélamine et MDF

Le capteur du taux d'humidité des panneaux mélamine et MDF est basé sur le concept d'un capteur du taux d'humidité du sol modifié et calibré. Ce module est caractérisé par la sensibilité réglable, une tension de fonctionnement 3.3V-5V, la petite taille de la carte PCB et le double mode de sortie : sortie numérique 3 DO (0 et 1) et la sortie analogique 4 AO (Figure 42 et Figure 43).

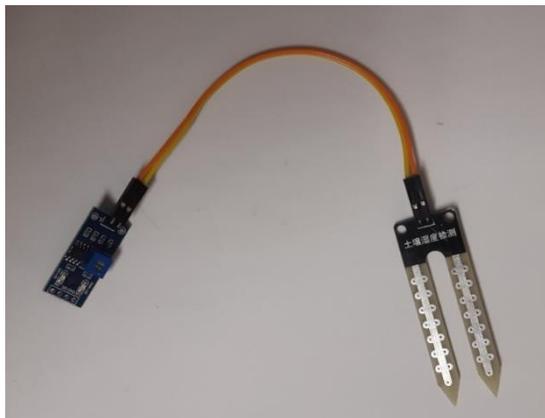


Figure 42. Capteur du taux d'humidité du sol.

Le principe consiste à mesurer la conductivité électrique en passant un courant électrique entre deux pointes enfoncées dans le matériau. L'eau étant conductrice, plus le matériau sera humide, plus le courant passera, l'appareil transforme cette mesure en pourcentage.

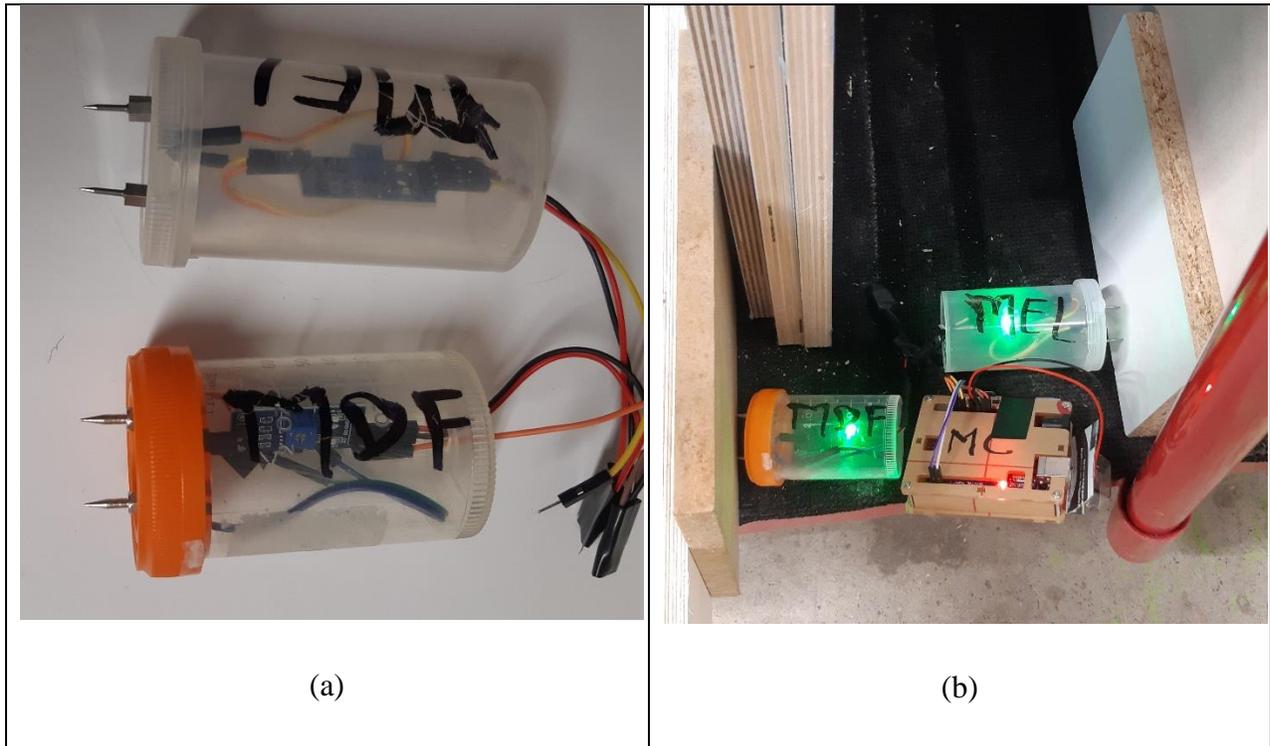


Figure 43. Capteur du taux d'humidité des panneaux mélamine et MDF : a) Capteur modifié, b) montage complet.

5.3.2.5 Capteur de température du dépoussiéreur

Le dépoussiéreur contient deux éléments essentiels qui dégagent de la chaleur : le moteur et sac de filtration. Dans chaque partie, un capteur de température en contact de type DS18B20 est installé, relié au microcontrôleur pour transmettre les valeurs des températures dans chaque compartiment (Figure 44).

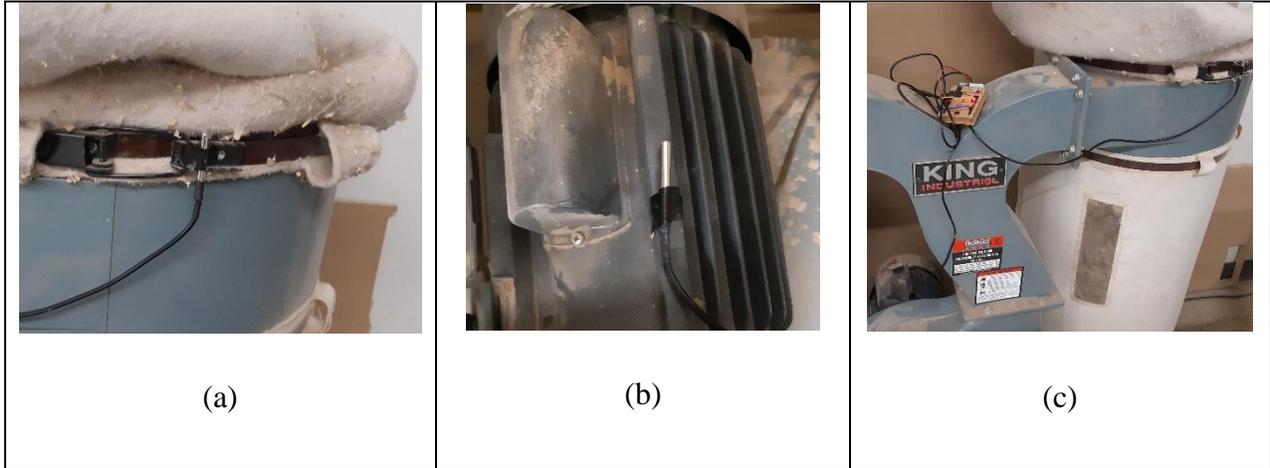


Figure 44. Capteur de la température dépoussiéreur : a) Sac de filtration, b) moteur, c) montage complet.

5.3.2.6 Capteur de température du moteur machine (CNC)

L'analyse préliminaire par les lunettes RA montre que la broche du CNC est l'élément qui chauffe le plus lors des opérations d'usinage. Pour cela, on a installé un capteur de type D18b20 sur la broche qui nous fournit la valeur de la température (Figure 45).



Figure 45. Capteur de température monté sur la broche du CNC.

5.3.2.7 Capteur de température de la pompe à vide

La pompe à vide est un élément dans un centre d'usinage CNC pour fixer les pièces à usiner sur la table de la machine par dépression. Elle extrait de l'air sur la table d'usinage pour créer le vide, cette opération génère de la chaleur sur 1) le moteur qui fait tourner la pompe et 2) l'air sortant de la pompe. Deux capteurs de température sont installés, le premier sur le moteur et le deuxième à la sortie de l'air chaud (Figure 46).

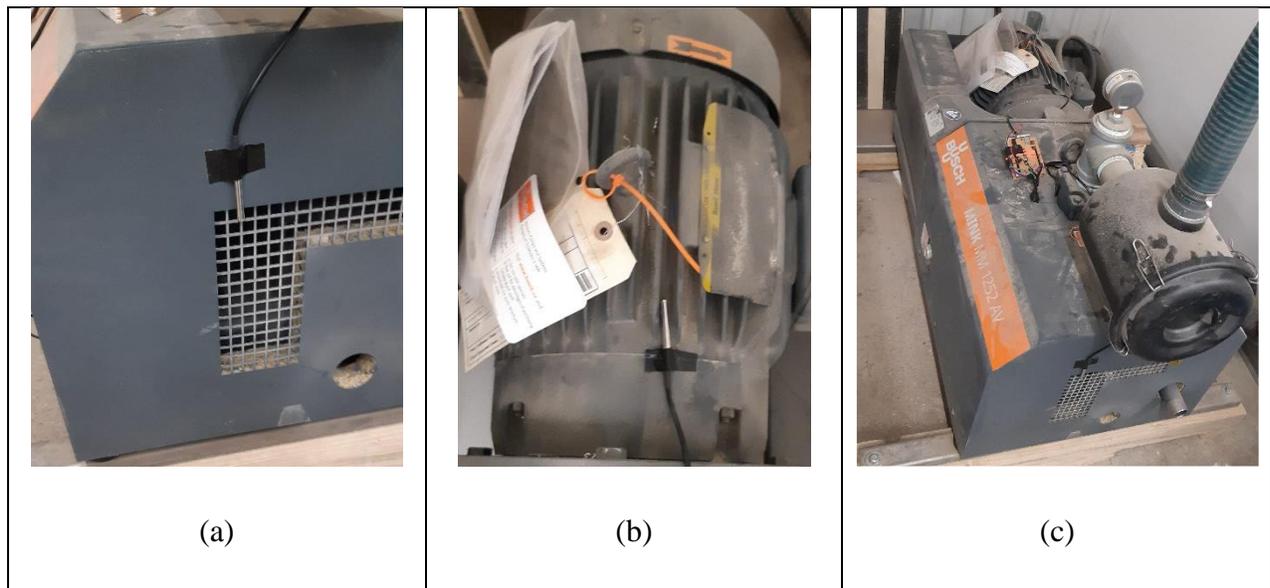


Figure 46. Capteur de la température pompe à vide : a) sortie d'air chaud, b) moteur, c) montage complet.

5.3.2.8 Actionneur de ventilateur-chauffage

Le ventilateur-chauffage fournit de l'air chaud à une vitesse donnée. Il est commandé par une carte d'interface relais 5V 1A de haute intensité, AC250V 10 A ; DC30V 10 A. Le montage contient aussi un microcontrôleur Arduino UNO et un dispositif Bluetooth (Figure 47).

Ce montage a pour but de régler la température ambiante selon les instructions envoyées par l'application (Software).

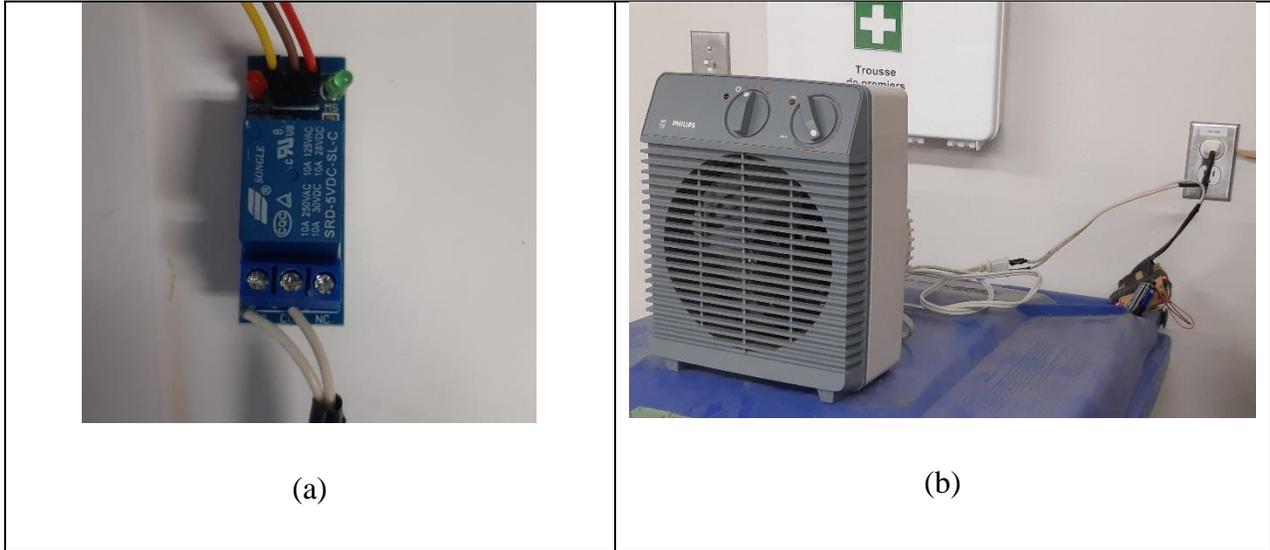


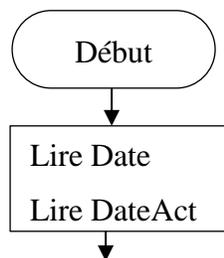
Figure 47. Actionneur de ventilateur-chauffage : a) carte d'interface relais, b) montage complet.

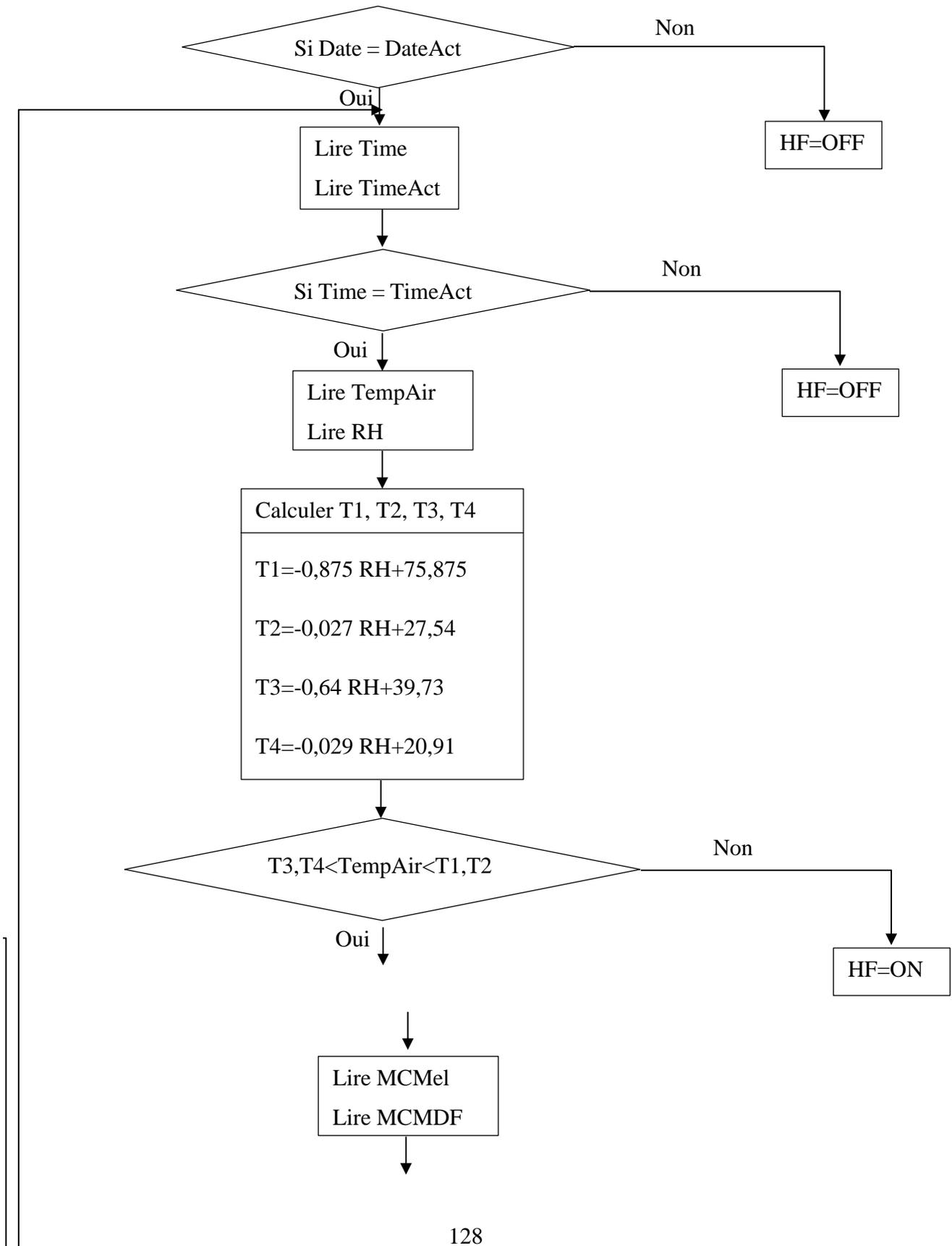
N.B : Pour tous les capteurs et actionneurs, les différentes parties sont liées par un câblage de fil de liaison (câble Dupont). L'ensemble final est calibré pour donner des valeurs plus précises et plus proches de la réalité. **GESTION ÉNERGÉTIQUE (SOFTWARE)**

Dans cette section, on présente les programmes élaborés et les interfaces d'utilisation.

5.4.1 Structure de l'application

L'algorithme de l'application est structuré comme suit (Figure 48) :





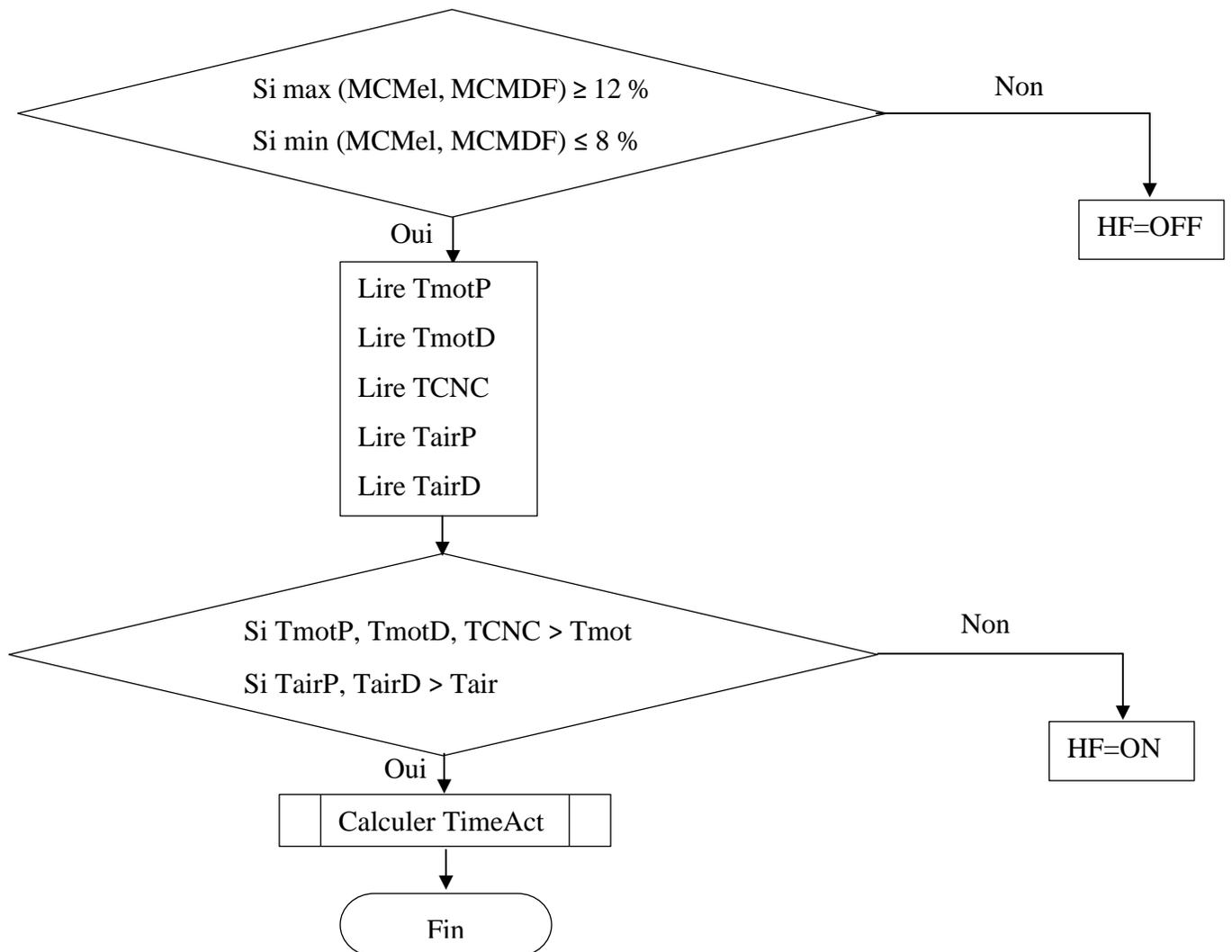


Figure 48. Algorithme de l'application Énergie 4.0 (WEM 2.0)

Nomenclature :

Symbol	Explication
HF	Chauffage, Ventilateur (Heater, Fan)
Date	Date actuelle (système)
DateAct	Date d'activation (mise en marche de l'atelier exemple : Lundi 5 décembre 2022)
Time	Heure actuelle
TimeAct	Heure d'activation (mise en marche de l'atelier exemple : 8H00)
TempAir	Température de l'air ambiant
RH	Humidité relative de l'air ambiant
T1,T2,T3,T4	Température des limites de la zone du confort thermique
MCMel	Taux d'humidité de la Mélamine
MC MDF	Taux d'humidité du MDF
TmotP	Température du moteur de la pompe à vide
TmotD	Température du moteur du dépoussiéreur
TairP	Température de l'air sortant de la pompe à vide
TairD	Température de l'air sortant du dépoussiéreur
TCNC	Température du moteur de la CNC
Tmot	Température consigne des moteurs
Tair	Température consigne de l'air sortant

5.4.2 Interface d'utilisateur de l'ordinateur

L'interface d'utilisateur joue le rôle de l'intermédiaire entre le programme informatique et l'utilisateur (Figure 49). Elle est composée de trois zones principales. La zone de connexion contient six espaces identiques. Chaque espace est relié à un dispositif (capteur de température et humidité, capteur de température de la pompe à vide, capteur de température du dépoussiéreur, capteur de température de la machine CNC et l'actionneur de chauffage ventilateur). Notre application regroupe la connexion des six dispositifs pour pouvoir transmettre les données. La zone de contrôle des

données contient les boutons de commande. Avec ces boutons on peut visualiser les données dans un tableau sur l'interface, arrêter l'enregistrement et/ou l'effacer ou bien enregistrer les données dans un fichier Excel et sur Google Cloud. Le fichier Excel est enregistré sur le disque dur et accessible après l'arrêt et l'enregistrement, tandis que le même fichier peut être consulté sur Google Cloud via un compte utilisateur (Figure 50).

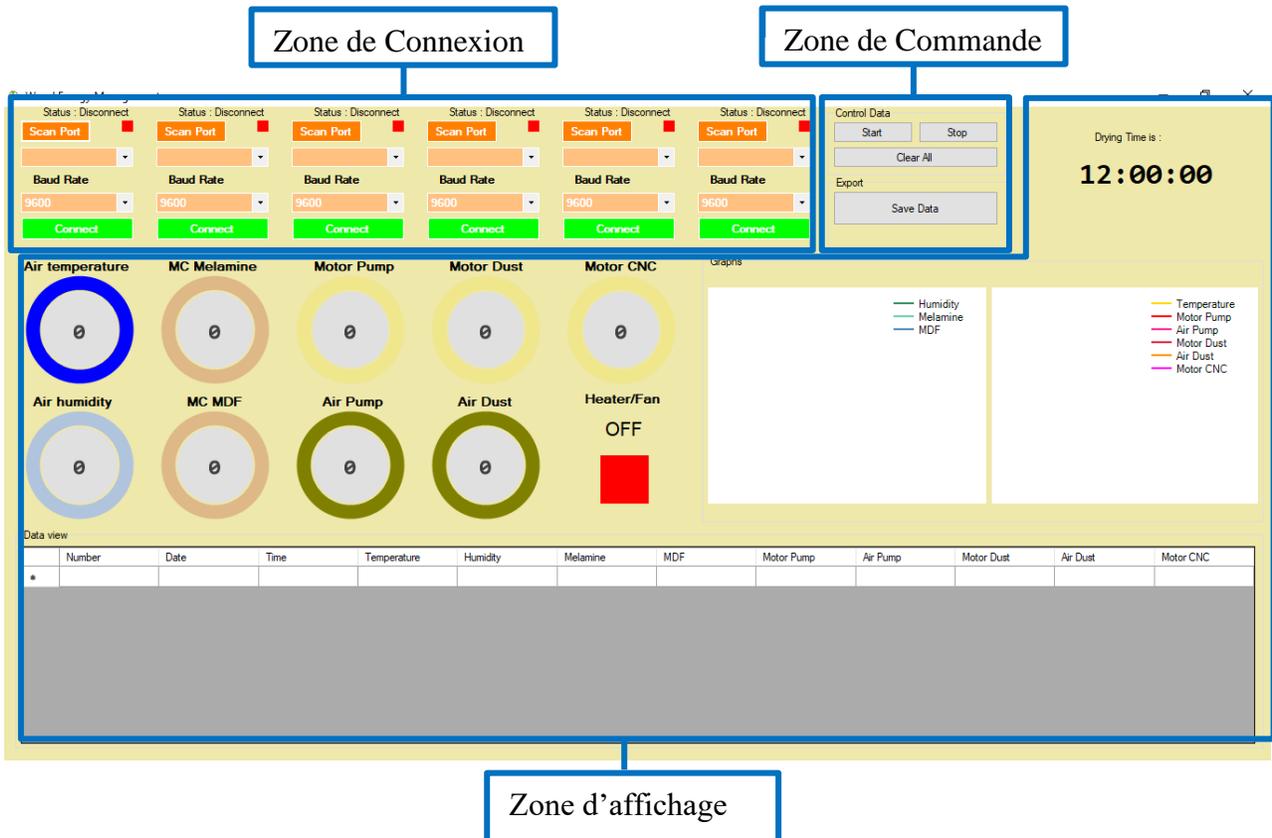


Figure 49. Interface d'utilisateur de l'ordinateur

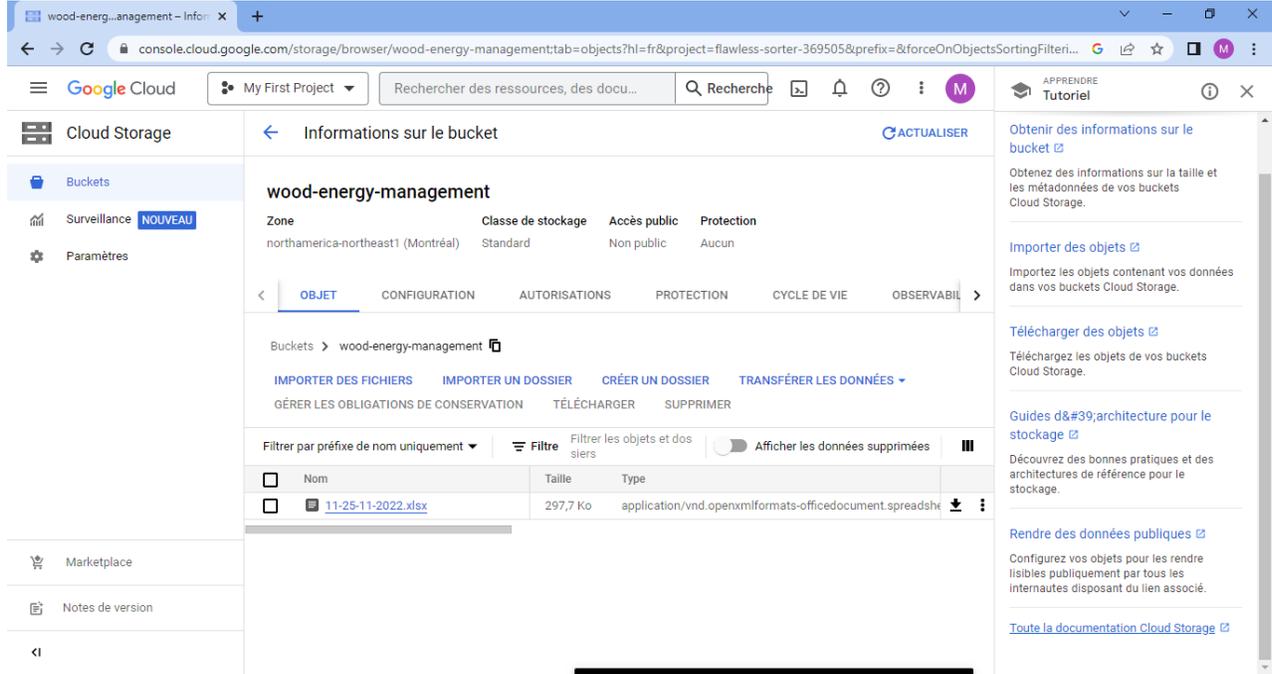


Figure 50. Interface Google Cloud

5.4.3 Interface d'utilisateur du cellulaire

Contrairement à l'interface d'utilisateur de l'ordinateur, l'interface d'utilisateur du cellulaire nous permet juste de visualiser les données sans intervenir sur les différents éléments. Elle est composée de deux niveaux : le premier niveau assure la connexion entre le cellulaire et le dispositif (exemple le capteur de température et humidité de l'air) et le deuxième niveau affiche les valeurs de ces données (Figure 51).

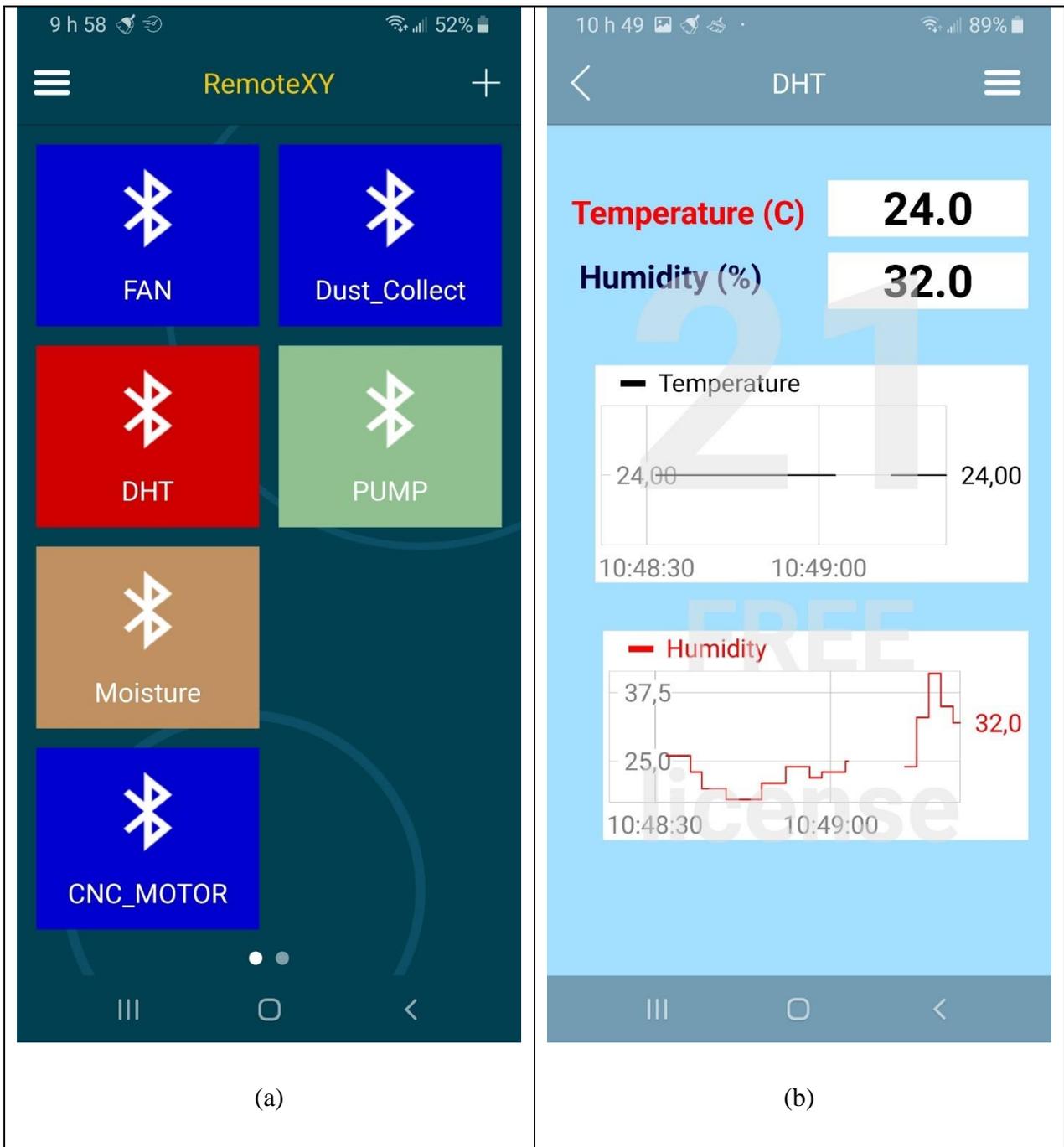


Figure 51. Interface d'utilisateur du cellulaire : a) connexion, b) affichage des données.

5.5 SIMULATION, RESULTATS ET DISCUSSION

Pour valider notre approche, on a procédé par la simulation d'un cas réel. Cette étape consiste à implanter la solution 4.0 et extraire les données de température et humidité reçues des différents capteurs pour ensuite simuler la consommation énergétique avec et sans la solution proposée. La différence de consommation sera considérée comme le gain en efficacité énergétique de la solution 4.0. D'abord, on branche les capteurs dans de différents endroits pendant que toutes les machines sont en arrêt, ensuite on ouvre l'application pour se connecter aux différents capteurs et on enregistre les données. L'enregistrement a commencé à partir de 8h46m10s (AM) tandis que les machines sont allumées à 9h04m10s et éteintes à 11h46m10s, pendant cette période on enregistre une lecture chaque 10 secondes. Les températures enregistrées sont présentées dans la Figure 52.

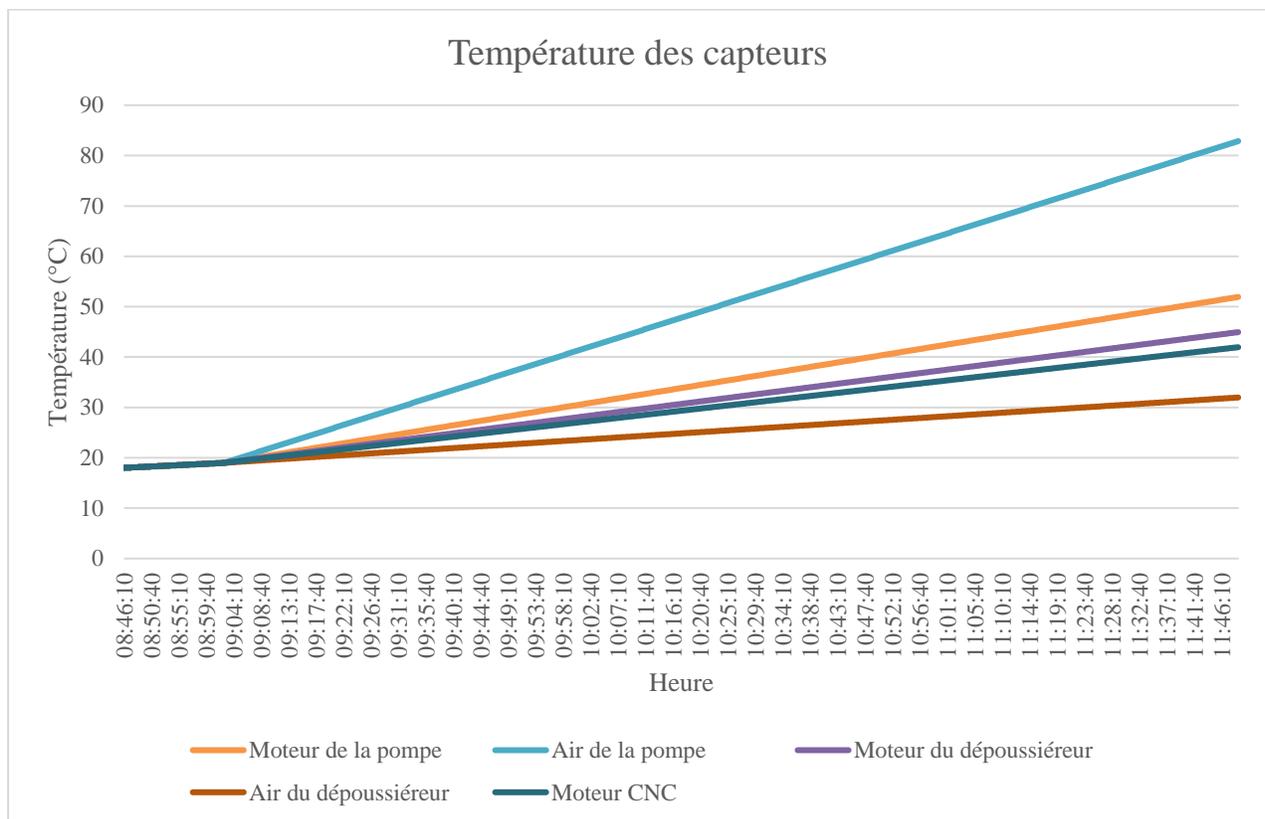


Figure 52. Évolution de la température des appareils en fonction du temps

L'humidité relative de l'air et les teneurs en humidité de la mélamine et le MDF sont présentées dans la Figure 53.

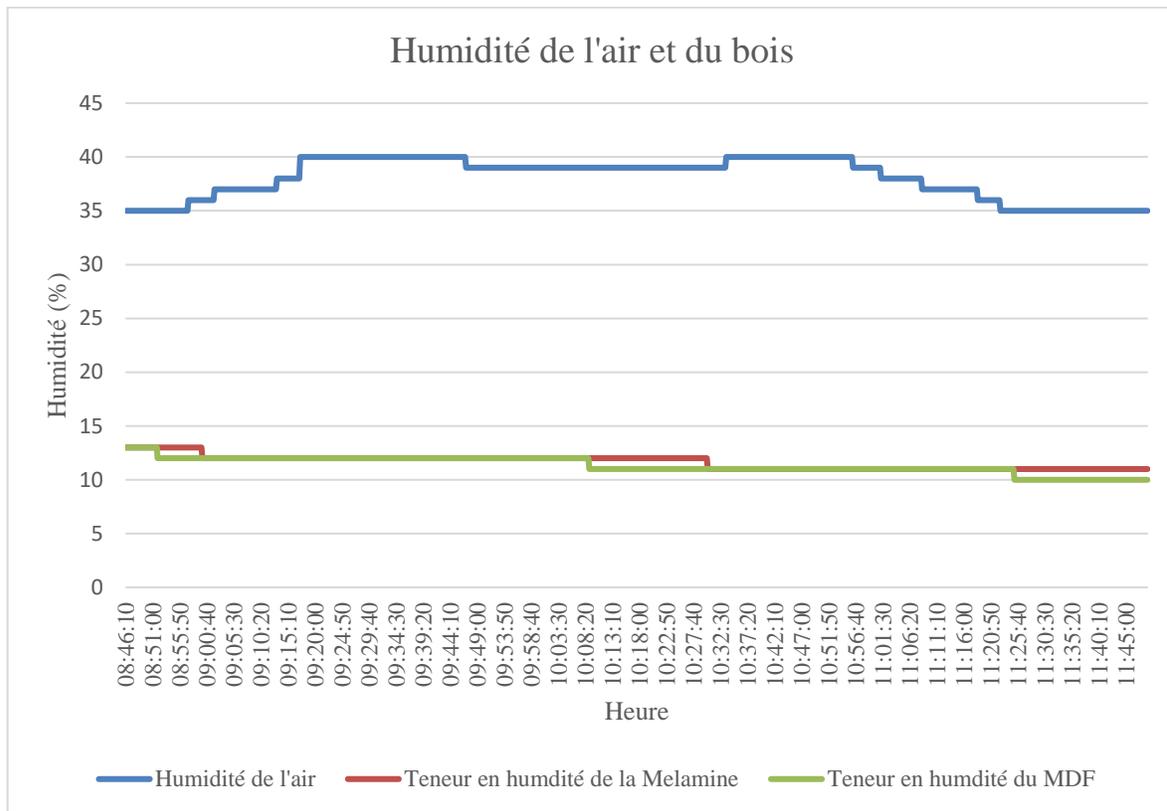


Figure 53. Évolution des humidités en fonction du temps

Pour déterminer l'avantage d'utiliser l'application (la solution 4.0), on compare le mode de fonctionnement non assisté (sans l'application) et le mode fonctionnement assisté (avec l'application). Le mode de fonctionnement non assisté est commandé par l'opérateur en se basant sur l'expérience de l'équipe technique. Il consiste à régler la température manuellement selon la sensation des opérateurs et leur confort vis-à-vis l'environnement. D'abord, le chef d'équipe allume le chauffage quelques minutes avant la rentrée des employés. S'il trouve que la température de départ est très basse, il règle le chauffage au maximum ce qui implique une consommation maximale du carburant, tandis que le mode de fonctionnement assisté est un mode automatisé dont l'opération d'allumage du chauffage est calculée, l'augmentation de la température est graduelle et le confort thermique est garanti par un calcul des paramètres de l'environnement. Pour cela, on établit un

graphe qui illustre les changements de fonctionnement du chauffage et la température ambiante pour les deux modes de fonctionnements.

La Figure 54 montre les modes de fonctionnement du chauffage avec et sans l'application de la solution 4.0, on remarque la solution 4.0 commence à recevoir les informations et réagit pour atteindre une température dans la zone de confort thermique,

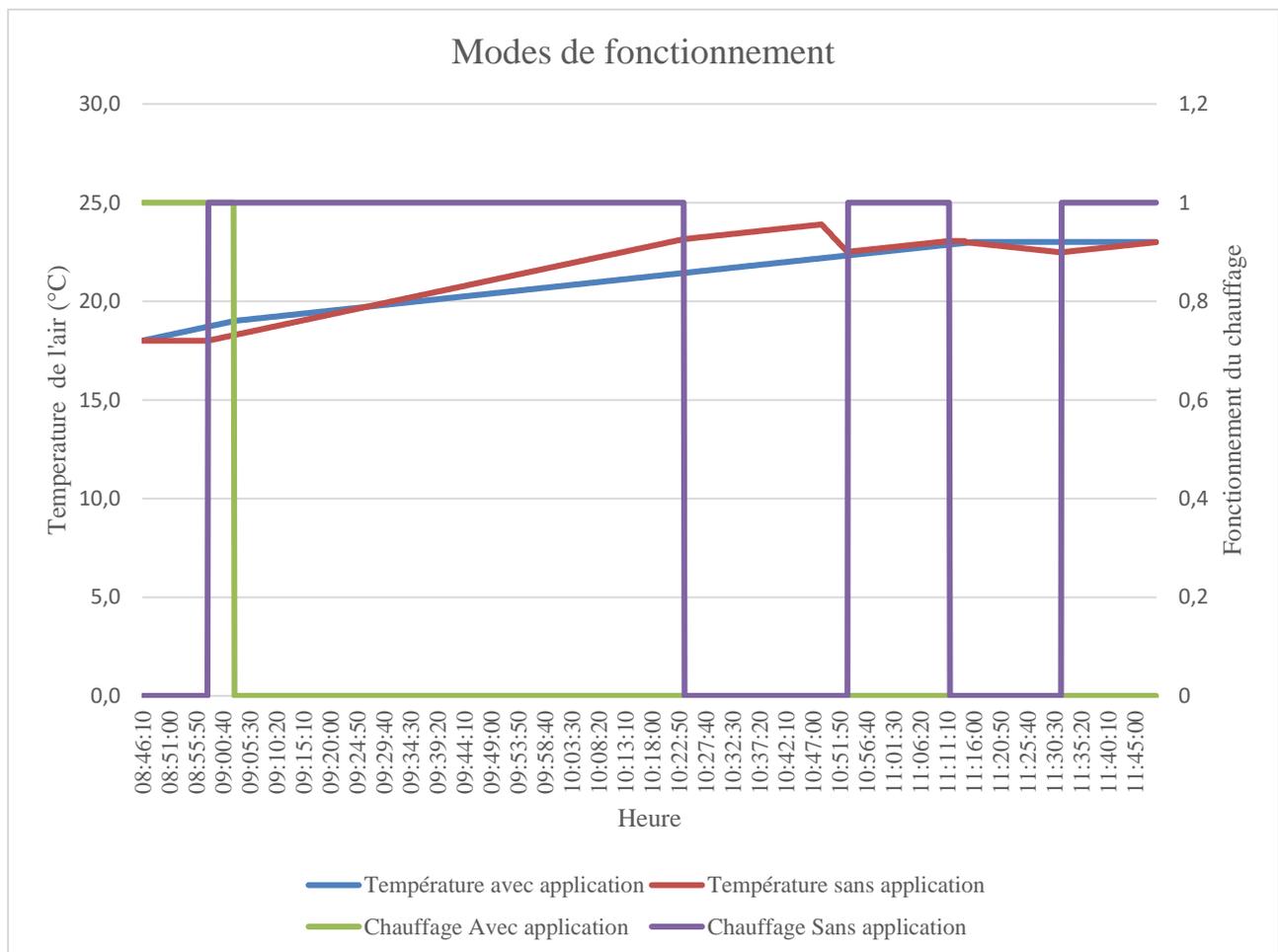


Figure 54. Comparaison entre le mode de fonctionnement avec l'application et le mode de fonctionnement sans l'application

La différence de consommation en carburant (gaz propane) est calculée à partir de la Figure 54 en considérant le même modèle du chauffage utilisé.

Pour notre cas, on a simulé avec le chauffage suivant :

- Marque : Modine
- Modèle : PDP250
- Énergie : Propane
- Consommation : 250 000 Btu/h
- Rendement : 83%

En considérant les hypothèses suivantes :

- Le même modèle du chauffage Modine PDP250;
- La consommation du chauffage est 1 L pour 25 000 Btu à l'heure (théorique);
- Prix de propane égal à 0.85\$/L

Les résultats sont illustrés dans le Tableau 15 :

Tableau 15
Comparaison des consommations avec et sans l'usage de l'application.

Mode	Temps Total de fonctionnement	Consommation (Btu)	Consommation (kWh)	Consommation Propane (L)	Coût de chauffage (CAD)
Avec Application	16m30s	68750	20,15	2,75	2,34
Sans Application	02h01m20s	505555,56	148,2	20,22	17,19
Différence	01h44m50s	436 805,56	128,05	17,47	14,85

N.B : ce calcul est basé sur des données expérimentales dans un atelier de recherche, son but est de montrer l'intérêt d'appliquer cette solution. Cependant, pour avoir des données plus réelles il faut l'appliquer à un cas industriel pendant une période d'un an car l'extrapolation n'est pas évidente. La comparaison montre que notre solution est avantageuse dans les points suivants :

- Meilleur contrôle de l'environnement (confort thermique);

- Meilleur contrôle de la teneur en humidité des matériaux à base de bois (mélamine et MDF);
- Gain en efficacité énergétique par la réduction de la consommation de 128.05 kWh qui vaut 14.85 \$ sur une période de 3 heures.

5.6 LIMITATIONS DE LA SOLUTION 4.0

Les limitations de la solution sont dues principalement aux choix d'outils et solutions, le volume de données à traiter et la sécurité informatique (cybersécurité). Ces points peuvent influencer négativement le bon fonctionnement de la solution 4.0, alors ils sont toujours un objet d'amélioration.

5.6.1 Choix des outils

Opter pour l'industrie 4.0 est avant tout un investissement, alors les choix technologiques constituent un facteur clé dans la réussite de la démarche. Pour faire un bon choix, une étude approfondie du marché s'impose, cette étude concernera le choix du matériel (capteurs, actionneurs, appareils de connexion, lunette RA) et le choix des logiciels (gestion d'énergie, traitement des données).

Au début, on avait le choix entre plusieurs fournisseurs de solution, mais le problème était de trouver une solution qui répond vraiment à nos besoins, c'est-à-dire qu'elle prend en charge tous les aspects de la problématique à savoir la température et humidité de l'environnement, le taux d'humidité des panneaux en bois, les températures des différents appareils, le fonctionnement du chauffage ventilateur et les images thermiques de tous les éléments superposés sur un fond réel (RA). De plus, la solution doit assurer la transmission, le traitement et l'affichage des données en temps réel sur un support infonuagique (Cloud). Malheureusement, les solutions présentes actuellement sur le marché sont limitées ou standardisées ou bien les fournisseurs proposent des solutions sur mesure ce qui s'avère très coûteux pour notre cas. Dans ce cas, on a opté pour une solution moins compliquée et mieux adaptée. Elle contient juste les éléments essentiels pour faire fonctionner la solution, mais elle donne des résultats acceptables.

5.6.2 Volume des données

Le volume des données (volume des mégadonnées) influe directement sur la solution. L'acquisition, le traitement et le stockage des données sont des paramètres à prendre en considération avant l'implantation (support physique, serveurs, infonuagique, etc.).

Lors de l'application de la solution pour un essai de comparaison (quelques heures), on a constaté l'apparition de quelques problèmes minimes, mais une utilisation remarquable des ressources informatiques. Bien que l'augmentation du volume des données lors d'une mise en marche pendant des jours engendre un volume de données plus important, le support actuel ne pourra pas assurer un bon fonctionnement de la solution et un bon traitement des données. On constate que le matériel informatique utilisé doit être en adéquation avec le volume de données et paramétré avant l'implantation.

5.6.3 Sécurité informatique (Cybersécurité)

La sécurité informatique ou bien la cybersécurité est un point critique dans l'implantation d'une solution basée sur l'industrie 4.0. Elle consiste à garantir un bon fonctionnement des équipements en éliminant les menaces extérieures qui peuvent nuire sur l'état de ses équipements et causer leur arrêt complet ou partiel et même à des pertes d'informations.

La cybersécurité dans l'industrie 4.0 touche les systèmes de contrôle industriels (ICS), suivis des passerelles de l'Internet industriel des objets (IIoT), et des capteurs et les actionneurs [159].

Il existe quatre moyens de base de la cybersécurité qui sont :

- 1) Authentification : identifier les utilisateurs et les appareils communicants surtout par les réseaux sans fil (Bluetooth, Wifi, Fréquences Radio).
- 2) Confidentialité : empêcher le vol, le piratage ou la falsification des informations sensibles en limitant les appareils autorisés à accéder aux données confidentielles.

- 3) Autorisation : s'assurer qu'un appareil est autorisé à utiliser un service avant d'accéder à ce service.
- 4) Disponibilité des données: protéger les données et éviter toute interruption causée par un dysfonctionnement en utilisant plusieurs endroits de stockage (support physique et/ou infonuagique).

Les paramètres qui déterminent le volume d'investissement dans la cybersécurité sont : la nature des dispositifs et de l'industrie, le volume de données à traiter, et la sensibilité de ses données. Le volume de données dans notre étude n'exige pas des niveaux élevés de cybersécurité, alors on a opté pour une protection basique qui comprend :

- Protection antivirus;
- Passerelle Bluetooth avec authentification unique;
- Google Cloud avec les couches de protection intégrées.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Dans notre projet de recherche, on a présenté les démarches d'implantation d'une solution basée sur le concept de l'industrie 4.0 dédié à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans un milieu industriel.

Le concept de l'industrie 4.0 peut améliorer l'efficacité énergétique dans une industrie manufacturière sous plusieurs formes, comme la réduction de la consommation énergétique des bâtisses industrielle (HVAC) ou la gestion de fonctionnement des installations et machines. Ceci est réalisé à l'aide de capteurs et actionneurs dits intelligents qui fournissent des données en temps réel et qui permettent ensuite de traiter ses données par un système d'intelligence artificielle. Ces systèmes permettent aussi de prendre la décision adéquate afin de réduire la consommation d'énergie. L'ensemble du système représente un système de gestion énergétique 4.0 (Energy Management 4.0).

Chaque industrie possède ses propres caractéristiques, différentes d'une industrie à l'autre. Dans notre cas, on a choisi l'industrie du bois, spécifiquement la troisième transformation, avec une étude de cas au Bas-Saint-Laurent. Le domaine de recherche est vaste et promoteur, non seulement à cause du nombre des sociétés actives dans cette région et le volume important d'investissement, mais aussi à cause des défis de cette industrie. Il s'agit en premier lieu de la matière première, sa nature, sa fabrication et sa procuration passant par son entreposage et sa transformation jusqu'à la gestion des moyens de production.

Notre problématique a été d'établir en premier lieu une feuille de route pour introduire le concept de l'industrie 4.0 dans le volet efficacité énergétique en prenant l'industrie du bois comme exemple, ensuite déterminer les étapes nécessaires pour aboutir à des résultats satisfaisants, puis appliquer ses notions sur un cas réel en montrant l'intérêt et le gain à introduire le concept de l'industrie 4.0 dans le domaine de l'efficacité énergétique. Pour cela, on a adopté une méthodologie qui repose sur la détermination de chaque concept indépendamment des autres et on a défini les liens possibles entre eux. On a constaté que chaque concept est constitué de plusieurs paramètres qui influent directement ou indirectement sur la nature de l'industrie du bois. Il s'agit de l'influence de

l'IdO, des mégadonnées. Dans ce contexte, l'infonuagique est plus importante que la simulation ou la fabrication additive due à la nature de l'industrie et au concept de l'efficacité énergétique.

De plus, l'efficacité énergétique utilise le concept des dispositifs énergétiques intelligents (capteurs intelligents) et les outils de gestion énergétique (Energy Management 4.0), ces deux paramètres ont une liaison directe avec l'IdO, les mégadonnées, et l'infonuagique. Pour sa part, l'industrie du bois, spécialement la troisième transformation, exige un environnement contrôlé en tout temps. Ce contrôle concerne d'une part la température d'air ambiant et l'humidité relative qui doivent respecter les exigences du confort thermique (les normes de la CNESST appliquées sur les entreprises du Québec) et, d'autre part, la matière première qui doit respecter des normes de qualité et d'entreposage, soit une teneur en humidité comprise entre 8% et 12%. Ce contrôle peut être garanti par un système de gestion énergétique (Energy Management 4.0) qui reçoit les mégadonnées à partir des capteurs intelligents, les traite par l'intelligence artificielle, ensuite agit sur les actionneurs intelligents. Le système doit aussi prendre en considération une consommation minimale de l'énergie, autrement dit, l'efficacité énergétique afin de répondre à des exigences économiques et environnementales. La compétitive est devenue très serrée surtout avec le prix de l'énergie qui ne cesse d'augmenter sachant que le chauffage au Québec dans la plupart des usines est garanti par des chauffages au propane. Donc, la réduction de la consommation d'énergie conduit à une réduction des coûts de production et une réduction des rejets des GES.

Dans ce rapport, on a présenté le cheminement de notre étude ainsi que la globalité des résultats obtenus. D'abord, on a commencé par la présentation de la problématique et la méthodologie de recherche, ensuite on a défini l'industrie du bois et ses dérivées, ses particularités et surtout l'aspect énergétique de cette industrie. À cause du nombre réduit des études qui traitent le sujet de l'efficacité énergétique et l'industrie 4.0 dans le contexte de l'industrie du bois, on était dans l'obligation de passer par une revue de littérature détaillée des trois concepts en même temps et repérer les liens entre eux. L'utilisation de la méthode PRISMA nous a conduit à un résultat de 19 articles qui traitent le sujet de l'efficacité énergétique et de l'industrie 4.0 avec une extension pour les autres industries. Ceci nous a permis de comparer les méthodes, tirer les points forts de chacune et, surtout, projeter les expériences précédentes sur notre cas afin d'avoir une idée sur les résultats finaux.

Le manque d'informations sur le comportement de la matière première dans le cas du confort thermique nous a obligé d'approfondir notre recherche par une étude détaillée du comportement thermo-hydrigue de deux types des matériaux à base de bois les plus utilisés dans la troisième transformation, soient la mélamine et le MDF. L'étude comprend quatre volets.

Le premier volet est une formulation mathématique du phénomène basée sur les travaux précédents qui nous a conduit au développement d'une nouvelle formule mieux adaptée au cas du confort thermique.

Le deuxième volet est d'utiliser cette formule pour simuler le phénomène à l'aide du logiciel COMSOL. Le phénomène est considéré comme une combinaison de transfert thermique et de transport d'humidité dans un milieu poreux. L'avantage de la simulation est de décrire et de montrer en détail l'influence transitoire des paramètres intrinsèques du matériau, comme le coefficient de diffusion D et la capacité thermique C_p ou bien d'environnement comme la température et l'humidité relative. Les résultats de la simulation sont présentés sous forme d'images qui montrent la distribution de la température et de l'humidité à l'intérieur des matériaux ou bien sous forme de graphe qui montre l'évolution de la température et l'humidité en fonction du temps.

Le troisième volet est une étude expérimentale qui consiste à mettre des échantillons de mélamine et MDF sous les conditions (points) extrêmes de la zone du confort thermique et tracer le graphe d'évolution du taux d'humidité en fonction de temps pour chaque condition et chaque matériau. À la fin, on déduit le temps nécessaire pour atteindre les valeurs de taux d'humidité de 8% et 12%.

Ces résultats sont utilisés par la suite dans le quatrième volet pour établir un modèle basé sur les réseaux de neurones artificiels qui prédit le temps nécessaire pour atteindre n'importe quel taux d'humidité de la mélamine ou MDF à partir de la température et l'humidité de l'air. Ce modèle utilise la méthode de rétropropagation (Back propagation) couplée à l'algorithme d'apprentissage de Levenberg Marquardt. L'architecture finale est de 3-10-7-1 pour la mélamine et 3-10-10-1 pour le MDF tandis que les indices de performance montrent une erreur minimale et une grande corrélation avec les données expérimentales.

La comparaison entre les résultats expérimentaux et les RNA nous a donné des valeurs acceptables, ce qui consolide le calcul des indices de performance tandis que la comparaison entre les résultats expérimentaux et la simulation diffère d'un cas à un autre. L'erreur est minime pour les plus petites différences de température (0.2%) et elle augmente avec l'écart de température (14.2%). Cet écart est dû principalement à l'approximation du modèle, les hypothèses de départ et la non-linéarité du phénomène, mais malgré cet écart, le modèle est acceptable. À la fin, nous avons constaté que les quatre volets de l'étude sont complémentaires.

L'analyse exhaustive de notre sujet de recherche sous ses différents angles a été consolidée par une étude de cas. Pour cela, on a pris l'exemple de l'atelier d'usinage du SEREX qui possède les éléments essentiels dans n'importe quel atelier ou usine (chauffage, machine CNC, dépoussiéreuse, pompe à vide, aire d'entreposage). On a construit notre propre modèle qui commence par l'acquisition des données (capteurs intelligents installés sur les différents appareils) puis, le traitement de ces données en considérant le confort thermique des usagers, le taux d'humidité admissible pour les panneaux et la consommation efficace de l'énergie, enfin l'agissement sur l'actionneur.

On a utilisé cinq capteurs (température et humidité de l'air, taux d'humidité de la mélamine et le MDF, température de la pompe à vide, température du dépoussiéreur, température d'une machine CNC) et un actionneur double rôle chauffage/ventilateur. Pour chaque élément, le signal est traité par un microcontrôleur Arduino UNO R3 et transmis par un dispositif Bluetooth HC-06. Les données reçues par les capteurs sont traitées avec un algorithme qui assure les conditions de confort thermique, le taux d'humidité des panneaux, et l'efficacité énergétique en agissant sur le chauffage/ventilateur.

À la fin, une simulation est effectuée pour montrer l'intérêt d'appliquer la solution 4.0, la différence entre l'application de la solution concernant le contrôle de la température et l'humidité de l'air, le contrôle du taux d'humidité des panneaux et l'économie en énergie. On a trouvé un gain en énergie de 128.05 kWh qui vaut 14.85 \$ sur une période de 3 heures dans une saison d'automne, (température extérieure moyenne).

Alors que ce domaine est large et inexploité, cette étude ouvre les portes pour les futures avenues, les champs d'études sont classés en trois niveaux :

- 1) Premier niveau concerne l'application des notions présentées dans cette étude à l'industrie du bois. Il est recommandé d'ajuster les paramètres et les hypothèses de départ afin d'aboutir à des résultats plus proches des cas réels. Toutefois, l'industrie du bois et des dérivés est aussi vaste, commençant de la première, la deuxième, et la troisième transformation passant par le matériau utilisé que ce soit du bois franc ou une dérivée et allant jusqu'à la taille de l'entreprise qu'elle soit un atelier, une PME ou bien une grande usine. Ce niveau est dédié aux techniciens et ingénieurs.
- 2) Deuxième niveau concerne l'application de la démarche pour d'autres industries surtout les industries énergivores comme les fonderies, l'industrie automobile, et l'industrie agroalimentaire, où la définition des paramètres change. Par exemple, pour le cas des fonderies, la consommation d'énergie se concentre plus à la fonte du métal et au traitement thermique. À ce niveau on définit les endroits les plus exigeants en matière de surveillance et on monte notre modèle sur cette base comme on a fait pour notre cas. Ce niveau sera une opportunité pour des recherches en maîtrise.
- 3) Troisième niveau concerne l'amélioration de la démarche et/ou proposition d'une autre démarche, qui sera plus globale et qui prend en considération d'autres aspects comme la production ou la maintenance. La nouvelle démarche peut être plus détaillée et décrire chaque concept. Par exemple, pour le IIdO, montrer comment ce concept peut améliorer l'efficacité énergétique, ou utiliser le Cloud pour passer à un niveau supérieur du stockage des données massives avec une interface d'utilisation sur Cloud. Aussi, nous pouvons envisager l'utilisation de la RA dans un champ plus vaste comme l'atelier flexible. Ce niveau sera une opportunité pour des recherches de doctorat.

Pour conclure, ce travail de recherche a abouti aux résultats souhaités et on a démontré que :
« L'industrie 4.0 peut être utilisée comme un outil pour améliorer l'efficacité énergétique dans l'industrie du bois et ses dérivées, et les résultats indiquent un gain considérable ».

ANNEXES

1) Article 1: «Energy Efficiency and Industry 4.0 in Wood Industry: A Review and Comparison to Other Industries».



Review

Energy Efficiency and Industry 4.0 in Wood Industry: A Review and Comparison to Other Industries

Mohamed Haddouche * and Adrian Ilinca

Wind Energy Research Laboratory (WERL), University of Quebec at Rimouski (UQAR),
Rimouski, QC G5L 3A1, Canada; adrian_ilinca@uqar.ca
* Correspondence: mohamed.haddouche@uqar.ca

Abstract: This paper presents a literature review of recent research on introducing the Industry 4.0 approach to improving energy efficiency, especially in the wood industry. While researchers focus on processes, service, and customer concepts, the effect on energy consumption is less addressed in these studies and applications. This paper focuses on previous works that discuss how to apply Industry 4.0 concepts to energy issues, such as to achieve better efficiency and performance for the industry in general and the wood industry in particular. The complexity of the study requires a multistep development. First, we define each concept separately and the relationships between them. Second, we apply a search algorithm to find related articles with specific terms, and then use the PRISMA method to select the most important ones, eliminating duplicates and excluding articles that do not mention energy efficiency and Industry 4.0 in the manufacturing or wood industry. Third, we explain and categorize the results and consolidate the study with brief examples from other industries. Finally, we conclude the study by mentioning the limitations and perspectives.

Keywords: energy efficiency; Industry 4.0; wood industry; energy management 4.0; energy devices; smart factory



Citation: Haddouche, M.; Ilinca, A. Energy Efficiency and Industry 4.0 in Wood Industry: A Review and Comparison to Other Industries. *Energies* **2022**, *15*, 2384. <https://doi.org/10.3390/en15072384>

Academic Editor: Martin Junginger

Received: 21 February 2022

Accepted: 21 March 2022

Published: 24 March 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The industrial sector is the most energy-consuming sector before the transport and residential sectors. It accounts for about 31% of the overall energy consumption [1,2]. For this reason, manufacturers are placing increasing emphasis on energy efficiency through improvements in energy management, energy devices, and insulation. Energy efficiency improvement is the application of engineering principles and best practices to control the energy consumption of a facility. It is a continuous process that requires the full involvement of all stakeholders (managers, engineers, workers, etc.) to identify, formulate proposals, and implement energy efficiency technologies and practices to reduce energy consumption. Many technologies and practices are currently available and in development that could save energy if adopted by industry [3], classified into two main categories: energy management technologies and energy devices. In addition, various tools and methods are used, such as energy monitoring tools, process modeling and integration, optimization and simulation tools, energy analysis and decision support tools, etc. [1,4]. One of the recent innovations is the introduction of Industry 4.0 in manufacturing, in other words, the transition to the new industrial era.

In 2011, the term “Industry 4.0” became publicly known. The idea originated as an approach to strengthening the competitiveness of the German manufacturing industry. Since then, many companies, researchers, and universities have been interested in this concept [5–7].

Among the areas of interest for Industry 4.0 approaches, we retrieve manufacturing, logistics, maintenance, and energy. Unfortunately, energy is the least addressed area in this research so far. On the one hand, most Industry 4.0 research focuses on manufacturing

or maintenance and gives less importance to the energy area (we will discuss this topic below). On the other hand, the recency of the Industry 4.0 concept and the lack of studies and support make the research more difficult.

The following sections define the most important terms associated with Industry 4.0 and energy efficiency and their relationship, considering the concepts' recency. The representation of each term separately is necessary to understand each concept and determine the relationship. However, the pure definition could not give us the appropriate results, so we define the terms in a specific context and dissect each of them if necessary. Next, we will review the previous articles with the strengths and weaknesses, giving examples for the wood and other industries. Finally, we give the limitations of this study and offer recommendations for future studies.

Part I: Basic Definitions.

2. Energy Efficiency

According to the Quebec Ministry of Energy and Natural Resources, energy efficiency aims to “make the best possible use of available energy to obtain a better energy yield. Energy efficiency is improved when producing the same good or service with less energy [8]”.

In general, energy efficiency uses the best technologies or controls to reduce energy consumption (LED lighting, hybrid system, management software). Energy efficiency makes operations competitive and economically sustainable by including energy management [9]. Energy management is the continuous monitoring, maintenance, and improvement of energy performance [10]. Its objective is to organize industrial facilities to integrate energy efficiency into their management practices [11].

In industry, energy efficiency can be improved in thermal processing systems through better operation and maintenance practices, process optimization, and good insulation [12]. Energy efficiency is expressed as a ratio of an output (performance, service, goods, or energy) to an energy input [13]. Numerically, it is the result of the ratio of input energy to output energy expressed as a percentage [14]:

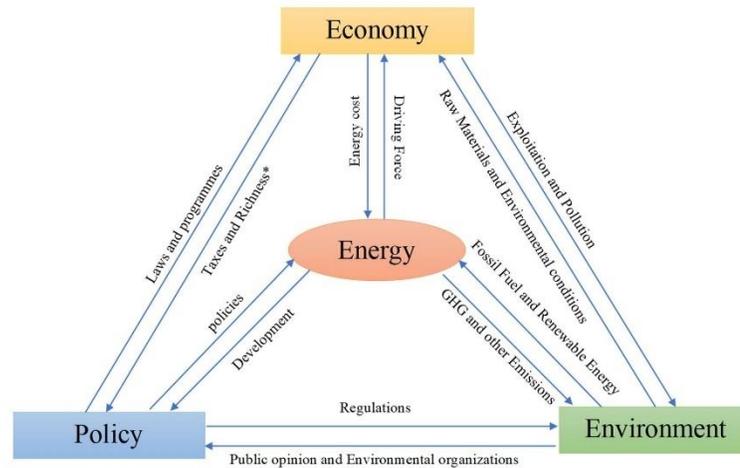
$$\text{Energy Efficiency} = \frac{\text{Energy Output}}{\text{Energy input}} \times 100\% \quad (1)$$

Improving energy efficiency is about increasing this ratio through technological, behavioral, and economic changes. [15] Energy efficiency is a shared field between many scientific disciplines such as engineering, economy, policy, environment, management, etc. We will detail the three most influential fields, i.e., economic, environmental, and policy (Figure 1).

2.1. Economic Impact

Economic activities need energy as a source of power. Since the first industrial revolution, fossil fuels such as coal and oil have been the primary energy source. With the increase in energy prices, the concept of energy efficiency has been developed. [16] The relationship between the economy and energy efficiency is an ongoing topic of debate. [17] Previous studies have shown economic and social benefits to consuming energy efficiently. [18] In industry, it is supposed to increase productivity and improve competitiveness [19–21]. However, it is not easy to understand the relationship between economics and energy efficiency because it depends on other parameters.

For example, Rajbhandari and Zhang [19] used data from 56 high- and middle-income economies between 1978 and 2012 to determine a relationship between economic growth and lower energy intensity. They also identified a long-term relationship between lower energy intensity and higher economic growth for middle-income economies. Finally, policy decisions to increase energy prices (carbon tax and emissions trading schemes) can increase energy efficiency trends [19]. This, in turn, can partially or more than fully offset the negative impact of higher energy costs on the economy, a win-win situation [22].



* Richness is used to express Gross Domestic Product (GDP)

Figure 1. Fields influencing energy development.

2.2. Environmental Impact

In addition to the economic impact, the environment can benefit from energy efficiency, knowing that burning fossil fuels generates energy and the emission of greenhouse gases (GHGs). GHG emissions significantly impact climate change, and the situation is worsening with industrialization, urbanization, and improved living standards requiring higher energy consumption [16], hence the need to improve energy efficiency, manage energy demand, and promote renewable energy production [13]. Furthermore, the adoption of energy efficiency in the industrial sector is one of the key measures to reduce GHG emissions [23].

2.3. Policies and Programs

Most countries have adopted government policies and programs to improve energy efficiency in many areas such as residential buildings, industry, transportation, and utilities. Governments are implementing these essential policies and programs to improve energy efficiency, and industry is making commitments [24].

The International Confederation of Energy Regulators (ICER) established regulatory practices for promoting energy efficiency in its report. Energy regulators have committed to examining the best and promising practices promoting energy efficiency through case studies [25]. The International Energy Agency (IEA) makes 25 energy efficiency policy recommendations across 7 priority areas [26]. In 2019, the Global Commission for Urgent Action on Energy Efficiency was established at the 4th Annual IEA Global Conference on Energy Efficiency in Dublin, Ireland [27].

In 2012, the European Commission issued guidance notes called the Energy Efficiency Directive 2012/27/EU. The EU set an energy efficiency target of 20% by 2020 (relative to projected energy use in 2020) and revised it in 2018 by updating some specific provisions and introducing new elements. It sets an overall EU energy efficiency target for 2030 of at least 32.5%. It requires energy companies to achieve savings of 1.5% of their annual energy sales to the end-user [28,29].

In the United States, the Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, in collaboration with other organizations, has developed an energy program called EECBG (Energy

Efficiency and Conservation Block Grant Program). The EECBG program is managed by the Weatherization and Intergovernmental Program (WIP) of the Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) of the U.S. Department of Energy (DOE). The objective of the EECBG Program is to assist eligible entities in developing strategies to reduce fossil fuel emissions, decrease total energy consumption, and improve energy efficiency in appropriate sectors [30,31].

The Canadian Government subsidizes federal programs such as EcoENERGY, while some provinces offer their own programs [15]. For example, in Quebec, the Government has developed an energy policy for 2030 with the following objectives [32];

- Improve the efficiency of energy use by 15%;
- Reduce the quantity of petroleum products consumed by 40%;
- Eliminate the use of thermal coal. Improve the efficiency of energy use by 15%.

3. Industry 4.0

In scientific literature, there are many definitions of Industry 4.0. The term was first announced in 2001 during the Hannover Fair (Industrie 4.0 in German). Moreover, it was officially proclaimed in 2013 as a German strategic initiative that transformed the manufacturing sector [33]. Industry 4.0 refers to the next industrial revolution. This industrial revolution came after three other industrial revolutions in history. The first industrial revolution began in the 18th century in Great Britain and was characterized by the introduction of mechanical production and the internal combustion engine. From 1900, electrification and the division of labor led to the second industrial revolution (examples: the breakdown of production into specialized repetitive tasks called Taylorism or the shift to the assembly line called Fordism). The third industrial revolution, around 1970, was marked by the digital revolution or the automation and robotization of manufacturing, with the advent of advanced electronics and information technologies such as semiconductors and PLCs [5,6] (Figure 2).

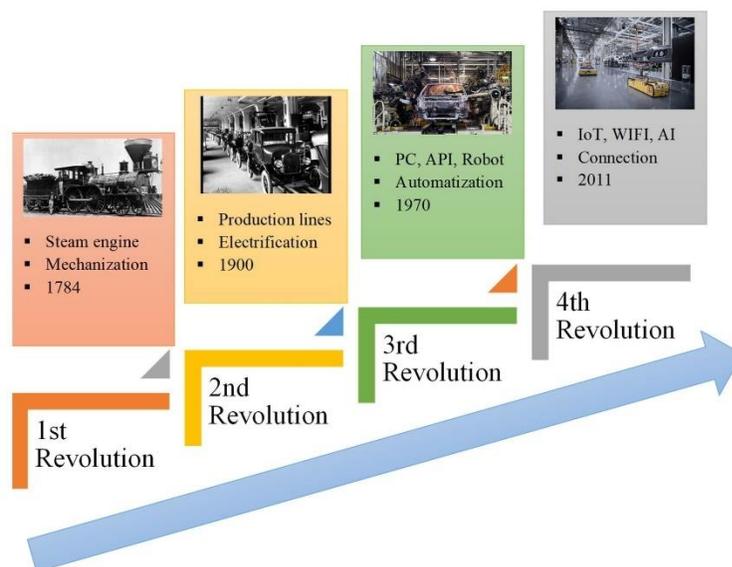


Figure 2. The four industrial revolutions.

The fourth industrial revolution, whose birth we are experiencing today, goes beyond the concept of traditional industry. Instead, it is about the intelligent industry and complete digital integration by giving machines communication, decision, and performance capabilities [6,34].

As a result of the accelerated development of communication technologies, the world is becoming a small village. It is increasingly connected, and customer requirements are becoming more and more precise in a short time [35]. Furthermore, due to the increasing number of intelligent and connected products in the market, industries are changing the management of systems [36]. In this context, Industry 4.0 has the primary mission of creating an intelligent environment from products, procedures, and processes to smart factories. The smart factory is the core of Industry 4.0 (Figure 3) [37]. Therefore, it combines smart sensors, artificial intelligence, and data analytics to optimize manufacturing in real-time [33].



Figure 3. Industry 4.0 and smart factories P.Odoroaga [38].

Industry 4.0 is based on nine pillars [39,40].

3.1. Internet of Things (IoT)

In 2012, General Electric invented the concept of the “Industrial Internet”. It integrates the physical and digital worlds that combine big data analysis with the Internet of Things. The concept assumes a much broader application domain than Industry 4.0 and covers power generation and distribution, healthcare, manufacturing, the public sector, transportation, and mining [41–43]. One of the pillars of Industry 4.0 is the extensive use of the Internet, not only as a low-cost channel to connect machines, devices, sensors, and people, but also to create new product functions and features related to the ability to use the Internet as an information source [44]. One of the most straightforward definitions of the Internet of Things is a universal interconnected network of uniform addressed objects communicating with standard protocols [40,45,46].

3.2. Cyber-Physical Systems (CPS)

Cyber-Physical Systems (CPS) are technological systems for managing the interconnection between physical and computational properties of a given system that can interact with humans [47,48]. A CPS is a physical device, object, or equipment that can be transformed

into a virtual model in cyberspace. The virtual model monitors and controls the physical aspect, and vice versa; the physical aspect sends data to update the virtual model [49,50]. Therefore, SPCs are central to the vision of Industry 4.0 [51].

3.3. Augmented Reality (AR)

Augmented Reality (AR) is a set of technologies that uses an electronic device to visualize a real-world physical environment combined with virtual elements (e.g., an augmented reality lens) [52]. For example, AR can provide engineers with real-time information to help them make decisions and improve work procedures such as selecting parts, changing layout, dimensions, or properties [39,40]. In the energy domain, AR can also help in decision making to select the suitable energy device (heating, cooling, fan, etc.) based on the requirements or physical and thermal properties.

3.4. Big Data and Analytics

The increasing use of sensors and connected systems creates a high volume of complex, high-speed data called Big Data [48,53]. Collected from various sources, it will be needed to support real-time decision making [39,40]. Therefore, the need for data analysis becomes more critical for factories [53]. Considering this situation, artificial intelligence (AI) becomes the optimal solution [54]. Artificial Intelligence (AI) is a cognitive science characterized by strong development in robotics and machine learning [55]. On the other side, manipulating a big volume of data is risky for security and privacy, and the priority is to ensure their preservation. Therefore, blockchain technology is suitable for Industry 4.0 applications [56].

3.5. Simulation

Simulation is a necessary and economical tool before realizing a new project or in the improvement of an existing product and/or process [57,58]. It allows the physical world to be projected into a virtual model, including the plant, machines, products, and humans [39,40]. Thus, simulation can be a good solution in the energy field to determine the airflow, heat transfer, temperature, etc., especially in narrow areas, where the implementation of sensors is not easy, or for predicting physical phenomena in the case of high risks.

3.6. System Integration (Horizontal and Vertical System Integration)

The main mechanisms of the industrial organization are integration and self-optimization [59]. Integration in the vertical and horizontal dimensions means the automation of communication and cooperation, especially standardized and partially autonomous processes that require minimal human intervention [60,61].

3.7. Cloud Computing

According to the National Institute of Standards and Technology (NIST), cloud computing is “a model for providing convenient, on-demand access to a shared pool of configurable computing resources (e.g., networks, servers, storage, applications, and services) that can be rapidly provisioned and released with minimal management effort or interaction with the service provider [62,63]”. The principle is based on the connections of different devices to the same cloud and sharing information between them. It can be a set of machines and the entire factory floor [40,64].

3.8. Additive Manufacturing (AM)

Additive manufacturing is used to produce prototypes or products in small series. Manufacturers can reduce transportation distances and available inventory by decentralizing additive manufacturing systems [39,40]. Production should be faster and cheaper, and the economic realization of hybrid production systems combines additive manufacturing and fabrication processes [40,65]. The goal of AM is to create prototypes and products with complex geometry [66].

3.9. Autonomous Robots

The new generation of robots is not only used for highly repetitive and low-skilled work but also for medium-skilled routine activities [66]. With the development of M2M (Machine to Machine) and H2M (Human to Machine) concepts, robots are becoming more autonomous, cooperative, and flexible [39,40]. In Industry 4.0, robots can perceive, act, and perhaps even reason in the near future [67]. Autonomous robots significantly improve productivity by ensuring quality, speed, accuracy, and strength [68].

4. Relation between Energy Efficiency and Industry 4.0

Due to the increasing cost of energy, low price competition [69,70], and environmental legislation [68,70], the goal of the manufacturing company is to reduce the total cost of production while maintaining the same quality. On the other hand, the higher objective is the sustainable manufacture of goods with minimum energy [71,72] by developing methods to reduce energy consumption and improve energy efficiency. This can only be achieved by adopting a fully transparent energy consumption in plants, facilities, and machines. Here, energy management is necessary. A data and network management system can control production. Computer systems can be integrated into plants and machines. They can receive values measured by sensors (smart sensors) and controllers, record product data, and operate complex systems. In Industry 4.0, energy management requires an independent platform for remote accessibility of the plant [73].

Therefore, Industry 4.0 is applied to the energy efficiency domain in two ways: energy management and energy devices. In the following section, we will show how Industry 4.0 improves energy efficiency by improving energy management and energy devices and the different intervention cases of Industry 4.0.

4.1. Industry 4.0 Concepts to Improve Energy Efficiency: Application to the Wood Industry

Regarding energy management (EM), ISO 50001:2011 norm defines it as the “sum of fully integrated or interacting elements leading to the introduction of an energy policy and strategic energy objectives, as well as processes and procedures to achieve these strategic objectives [74]”. The pillars of EM are measurement, monitoring, evaluation, and control of energy in manufacturing while maintaining the same production requirements such as quality, cost, and delivery [75]. Energy management aims to guide industrial facilities to integrate energy efficiency into their management practices [11]. In Industry 4.0, energy management will be referred to as Energy Management 4.0. The role of energy management 4.0 is to provide energy data-driven decisions, monitor energy systems, optimize energy consumption autonomously [69,76], and improve energy efficiency. Energy data must be collected and synthesized from smart meters, sensors, and other tools (energy devices) [77,78] and then integrated into production management [77].

Energy efficiency addresses three cases: building, machinery, and process.

4.2. Buildings

Buildings are important energy systems, with the latest research showing that they are responsible for 40% of total energy consumption and 36% of greenhouse gas emissions [41]. New buildings' energy efficiency technologies are more accessible to implement than old buildings or renovations [12,41,79]. Thus, controlling and reducing the energy consumption of buildings is a real headache. There are three main actions to improve energy efficiency in buildings. The first is to improve insulation to reduce heating and cooling costs. The second is to adapt the automatic control systems of building management. The third is to modify the energy technologies used by changing the lighting devices (installing LED lamps) and using sensors and actuators to automate energy management. In the past, installing sensors and actuators required a significant modification of the building structure. However, newer technologies introduce so-called “smart” sensors and actuators and can use wireless communications, which has a technology and cost advantage. The integration and development of IoT-based smart sensors, devices, and protocols can help in

the transition to smart buildings [41]. In addition, Energy Management 4.0 is designed to control heating, cooling, ventilation, and thermodynamic systems by using data received from sensors and devices and processing them with artificial intelligence technology [18,80]. It allows organizing energy activities between consumers and suppliers by coordinating energy production capacities and consumers' needs [80].

4.3. Machinery

Nowadays, economic energy consumption is one of the main concerns of industrial companies in Industry 4.0 manufacturing systems [77]. The energy consumption of machining must be monitored in real-time to achieve efficient energy consumption (energy-efficient production). Nevertheless, it is not easy to establish an energy consumption model. Therefore, Industry 4.0 can provide a solution by deploying various smart sensors, collecting energy consumption data, and applying an AI method to determine energy demand characteristics. For example, a deep neural network (DNN) is a machine learning method that processes and analyzes Big Data to define manufacturing equipment's energy consumption characteristics or trends based on the data obtained from energy consumption monitoring [76]. It proceeds afterward by modifying and optimizing the equipment parameters without human intervention [41].

4.4. Process

Manufacturing processes involve many physical mechanisms to transform raw material into a finished product by changing its form and/or composition [81,82].

Compared to the total energy consumed, the energy spent in the process itself is small [82]. However, it is not negligible because the energy consumption of various industrial processes varies with time and the dynamic nature of the process energy [79,83].

Energy consumption awareness should be raised first, and then energy consumption should be monitored and analyzed in real-time to improve energy efficiency and optimize manufacturing processes' energy consumption [1]. Most standard production systems cannot collect energy consumption data in manufacturing processes [1,84]. In this regard, Industry 4.0 contains dynamic, efficient, automated, and real-time process communication for managing and controlling a dynamic manufacturing environment using the IoT [77].

In addition, the IoT uses data acquisition and control systems to sense, collect, store, analyze, display, and control facility processes [85,86]. Data are collected by smart sensors or other measurement equipment [85] and processed to provide information. The data collected from smart sensors are stored as Big Data by analysis tools [76] in the cloud [77]. Then, they are monitored and analyzed in real-time, integrated into energy management tools (e.g., energy management software, simulation tools), and defined into strategies and practices to improve energy efficiency [77] and reduce energy consumption [41].

5. Wood Industry Particularities

As a natural material, wood can produce energy (biomass) or consume energy (furniture fabrication) from trees to final products. This particularity gives it the intermediary position between vegetable plants and solid materials. It undergoes changes as a vegetable plant, such as drying, grinding, and burning, or as a solid material, such as machining, pressing, and folding. The processing of wood products requires extensive physical and chemical processes that consume a lot of energy. The main processes used for wood products are cutting, forming, drying, manufacturing, and finishing (Figure 4) [87]. On the one hand, the increasing cost of raw materials and production and the availability of material sources are forcing manufacturers to optimize the use of natural resources by adopting innovative solutions to save energy [88,89]. On the other hand, environmental regulations force wood processing companies to change their attitude towards energy consumption and management [75].

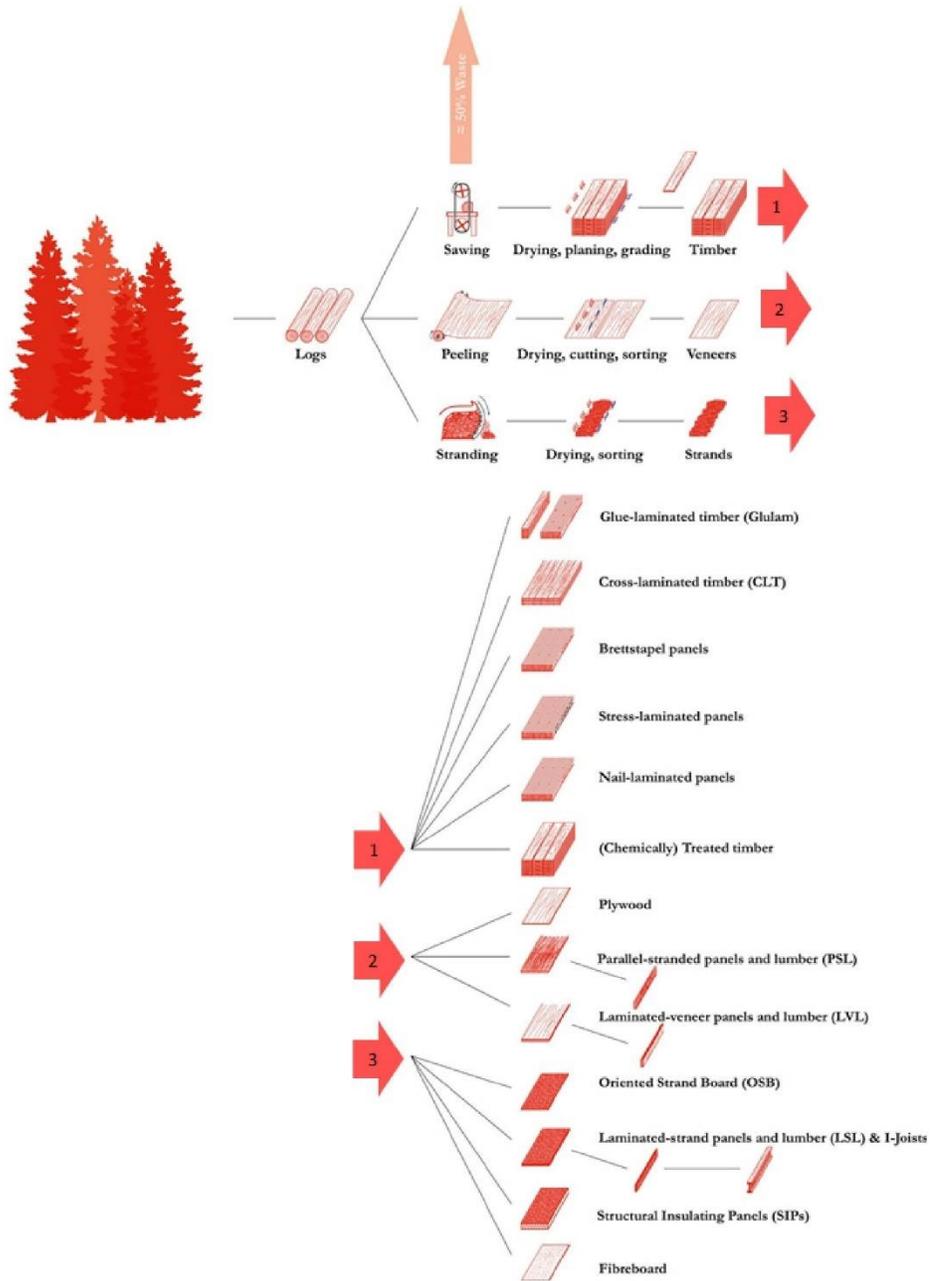


Figure 4. The wood products processing chain P.H. Fleming [90].

Saving energy using the Industry 4.0 concept in the wood industry is a vast and divergent topic. However, we mention two examples to clarify the context. The first example is drying. Drying is a standard process between vegetal and solid materials and is among the operations that consume the most energy in wood manufacturing. Wood drying is an energy-intensive operation, estimated to represent more than 40% of the total energy consumed in the process [91]. To compete, manufacturers need to reduce energy costs by reducing consumption in the drying process and adopting energy efficiency strategies [92,93]. Therefore, manufacturers and researchers emphasize developing energy-saving strategies in the wood industry and adopting recent innovations and technologies. Among them are the IoT and intelligent sensors to collect data from wood and the environment such as wood moisture content, air humidity, and temperature. Then, we treat the Big Data with an AI solution or Energy Management 4.0 system and actuate the dryer (heater and fans) to reduce the energy consumption and ensure the best drying quality. As a result, wood dryer manufacturers propose a new technology called a “Smart wood dryer”. The second example is dust collection. Like drying, the dust collection system is one of the most energy-intensive industrial processes, especially for the second and the third transformation. The energy efficiency approach can be applied to dust collection by improving the mechanical and electrical installation and adopting an energy management system [94]. Based on Industry 4.0, Beaulac et al. explain in detail the different ways to improve energy efficiency in the case of cyclone dust collectors. The solution is to adopt an Energy Management 4.0 system that provides energy data such as temperature, velocity, flow, pressure, and dust size [95]; monitors energy systems, and optimizes energy consumption. In addition, equipping the dust collection system with smart energy devices (sensors and actuators) can give the operators the possibility of controlling and reacting in real-time to avoid breakdowns and accidents.

Part II: Review of previous studies on energy efficiency and Industry 4.0, particularly in the wood industry.

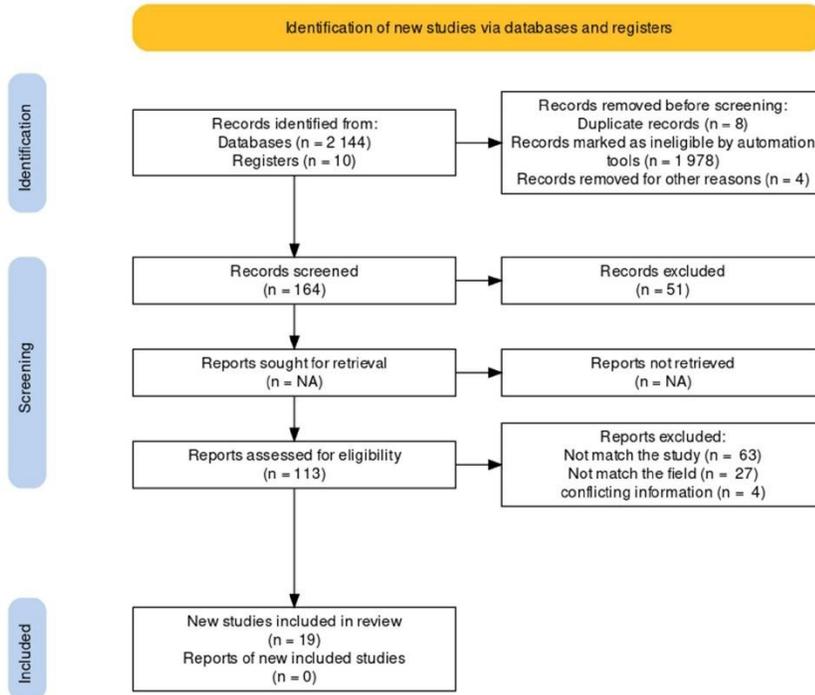
6. Methodology

In this section, we will present the procedures and methods adopted to justify the choices made for the development of this paper. Our study is a literature review of previous research available in the most known databases. Therefore, we will search and classify the articles using keywords (specific terms) and select the articles corresponding to the field using the PRISMA diagram (Scheme 1) [96].

The main research areas are Energy efficiency, Industry 4.0, and the Wood industry. In the literature, most of the previous studies focused on specific terms, for example: addressing energy management and Industry 4.0 (Energy Management 4.0) or energy efficiency with IoT and/or Big Data. Another issue is the peculiarities of the wood industry. For example, most Industry 4.0 studies and applications are related to large-scale industries. On the other hand, the concept of energy efficiency is addressed for energy-consuming processes (e.g., metal casting) or large industries (e.g., automotive industry). As a result, the wood industry is one of the least advanced industries in R&D and innovation compared to the computer and electronics industry, the automotive industry, or the aerospace industry.

Due to the small number of articles in this field and the specialization of those available, we dissect each concept and study the interaction between them. The first thought is “How do we dissect each concept?”

In practice, we can improve energy efficiency in two ways. The first is to choose methods and tools such as energy control tools, process modeling and integration, optimization and simulation tools, energy analysis, and decision support tools: in other words, energy management. The second is to equip the factory with adequate equipment to ensure good air conditioning and insulation and devices such as sensors, actuators, and machines with low energy consumption and reduced connection to each other. In this case, we use intelligent devices connected to an industrial wireless network. Thus, energy efficiency is divided into two terms: energy management and energy device.



Scheme 1. PRISMA flow chart for a review energy efficiency, Industry 4.0 and wood Industry.

As mentioned earlier, Industry 4.0 is based on nine pillars: IoT, Big Data, CPS, simulation, system integration, cloud computing, AR, additive manufacturing, and autonomous robots. However, in the energy space, we do not need all of these. If we refer to previous studies, the most used Industry 4.0 terms in energy efficiency are as follows: Internet of Things, Big Data and Analytics, Augmented Reality, and Simulation. The remaining ones can be treated as “Others”. For example, Autonomous Robots are considered a machine. Therefore, the dissection of energy efficiency takes these four pillars, and the rest will be regrouped in “Others”.

Our priority is the wood industry for the application, but the number of articles dealing with this industry is small. So, we take the example of other industries and project it to the wood industry, as illustrated in Figure 5.

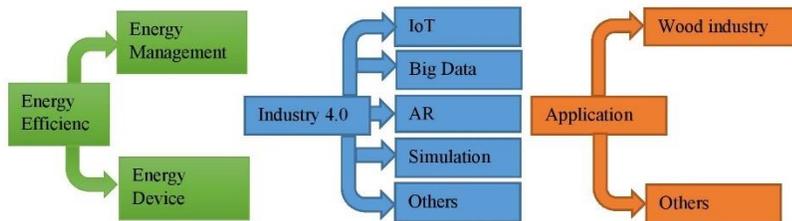


Figure 5. Dissecting diagram of energy efficiency, Industry 4.0, and wood industry.

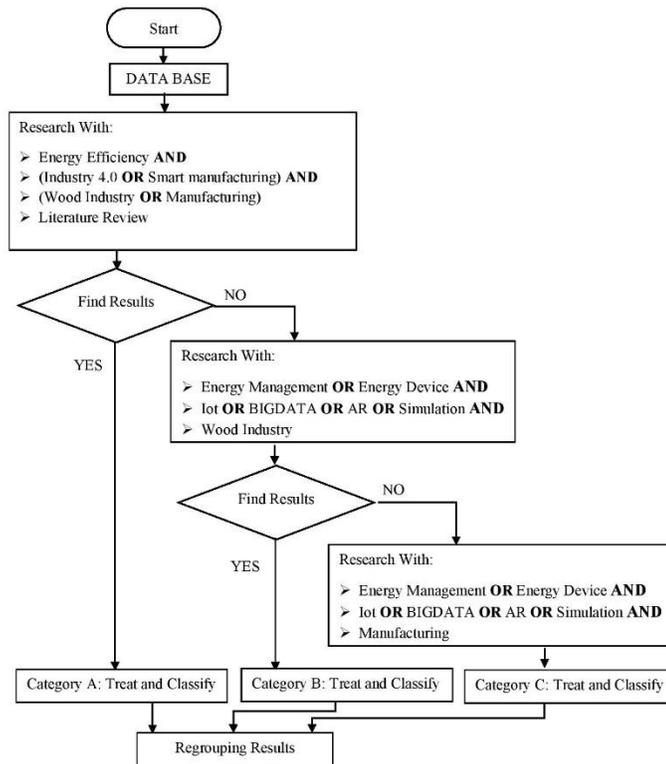
In general, to identify the relationships between energy efficiency and Industry 4.0, we use keywords that characterize all concepts. In this sense, “energy efficiency”, “Industry 4.0”, and especially “wood industry” have been selected. The databases used are those available on the web (IEEEExplore, ELSEVIER, Springer link, MDPI, ACM digital library, ResearchGate, Semantic Scholar).

Due to the diversity of content in technical areas, the robustness of the search, and availability of data analysis tools, the search method used was “energy efficiency” **and** (“industry 4.0” **or** “smart manufacturing”) **and** (“wood industry **or** manufacturing”). This section aims to find the previous literature reviews, the methodologies used, and the limitations of each.

The dissection is first conducted by following the keywords and logic as (“Energy Management” **or** “Energy Device”) **and** (“Internet of things” **or** “Big Data” **or** “Augmented Reality” **or** “Simulation”) **and** “Wood Industry”. If there is another term related to Industry 4.0, we will mention it as Cyber-Physical Systems or Artificial Intelligence.

Then, we extend our search to other industries and similarities with our research focus. For that, we follow the keywords and logic (“Energy Management” **or** “Energy Device”) **and** (“Internet of things” **or** “Big Data” **or** “Augmented Reality” **or** “Simulation”) **and** “Manufacturing”.

Based on this methodology, we can illustrate the search algorithm by the following Scheme 2.



Scheme 2. Methodological diagram of the article search.

7. Results and Discussion

The first result obtained gives us 2154 articles. After applying the PRISMA diagram (Scheme 1), the number of results is refined for different reasons (elimination of duplicates, contradictory or insufficient information, exclusion of articles that did not deal with the topic of energy efficiency and Industry 4.0 in manufacturing such as logistics or transportation).

The final number of articles is 19, of which 6 articles deal with the previous literature review, 1 article deals with energy efficiency and Industry 4.0 in the wood industry, and 12 articles deal with energy efficiency and Industry 4.0 with the manufacturing industry in general.

The articles are grouped according to the database source in Table 1 and classified into three categories: (A) Previous literature reviews; (B) Energy efficiency, Industry 4.0, and the wood industry; and (C) Energy efficiency, Industry 4.0, and manufacturing.

Table 1. Classification of articles by the database.

Data Base	Articles
IEEExplore	[73,77,97–99]
ELSEVIER	[71,100–103]
Springer Link	[1,76]
MDPI	[104–106]
ACM digital library	[69]
ResearchGate	[107,108]
Semantic Scholar	[109]

7.1. Previous Literature Reviews (Category A)

In this category, we found six articles presented as follows:

G. Miragliotta and F. Shrouf published a paper in 2013 [1] dealing with the use of IoT to improve eco-efficiency (EE) in manufacturing. They divided the paper into two sections. The first section is a literature review covering efficient energy management and IoT concepts. The second section is devoted to a framework for IoT adoption when engaging in energy efficiency goals in manufacturing.

After a brief definition of the IoT, they categorized the nine articles found according to the domains “Inventory and material management and control”, “Shop floor monitoring”, “Shop planning and control”, and “Production process monitoring and control/machine condition”. The small number of articles reviewed is due to its early publication (2013). There were not enough sources addressing the topic.

The framework for IoT adoption was designed by considering the factors of energy type (fixed or variable), EE goals (awareness, improvement, optimization), and existing IT infrastructure that specifies four levels (depending on the current state of the IT level adopted by the plant). In this case, they proposed three scenarios encompassing the fixed and variable energy cost structure:

- (1) The first scenario assumes that the IT is at levels 1 and 2. The objective is to increase the awareness of energy consumption.
- (2) The second scenario assumes that IT is level 3, which aims to improve energy consumption.
- (3) The third scenario assumes that IT is level 4, aiming to optimize energy consumption.

Based on a literature review and expert recommendations, G. Nota et al. [105] tried to reduce the energy consumption required in manufacturing processes by combining management methodologies and Industry 4.0 technologies in the case of batch production processes based on the overall equipment efficiency indicator (OEE). First, a literature review was conducted and classified into three categories: management, technology, and value co-creation. Then, they proposed models based on the combination of OEE analysis and the study of managed variables of CPS manufacturing. Then, they studied the case of

OEE in the automotive manufacturing industry. Finally, based on the proposed models, they determined the causes and quantities of energy waste in a production line.

V. Vianna et al. [108] proposed a classical literature review based on identifying and classifying articles by country, year, and knowledge area and then by points of interest or clusters according to the most cited articles in each cluster. The clusters are the Industrial Internet of Things (IIoT), wireless sensor networks (WSN), energy harvesting (EH), cloud manufacturing (CM), Big Data (BD), program optimization and artificial intelligence (AI), and additive manufacturing (AM). Those who could not be classified into a specific group were counted as miscellaneous. As a result, they presented the interest of each cluster and showed that there is little research compared to the studies on innovation in the same context. They suggested further research in the database used in his work as well as in other databases.

The work of F.S. Tesch da Silva et al. [102] is a question-oriented literature review based on the “PICOC (population, intervention, comparison, outcome, and context)” criteria. A set of articles was grouped, selected, and evaluated to answer the queries. In terms of the volume of information, this study is a track to describe energy (consumption and harvesting) and new concerns in Industry 4.0 (radio frequency technologies, IoT, CPS, AI, and Data Science).

The results are presented in a question-and-answer format and tables and address key findings, failures, and opportunities. They revolve around the following themes: Monitoring, Managing, and Predicting, Technologies Applied to Industry 4.0, Industry Challenges, Improving Energy Efficiency.

E.L. Vieira et al. [103] used the Proknow-C (Knowledge Development Process-Constructivist) method to determine performance indicators for energy management in manufacturing and Industry 4.0. The method consists of a series of procedures until the arrival of filtering and selecting articles relevant to the research topic. The search is based on three axes: “energy management”, “performance”, and “Industry 4.0”. As a result, they identified 10 relevant articles associated with the research theme. The approaches used in the search and the information about the articles (articles, review, scientific recognition, and keyword cloud) are presented in table and graph form.

In the article by Y. Meng et al. in [106], a review of “enhancing sustainability and energy efficiency in smart factories” was discussed based on the PRISMA framework, focusing on how they interact and benefit each other. Then, critical issues in both areas were identified and discussed. In particular, they discussed the different technologies emerging in Industry 4.0 (Deep Learning, Smart Grid, and Smart Metering, Radio-Frequency Identification (RFID), Big Data Analytics and Data Mining, Cloud Computing and High-Performance Computing, and Additive Manufacturing) and their contributions toward sustainability. In addition, they analyzed the impacts of smart manufacturing technologies on the sustainable energy industry. Finally, they recommend more fundamental research to focus on the challenges and opportunities in combining the two aspects for future investigations.

7.2. Energy Efficiency, Industry 4.0, and the Wood Industry (Category B)

In this category, we found only one article.

Z. Pödör et al. in [107] presented a practical study of different industrial IoT solutions in the wood industry’s processes and how they are introduced in the target to reduce the energy cost. First, they defined various approaches and techniques associated with the concept of Industry 4.0. Then, they took two different Hungarian factories in the wood industry and applied systems related to industrial IoT.

The first example shows a prototype system for data management (collection, storage, analysis, and process representation) in an industrial wood company. They attempt to perform continuous data analysis using the prototype system. Information is retrieved about past events and estimates of possible future events are provided using forecasting procedures. In addition, they focus on real-time events by setting different alarm thresholds to avoid unexpected production stops or excessive energy consumption in the plants.

The second example presents a simple and inexpensive sensor-based infrastructure and the SensorHUB system, which can collect, send, store, and process sensor data for six different machines. The main reason for choosing SensorHUB is its attractive flexibility and the proximity of regional support. Furthermore, the developed mobile application allows filtering and visualization of the collected data and can serve as the basis for a decision support system.

7.3. Energy Efficiency, Industry 4.0, and Manufacturing (Category C)

In this category, we found the largest number of articles in the literature (12 articles).

S. Nienke et al. [69] presented the concept of Energy Management 4.0 as a roadmap on how to optimize production based on energy data and combining energy data with other information collected from production. They proposed a model based on the “Maturity” level of development. This model is based on energy use cases and industry experts. The different cases determine the levels corresponding to its definition.

The first level is “Visibility”, characterized in the first step by energy monitoring and in the second step by load management. The second level is “Transparency”, characterized by quality management. The third level is “Prognostic capability”, characterized by predictive maintenance. The fourth and final level is “Autonomous Self-Optimization Control”, this is the highest stage. In this case, the production is defined as “smart”. It can adapt to external and internal factors in real-time and identify the best applicable solution. Now we can talk about Energy Management 4.0, which is based on continuous improvement, development, and innovation.

P. Zheng et al. [76] discussed the concept of Industry 4.0 in manufacturing and examined intelligent manufacturing systems. They divided the article into three sections. The first section is a general definition of intelligent manufacturing systems in Industry 4.0. The second section is a representation of scenarios related to each concept and how to use Industry 4.0: smart design (AR integration, smart wearable devices), smart machining (CPS), smart control (CPS and IoT for energy consumption control), smart control (Cloud), and smart scheduling. Based on these scenarios, they represented the technologies and their possible applications for Industry 4. Finally, the third section identified and discussed the challenges and prospects.

Concerning the energy domain, in the section on smart monitoring, they studied the energy consumption of machines and the need to monitor it in real-time. First, they collected data to determine the characteristics of energy demand by smart sensors. Then, they used a deep neural network (DNN) as a machine learning method to analyze large data sets. After that, they studied the data and results obtained by intelligent programming to establish energy management 4.0. Finally, they proposed an autonomous energy monitoring system with self-optimization of energy use and decision-making based on energy data.

O. T. Adenuga et al. [71] developed a special tool to estimate energy costs called “Energy Efficiency Analysis Modelling System (EEAMS)”. This tool is dedicated to Industry 4.0 applied to a manufacturing plant. They adopted a bottom-up approach using a web interaction platform to use energy cost information. They proposed a sustainable energy efficiency software based on IoT architecture, a big data analytics model, and centralized data for the cloud through the web interaction platform. In addition, they used the “Energy Efficiency Sustainability Framework (EESF)” to define the economic impacts of energy measurement and verification on energy consumption and the environment. EESF is defined as a series of energy performance indicators for monitoring energy performance. Furthermore, they established the Minimum Efficiency Performance Standard (MEPS) specification, which contains several performance requirements for an energy-consuming device, in preparation for issuing energy management certificates (ISO50001). Finally, they used the load profiles from a South African railcar manufacturing plant as a case study to prepare for these certificates.

T. Javied et al. in [73] detailed the concept of the total cloud-based integrated energy management system from data acquisition to data analysis and visualization. The paper

starts with the state-of-the-art of Industry 4.0 and energy management. After that, they explained the cloud architecture step by step based on the demonstrator developed at the Institute for Factory Automation and Production Systems (FAPS). The architecture contains the gateway, the message broker, the data logging module, and the data flow structure. Finally, they presented the energy management dashboard called TIEM.

TIEM (Totally Integrated Energy Management) was developed by FAPS (Erlangen, Germany). It is an energy management system that is automated and fully integrated. It allows visualization and analysis in real-time based on the international standard DIN EN ISO 50001.

In addition, in [100], the authors give additional details about TIEM (Totally Integrated Energy Management), comparing the functions offered by the other energy management system available on the market (in Germany) with TIEM. This article aims to demonstrate the compatibility of energy management with the legislative framework of Industry 4.0 by creating energy transparency in production for the system. This can only be achieved by:

- Implementing modern communication technologies and transmission protocols;
- Implementing control and operating strategies for production and auxiliaries;
- Developing hardware and software components that are networked using modern communication protocols;
- Providing control variants and energy performance indicators via a platform-independent web application;
- Developing a multi-user system that supports role-based planning, implementation, recording, and archiving of required work steps.

The paper presents a comprehensive approach for implementing energy management and all requirements in relation to international standards.

F. Shrouf et al., in [77], published an article dealing with the concept of a smart factory, energy management, and the Internet of Things. The objective is to explain the concept of Industry 4.0 and to present the architecture of IoT-based smart factories, defining the main characteristics of these factories in terms of energy management. In other words, they explored how the IoT improves energy efficiency by providing an approach to support IoT-based energy management in smart factories.

After introducing the research methodology and the concept of Industry 4.0, they made the interaction between smart factories and customers in Industry 4.0. Next, they proposed a reference architecture for a smart-factory-based IoT. Then, they discussed the main potential features of smart factories in Industry 4.0. Finally, they identified how the IoT could support energy management in smart factories and proposed an approach to improve IoT-based energy management.

C. Lin et al. [97] work in energy efficiency and group-based industrial wireless sensor networks (GIWSNs) in the production chain. The paper [96] presents the deployment and sleep scheduling of sensors in a GIWSN. After a brief overview of the literature and comparing related work, they described the GIWSN system pool on the theory of symmetries. Next, they simplified the computation in two ways, from multiple pools to a single pool and another medium-sized pool. They then proposed a genetic algorithm and a hybrid harmony search considering deployment and sleep schedules to reduce energy consumption and maximize energy efficiency. Finally, they simulated the proposed method to verify the achievement of energy efficiency.

So far, we have discussed energy efficiency and Industry 4.0 applications in manufacturing. However, these technologies need proper infrastructure and facilities.

J.S Ko et al. [104] dealt with the energy efficiency of the cooling system fan applied to the data centers of Industry 4.0. They proposed several control methods to improve energy efficiency by reducing the energy used by the cooling systems and improving temperature control performance. As we know, data centers are composed of power systems, computer equipment, and cooling systems. The cooling system, which consumes a considerable amount of energy, is essential to keep the IT system in favorable conditions by ensuring the right temperature and preventing failures and malfunctions. This paper

used a thermoelectric element as a cooling system and a PI (proportional-integral) controller. They proposed an FPI (proportional-integral fuzzy) method to control the input value of the PI controller, a VFPI (variable FPI) controller to control the output gain of the fuzzy controller, and a VFPI-VL (variable VFPI limit) controller to adjust the output limit value of the fuzzy control. As a result, they obtained temperature holding capabilities of 50.5%, 44.3%, and 32.6%, respectively.

M. Seewald et al. [109] published a paper on the automotive industry and energy simulation. The paper showed improvement methods based on the simulation of energy and resource efficiency of production processes. The concept of simulation-based energy management improves the quality of planning energy-efficient production systems. The objective is to reduce energy costs by improving the control and management of manufacturing. The analysis of potential energy savings was performed by a simulation software called "Plant Simulation (Siemens PLM)". In the future, a connection with production control will become possible. The self-optimization of production systems will be the focus of Industry 4.0.

They analyzed the energy-saving potential in the production areas following the material flow in the body shop and proposed approaches based on energy-oriented control options (Buffer Sizes, Standby Mode, and Slow Mode) that are considered more energy efficient. These approaches will be introduced into the control system. The simulation yielded the following results:

In all, more than 50 studies with different combinations of buffer sizes and upper and lower limits for energy-saving modes were performed. As a result, by increasing the buffer by only one unit, the energy consumption could be reduced by up to 11% with at least the same number of parts produced. Also, by decreasing the output by 0.5% the energy consumption could be reduced by 8.8%.

R. Goldstein et al. [98] presented a theoretical study of the concept of Industry 4.0 and energy (resource and efficiency). They explained how to introduce energy efficiency in Industry 4.0 in the case of fractal production. They used the German industry as an example because of its position among the industrialized countries. By introducing the concepts, technologies, and architecture revolving around the construction of Industry 4.0 based on energy efficiency goals, they proposed a roadmap to a distributed and adaptive industrial system called a fractal production system based on RAMI 4.0 (Reference Architecture Model Industrie 4.0) architecture. They proposed a way to manage it.

K. Zhou et al. [101] presented a comprehensive study of intelligent energy management based on the Big Data paradigm. First, they discussed the sources and characteristics of energy Big Data. Then, they proposed a process model of smart energy management based on Big Data. Then, they developed a systematic review of Big Data analysis in smart energy management by taking the smart grid as the research field.

They examined it from four perspectives: (1) power generation side management (2) microgrid and renewable energy management (3) asset management and (4) collaborative operation. Then, they analyzed and discussed the industrial development of smart energy management from a Big Data perspective. Finally, they indicated the challenges of smart energy management based on Big Data such as data collection, governance, integration, sharing, processing and analysis, IT infrastructure, security and privacy, and professionals.

The article by N. Mohamed et al. [99] studied and discussed the opportunities and benefits of leveraging Industry 4.0 capabilities to improve energy and cost efficiency in smart factories. The article also discusses the roles of Industry 4.0 technologies in implementing these opportunities and benefits. The article then presents a benefits analysis showing such leverage's advantages. In addition, it discusses an enabling architecture and its components that include the CPS manufacturing services layer, the fog manufacturing services layer, the cloud manufacturing services layer, and a blockchain-based service-oriented middleware to support these opportunities. The authors introduce the various concepts, use of terms, and study's background in Section 1. Section 2 is a brief review covering some related

work. Then, Section 3 provides background information on manufacturing processes and Industry 4.0. Section 4 discusses several opportunities that Industry 4.0 can offer to improve energy efficiency in smart factories. Section 5 is a general discussion of the roles of Industry 4.0 in improving energy efficiency in smart factories by providing a summary of utilization and cost improvements. Section 6 presents the architecture and technologies to improve smart factories' energy efficiency. Finally, Section 7 provides some benefits analysis, while Section 8 concludes the paper and discusses some open questions.

7.4. Results Mapping

Table 2 summarizes the previous results found in categories A, B, and C. In addition, it gives the classification of each article according to the field of study and detailed information.

Table 2. Mapping of previously published papers in the energy efficiency and Industry 4.0 in manufacturing (especially wood industry).

Articles	Energy Efficiency			Industry 4.0				Application		
	Reference	Energy Management	Energy Devices	IoT	Big Data	AR	Simulation	Others	Wood industry	Others
A	[1]	X		X	X			X		
	[102]	X	X	X	X		X	X		
	[103]	X							X	
	[105]	X		X				X		X
	[106]	X	X			X			X	
	[108]	X	X	X	X				X	X
B	[107]	X	X	X	X			X	X	
	[69]	X			X			X		
	[71]	X		X	X					X
	[73]	X			X			X		
	[76]	X	X	X	X	X	X	X		
C	[77]		X	X	X		X			
	[97]	X			X			X		
	[98]	X	X	X	X			X		
	[99]	X	X	X	X	X	X	X		
	[100]	X	X	X	X					
	[101]	X			X			X		
	[104]	X	X		X			X		X
	[109]		X				X			X

Part III: Relation between energy efficiency and Industry 4.0 in other industries.

Most developed industries have adopted Industry 4.0 as a new step for their development. This new paradigm has benefited production, logistics, maintenance, and energy efficiency. This section will give some relevant examples of industries that have adopted Industry 4.0 in the energy field.

8. Automotive Industry

The car manufacturing process consumes more than 700 kWh/vehicle. The percentage of energy cost is 9–12% of the total manufacturing cost. The energy consumed during

the entire life cycle of a car can be summarized in four stages: raw material processing, manufacturing, use, and recovery [110].

The reduction in energy consumption can be achieved by an energy-efficient manufacturing system [81,110] by introducing the concept of Industry 4.0. The automotive industry is one of the first sectors to benefit from Industry 4.0, as automotive plants are characterized by a strong presence of IT solutions and machining robots. The relationship between production and IT solutions would be useful in introducing Industry 4.0 concepts through the digitization of manufacturing processes. This transformation can offer energy-saving solutions [105].

Digitization of manufacturing processes requires transparent management of all sources, machines, and equipment; the integration of all necessary data; and making them available in a uniform way [111,112].

9. Metal Casting Industry

Metal casting is one of the most energy-intensive manufacturing processes [113], especially in the iron and steel division. In 2013, the iron and steel sector recorded 18% of the total energy consumption of all industry worldwide [114,115]. The energy efficiency of the steel industry has a direct impact on energy consumption. Therefore, improving energy efficiency should be a significant concern for steel plants [114]. In metal casting, preheating, heating, and drying are the critical stages of energy consumption. Industrial energy intensity can be reduced through technological advancement [114,116]. Industry 4.0 can provide a solution to this problem by adopting the “smart foundry”, which claims to be the solution to the challenges of the manufacturing industry. A “smart foundry” is a highly flexible production system that produces individual parts with the highest precision, best quality, and economical energy consumption [117]. However, the complexity and diversity of manufacturing systems require knowledge in the fields of engineering and management [113]. Therefore, Industry 4.0 enhances data by increasing their volume to become the Big Data received from IoT devices. Then, these data are processed in the cloud with appropriate software using AI and then displayed on a monitor, giving optimal solutions to managers in real-time.

10. Food Industry

In developed countries, the cost of energy represents about 2% of the total production costs. The food industry’s case [118,119] includes refrigeration, freezing, thermal sterilization, drying, evaporation, heating, and cooling [118]. Therefore, to optimize energy consumption and improve energy efficiency, the process must include energy and power analysis, integration and modeling, simulation, optimization, control, and decision support tools [4].

The food industry has benefited from the Industry 4.0 concept. Thus, energy usage needs to be controlled, monitored, and optimized as much as possible. However, the first challenge is understanding automated production systems, especially energy management systems [120]. The pillars of Industry 4.0 in energy efficiency can be considered as follows:

- IoT and Cloud computing: equipping machines and plants with smart sensor systems and embedded software with connectivity;
- Big Data: receiving data from smart sensor systems generates huge amounts of data, which provides an environment for Big Data systems. Big Data allow for improved process optimization and energy consumption;
- Vision technologies: enabling visualization of energy flows and a training tool for employees;
- Cybersecurity: The role of cybersecurity is crucial in Industry 4.0 and the appropriate safeguards that must be applied to prevent cyber-attacks [120,121].

11. Limitations of This Review

Despite the intent of this paper to be comprehensive, some limitations accompany a literature review. The literature search process is primarily based on the definition of a set of keywords [122,123], so we may not have identified and incorporated all of the keywords necessary to find the relevant publications below or may have missed some relevant studies. Therefore, we cannot guarantee completeness, although we believe we were able to incorporate most of the significant contributions. In addition, the literature selection process may be affected by researcher bias and subjective views. We have tried to limit predispositions by taking as objective a view as possible in the selection process [123]. Then, the complexity of the phenomena, the recency of the concepts (the notion of Industry 4.0 appeared in 2011), and the neglect of the energy efficiency field impact the quality and number of studies found primarily in the wood industry.

12. Conclusion and Recommendations

We developed our strategy to conduct a systematic literature review on Industry 4.0 and energy efficiency in the wood industry during this study. Due to their complexity, we defined each concept separately, unpacked the complex phenomena, and made connections between the concepts. This technique allowed us (1) to better understand the phenomena, (2) to properly select the articles, and (3) to focus on the most significant concepts.

As mentioned before, the junction of three notions (Industry 4.0, energy efficiency, and the wood industry) is not apparent, so we gave examples to show the points of difference and similarity with other industries.

To develop a good literature review in this field of study, we recommend going into detail, studying a practical case, and comparing it with the concepts.

In conclusion, a good literature review is an essential tool for research. Therefore, we hope that our work will help researchers build their next research on this treated topic and use the derived categories in their next work [123].

Author Contributions: Conceptualization, M.H. and A.I.; methodology, M.H.; software, M.H.; validation, M.H. and A.I.; formal analysis, M.H. and A.I.; investigation, M.H.; resources, M.H.; data curation, M.H.; writing—original draft preparation, M.H.; writing—review and editing, A.I.; visualization, A.I.; supervision, A.I.; project administration, A.I.; funding acquisition, A.I. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors acknowledge the support from NSERC (Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada) through a Discovery Grant.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Miragliotta, G.; Shrouf, F. *Using Internet of Things to Improve Eco-Efficiency in Manufacturing: A Review on Available Knowledge and a Framework for IoT Adoption*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013; pp. 96–102.
2. U.S. Energy Information Administration. *Annual Energy Review: EIA, 2010*; Office of Energy Statistics, Ed.; U.S. Energy Information Administration: Washington, DC, USA, 2010; p. 39.
3. Gopalakrishnan, B.; Mate, A.; Mardikar, Y.; Gupta, D.; Plummer, R. Energy Efficiency Measures in the Wood Manufacturing Industry. In Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry, January 2005; West Virginia University: Morgantown, WV, USA, 2005. Available online: https://www.aceee.org/files/proceedings/2005/data/papers/SS05_Panel01_Paper07.pdf (accessed on 20 February 2022).
4. Muller, D.C.A.; Marechal, F.M.A.; Wolewinski, T.; Roux, P.J. An energy management method for the food industry. *Appl. Therm. Eng.* **2007**, *27*, 2677–2686. [CrossRef]
5. Hermann, M.; Pentek, T.; Otto, B. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios*. 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS); HICSS: Koloa, HI, USA, January 2016; pp. 3928–3937. [CrossRef]
6. Kagermann, H.; Lukas, W.D.; Wahlster, W. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. In *VDI Nachrichten*; VDI Nachrichten: Düsseldorf, Germany, 2011; p. 2.

7. Kamarul Bahrin, M.A.; Othman, M.F.; Nor Azli, N.H.; Talib, M.F. INDUSTRY 4.0: A review on industrial automation and robotic. *J. Teknol.* **2016**, *78*, 137–143. [CrossRef]
8. Gouvernement du Québec. *Politique Énergétique 2016–2025: Efficacité Et Innovation Énergétiques*; Naturelles, M., Ed.; Bibliothèque et Archives Nationales du Québec: Québec, QC, Canada, 2015.
9. Belt, C.K. Introduction. In *Energy Management for the Metals Industry*, 1st ed.; Built Environment, Physical Sciences, Ed.; CRC Press: New York, NY, USA, 2017; p. 218. [CrossRef]
10. Gordic, D.; Babic, M.; Jelic, D.; Koncalovic, D.; Vukasinovic, V. Integrating energy and environmental management in wood furniture industry. *Sci. World J.* **2014**, *2014*, 596958. [CrossRef] [PubMed]
11. McKane, A.; Desai, D.; Matteini, M.; Meffert, W.; Williams, R.; Risser, R. *Thinking Globally: How ISO 50001-Energy Management Can Make Industrial Energy Efficiency Standard Practice*; Lawrence Berkeley National Laboratory: Berkeley, CA, USA, 2009. [CrossRef]
12. Greenblatt, J.; Wei, M.; McMahon, J. *California's Energy Future: Buildings & Industrial Efficiency*; Lawrence Berkeley National Laboratory: Berkeley, CA, USA, 2012; p. 36.
13. Parliament, E. Directive 2006/32/EC on Energy End-Use Efficiency and Energy Services and Repealing in Official Journal of the European Union. 2006; Available online: <https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vitgbgijk2zx> (accessed on 20 February 2022).
14. Iliev, I.; Kaloyanov, N.; Gramatikov, P.; Kamburova, V.; Terziev, A.; Palov, I.; Stefanov, S.; Sirakov, K. *Energy Efficiency and Energy Management Handbook*; En Cone Services: Ruse, Bulgaria, 2012.
15. ICER. *A Description of Current Regulatory Practices for the Promotion of Energy Efficiency*; ICER: Boston, MA, USA, 2010; p. 8/176.
16. Dakwale, V.A.; Ralegaonkar, R.V.; Mandavgane, S. Improving environmental performance of building through increased energy efficiency: A review. *Sustain. Cities Soc.* **2011**, *1*, 211–218. [CrossRef]
17. Howarth, R. Energy efficiency and economic growth. *Contemp. Econ. Policy* **1997**, *15*, 1–9. [CrossRef]
18. Kabalci, Y. Communication Methods for Smart Buildings and Nearly Zero-Energy Buildings. In *Energy Harvesting and Energy Efficiency: Technology, Methods, and Applications*; Bizon, N., Mahdavi Tabatabaei, N., Blaabjerg, F., Kurt, E., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017; pp. 459–489. [CrossRef]
19. Rajbhandari, A.; Zhang, F. Does energy efficiency promote economic growth? Evidence from a multicountry and multisectoral panel dataset. *Energy Econ.* **2018**, *69*, 128–139. [CrossRef]
20. Lans Bovenberg, A.; Smulders, S. Environmental quality and pollution-augmenting technological change in a two-sector endogenous growth model. *J. Public Econ.* **1995**, *57*, 369–391. [CrossRef]
21. Goulder, L.H.; Mathai, K. Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change. *J. Environ. Econ. Manag.* **2000**, *39*, 1–38. [CrossRef]
22. Porter, M.E.; van der Linde, C. Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship. *J. Econ. Perspect.* **1995**, *9*, 97–118. [CrossRef]
23. Karali, N.X.; Xu, T.; Sathaye, J. *Industrial Sector Energy Efficiency Modeling (ISEEM) Framework Documentation*; Lawrence Berkeley National Laboratory: Berkeley, CA, USA, 2012; p. 7.
24. IEA. *Energy Efficiency 2019*; International Energy Agency (IEA): Paris, France, 2019; p. 47.
25. ICER. Regulatory Practices for the Promotion of Energy Efficiency. In Proceedings of the ICER Workshop on Energy Efficiency, Brussels, Belgium, 12 April 2010; p. 1.
26. Diczfalusy, B. Energy Efficiency at the IEA. In *ICER Workshop on Energy Efficiency*; IEA: Brussels, Belgium, 2011; p. 1.
27. IEA. Global Commission for Urgent Action on Energy Efficiency. Available online: www.iea.org/programmes/global-commission-for-urgent-action-on-energy-efficiency (accessed on 6 June 2021).
28. Commission, E. Energy Efficiency—Targets, Directive and Rules. Available online: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/targets-directive-and-rules_en (accessed on 7 June 2021).
29. Directorate-General for Energy—European Commission. Good Practice in Energy Efficiency: For a Sustainable, Safer and More Competitive Europe. 2017. Available online: https://c2e2.unepdtu.org/kms_object/good-practice-in-energy-efficiency-for-a-sustainable-safer-and-more-competitive-europe/ (accessed on 20 February 2022).
30. US Government, DOE. *Energy Efficiency and Conservation Block Grant Program*; Department of Energy: Washington, DC, USA, 2010; pp. 3–6.
31. Weatherization and Intergovernmental Programs Office. Energy Efficiency and Conservation Block Grant Program. Available online: <https://www.energy.gov/eere/wipo/energy-efficiency-and-conservation-block-grant-program> (accessed on 14 June 2021).
32. Ministère de l'Énergie et Des Ressources Naturelles. *Politique Énergétique 2030*; Gouvernement du Québec: Québec, QC, Canada, 2016.
33. Xu, L.D.; Xu, E.L.; Li, L. Industry 4.0: State of the art and future trends. *Int. J. Prod. Res.* **2018**, *56*, 2941–2962. [CrossRef]
34. Muhuri, P.K.; Shukla, A.K.; Abraham, A. Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview. *Eng. Appl. Artif. Intell.* **2019**, *78*, 218–235. [CrossRef]
35. Ang, J.; Goh, C.; Saldivar, A.; Li, Y. Energy-Efficient Through-Life Smart Design, Manufacturing and Operation of Ships in an Industry 4.0 Environment. *Energies* **2017**, *10*, 610. [CrossRef]
36. Cevik Onar, S.; Ustundag, A. Smart and Connected Product Business Models. In *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018; pp. 25–41. [CrossRef]

37. Kagermann, D.; Wahlster, W.; Helbig, J. *Final Report of the Industry 4.0, Working Group: Securing the Future of German Manufacturing Industry, Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*; Office of the Industry-Science Research Alliance Germany: Munich, Germany, 2013; p. 18.
38. Odoroaga, P.; Smart Factory Concept. Smart Industry Process Icons in Alamy. 2016. Available online: <https://www.alamy.com/stock-photo-smart-factory-conceptsmart-industry-process-icons-123093167.html> (accessed on 20 February 2022).
39. Rübmann, M.; Lorenz, M.; Gerbert, P.D.S.; Waldner, M.; Justus, J.; Engel, P.; Harnisch, M.J. *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*; Boston Consulting Group: Boston, MA, USA, 2015.
40. Vaidya, S.; Ambad, P.; Bhosle, S. Industry 4.0—A Glimpse. *Procedia Manuf.* **2018**, *20*, 233–238. [[CrossRef](#)]
41. Gilchrist, A. Introduction to the Industrial Internet. In *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*; Apress: Berkeley, CA, USA, 2016; pp. 1–12. [[CrossRef](#)]
42. Rojko, A. Industry 4.0 Concept: Background and Overview. *Int. J. Interact. Mob. Technol.* **2017**, *11*, 77–90. [[CrossRef](#)]
43. Consortium, I.I. *Industrial Internet Reference Architecture*; Industrial IoT Consortium (IIC): Boston, MA, USA, 2015.
44. Bassi, L. Industry 4.0: Hope, hype or revolution? In Proceedings of the 2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI), Modena, Italy, 11–13 September 2017; pp. 1–6.
45. Welbourne, E.; Battle, L.; Cole, G.; Gould, K.; Rector, K.; Raymer, S.; Balazinska, M.; Borriello, G. Building the Internet of Things Using RFID: The RFID Ecosystem Experience. *IEEE Internet Comput.* **2009**, *13*, 48–55. [[CrossRef](#)]
46. Hozdić, E. Smart factory for industry 4.0: A review. *J. Mod. Manuf. Syst. Technol.* **2015**, *7*, 28–35.
47. Baheti, R.; Gill, H. Cyber-physical systems. *Impact Control. Technol.* **2011**, *12*, 161–166.
48. Lee, J.; Bagheri, B.; Kao, H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manuf. Lett.* **2015**, *3*, 18–23. [[CrossRef](#)]
49. Lee, J. Smart Factory Systems. *Informatik-Spektrum* **2015**, *38*, 230–235. [[CrossRef](#)]
50. Gill, H. From Vision to Reality: Cyber-Physical Systems. In Proceedings of the HCSS National Workshop on New Research Directions for High Confidence Transportation CPS: Automotive, Aviation, and Rail, Washington, DC, USA, 18–20 November 2008.
51. Posada, J.; Toro, C.; Barandiaran, I.; Oyarzun, D.; Stricker, D.; Amicis, R.D.; Pinto, E.B.; Eisert, P.; Döllner, J.; Vallarino, I. Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. *IEEE Comput. Graph. Appl.* **2015**, *35*, 26–40. [[CrossRef](#)]
52. Fraga-Lamas, P.; Fernandez-Carames, T.M.; Blanco-Novoa, O.; Vilar-Montesinos, M.A. A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard. *IEEE Access* **2018**, *6*, 13358–13375. [[CrossRef](#)]
53. Sami Sivri, M.; Oztaysi, B. Data Analytics in Manufacturing. In *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018; pp. 155–172. [[CrossRef](#)]
54. Leary, D.E.O. Artificial Intelligence and Big Data. *IEEE Intell. Syst.* **2013**, *28*, 96–99. [[CrossRef](#)]
55. Lee, J.; Davari, H.; Singh, J.; Pandhare, V. Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manuf. Lett.* **2018**, *18*, 20–23. [[CrossRef](#)]
56. Aoun, A.; Ilinca, A.; Ghandour, M.; Ibrahim, H. A review of Industry 4.0 characteristics and challenges, with potential improvements using blockchain technology. *Comput. Ind. Eng.* **2021**, *162*, 107746. [[CrossRef](#)]
57. Salkin, C.; Oner, M.; Ustundag, A.; Cevikcan, E. A Conceptual Framework for Industry 4.0. In *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018; pp. 3–23. [[CrossRef](#)]
58. Kuhn, W. Digital Factory-Simulation Enhancing the Product and Production Engineering Process. In Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, Monterey, CA, USA, 3–6 December 2006; pp. 1899–1906.
59. Schuh, G.; Potente, T.; Wesch-Potente, C.; Weber, A.R.; Prote, J.-P. Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. *Procedia CIRP* **2014**, *19*, 51–56. [[CrossRef](#)]
60. Erol, S.; Jäger, A.; Hold, P.; Ott, K.; Sihm, W. Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production. *Procedia CIRP* **2016**, *54*, 13–18. [[CrossRef](#)]
61. Monostori, L. Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges. *Procedia CIRP* **2014**, *17*, 9–13. [[CrossRef](#)]
62. Mell, P.; Grance, T. The NIST Definition of Cloud Computing. 2011. Available online: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-145.pdf> (accessed on 20 February 2022).
63. Simmon, E.; Kim, K.-S.; Subrahmanian, E.; Lee, R.; De Vault, F.; Murakami, Y.; Zetsu, K.; Sriram, R.D. *A Vision of Cyber-Physical Cloud Computing for Smart Networked Systems*; US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA, 2013.
64. Marilungo, E.; Papetti, A.; Germani, M.; Peruzzini, M. From PSS to CPS Design: A Real Industrial Use Case Toward Industry 4.0. *Procedia CIRP* **2017**, *64*, 357–362. [[CrossRef](#)]
65. Landherr, M.; Schneider, U.; Bauernhansl, T. The Application Center Industrie 4.0-Industry-driven Manufacturing, Research and Development. *Procedia CIRP* **2016**, *57*, 26–31. [[CrossRef](#)]
66. Murmura, F.; Bravi, L. Additive manufacturing in the wood-furniture sector. *J. Manuf. Technol. Manag.* **2017**, *29*, 350–371. [[CrossRef](#)]
67. Bloem, J.; Van Doorn, M.; Duivestijn, S.; Excoffier, D.; Maas, R.; Van Ommeren, E. The fourth industrial revolution. *Things Tighten* **2014**, *8*, 11–15.

68. Bibby, L.; Dehe, B. Defining and assessing industry 4.0 maturity levels—case of the defence sector. *Prod. Plan. Control* **2018**, *29*, 1030–1043. [CrossRef]
69. Nienke, S.; Frölian, H.; Zeller, V.; Schuh, G. Energy-Management 4.0. In Proceedings of the 6th International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications, Jeju, Korea, 29–31 March 2017; pp. 6–10.
70. Khan, A.; Turowski, K. A Survey of Current Challenges in Manufacturing Industry and Preparation for Industry 4.0. In Proceedings of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI'16), Sochi, Russia, 16–21 May 2016; pp. 15–26. [CrossRef]
71. Adenuga, O.T.; Mpofu, K.; Boitumelo, R.I. Energy efficiency analysis modelling system for manufacturing in the context of industry 4.0. *Procedia CIRP* **2019**, *80*, 735–740. [CrossRef]
72. Lenz, J.; Kotschenreuther, J.; Westkaemper, E. Energy Efficiency in Machine Tool Operation by Online Energy Monitoring Capturing and Analysis. *Procedia CIRP* **2017**, *61*, 365–369. [CrossRef]
73. Javied, T.; Bakakeu, J.; Gessinger, D.; Franke, J. Strategic energy management in industry 4.0 environment. In Proceedings of the 2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon), Vancouver, BC, Canada, 23–26 April 2018; pp. 1–4.
74. Javied, T.; Rackow, T.; Franke, J. Implementing Energy Management System to Increase Energy Efficiency in Manufacturing Companies. *Procedia CIRP* **2015**, *26*, 156–161. [CrossRef]
75. May, G.; Stahl, B.; Taisch, M.; Kiritsis, D. Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework. *J. Clean. Prod.* **2017**, *167*, 1464–1489. [CrossRef]
76. Zheng, P.; Wang, H.; Sang, Z.; Zhong, R.Y.; Liu, Y.; Liu, C.; Mubarak, K.; Yu, S.; Xu, X. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Front. Mech. Eng.* **2018**, *13*, 137–150. [CrossRef]
77. Shrouf, F.; Ordieres, J.; Miragliotta, G. 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. In Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Selangor, Malaysia, 9–12 December 2014; pp. 697–701.
78. Berglund, J.; Michaloski, J.; Leong, S.; Shao, G.; Riddick, F.; Arinez, J.; Biller, S. Energy efficiency analysis for a casting production system. In Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC), Phoenix, AZ, USA, 11–14 December 2011; pp. 1060–1071.
79. Dufloy, J.R.; Sutherland, J.W.; Dornfeld, D.; Herrmann, C.; Jeswiet, J.; Kara, S.; Hauschild, M.; Kellens, K. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Ann.* **2012**, *61*, 587–609. [CrossRef]
80. Missaoui, R.; Joumaa, H.; Ploix, S.; Bacha, S. Managing energy Smart Homes according to energy prices: Analysis of a Building Energy Management System. *Energy Build.* **2014**, *71*, 155–167. [CrossRef]
81. Chrystolouris, G. *Manufacturing Systems: Theory and Practice*; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2006; p. 606.
82. Apostolos, F.; Alexios, P.; Georgios, P.; Panagiotis, S.; George, C. Energy Efficiency of Manufacturing Processes: A Critical Review. *Procedia CIRP* **2013**, *7*, 628–633. [CrossRef]
83. Herrmann, C.; Thiede, S. Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* **2009**, *1*, 221–229. [CrossRef]
84. Ikeyama, T.; Watanabe, H.; Isobe, S.; Takahashi, H. An Approach to Optimize Energy Use in Food Plants. In Proceedings of the SICE Annual Conference, Tokyo, Japan, 13–18 September 2011; pp. 1574–1579.
85. Zhuming, B.; Li Da, X.; Chengen, W. Internet of Things for Enterprise Systems of Modern Manufacturing. *IEEE Trans. Ind. Inform.* **2014**, *10*, 1537–1546. [CrossRef]
86. Wei, M.; Hong, S.H.; Alam, M. An IoT-based energy-management platform for industrial facilities. *Appl. Energy* **2016**, *164*, 607–619. [CrossRef]
87. Mate, A.A. Energy analysis and diagnostics in wood manufacturing industry. In *Dissertations, and Problem Reports*; West Virginia University: Morgantown, WV, USA, 2002.
88. Fischer-Kowalski, M.; Huttler, W. Societys metabolism: The intellectual history of materials flow analysis. *J. Ind. Ecol.* **1999**, *2*, 107–136. [CrossRef]
89. Rajić, M.N.; Maksimović, R.M.; Milosavljević, P.; Pavlović, D. Energy Management System Application for Sustainable Development in Wood Industry Enterprises. *Sustainability* **2019**, *12*, 76. [CrossRef]
90. Ramage, M.H.; Burridge, H.; Busse-Wicher, M.; Fereday, G.; Reynolds, T.; Shah, D.U.; Wu, G.; Yu, L.; Fleming, P.; Densley-Tingley, D.; et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *68*, 333–359. [CrossRef]
91. Zhang, B.G.; Zhou, Y.D.; Ning, W.; Xie, D.B. Experimental Study on Energy Consumption of Combined Conventional and Dehumidification Drying. *Dry. Technol.* **2007**, *25*, 471–474. [CrossRef]
92. Vigants, E.; Veidenbergs, I.; Lauka, D.; Klavina, K.; Blumberga, D. Analysis of Energy Consumption for Biomass Drying Process. In *Environment, Technology, Resources, Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rezekne, Latvia, 18–20 June 2015*; 2015; Volume 2. Available online: <https://doi.org/10.17770/etr2015vol2.625> (accessed on 20 February 2022). [CrossRef]
93. Del Giudice, A.; Acampora, A.; Santangelo, E.; Pari, L.; Bergonzoli, S.; Guerriero, E.; Petracchini, F.; Torre, M.; Paolini, V.; Gallucci, F. Wood Chip Drying through the Using of a Mobile Rotary Dryer. *Energies* **2019**, *12*, 1950. [CrossRef]
94. Beaulac, P.; Issa, M.; Ilinca, A.; Brousseau, J. Parameters Affecting Dust Collector Efficiency for Pneumatic Conveying: A Review. *Energies* **2022**, *15*, 916. [CrossRef]

95. Beaulac, P.; Issa, M.; Ilinca, A.; Lepage, R.; Martini, F. Improving the Energy Efficiency of Cyclone Dust Collectors for Wood Product Factories. *Open J. Energy Effic.* **2021**, *10*, 97–119. [CrossRef]
96. Page, M.J.; McKenzie, J.E.; Bossuyt, P.M.; Boutron, I.; Hoffmann, T.C.; Mulrow, C.D.; Shamseer, L.; Tetzlaff, J.M.; Akl, E.A.; Brennan, S.E.; et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* **2021**, *372*, n71. [CrossRef]
97. Lin, C.C.; Deng, D.J.; Chen, Z.Y.; Chen, K.C. Key design of driving industry 4.0: Joint energy-efficient deployment and scheduling in group-based industrial wireless sensor networks. *IEEE Commun. Mag.* **2016**, *54*, 46–52. [CrossRef]
98. Winkler-Goldstein, R.; Imbault, F.; Usländer, T.; Gastine, H.d.l. Fractal Production Reprogramming “Industrie 4.0” Around Resource and Energy Efficiency? In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), Palermo, Italy, 12–15 June 2018; pp. 1–5.
99. Mohamed, N.; Al-Jaroodi, J.; Lazarova-Molnar, S. Leveraging the Capabilities of Industry 4.0 for Improving Energy Efficiency in Smart Factories. *IEEE Access* **2019**, *7*, 18008–18020. [CrossRef]
100. Javied, T.; Huprich, S.; Franke, J. Cloud based Energy Management System Compatible with the Industry 4.0 Requirements. *IFAC-PapersOnLine* **2019**, *52*, 171–175. [CrossRef]
101. Zhou, K.; Fu, C.; Yang, S. Big data driven smart energy management: From big data to big insights. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *56*, 215–225. [CrossRef]
102. Tesch da Silva, F.S.; da Costa, C.A.; Paredes Crovato, C.D.; da Rosa Righi, R. Looking at energy through the lens of Industry 4.0: A systematic literature review of concerns and challenges. *Comput. Ind. Eng.* **2020**, *143*, 106426. [CrossRef]
103. Vieira, E.L.; da Costa, S.E.G.; de Lima, E.P.; Ferreira, C.C. Application of the Proknow-C Methodology in the Search of Literature on Performance Indicators for Energy Management in Manufacturing and Industry 4.0. *Procedia Manuf.* **2019**, *39*, 1259–1269. [CrossRef]
104. Ko, J.-S.; Huh, J.-H.; Kim, J.-C. Improvement of Energy Efficiency and Control Performance of Cooling System Fan Applied to Industry 4.0 Data Center. *Electronics* **2019**, *8*, 582. [CrossRef]
105. Nota, G.; Nota, F.D.; Peluso, D.; Toro Lazo, A. Energy Efficiency in Industry 4.0: The Case of Batch Production Processes. *Sustainability* **2020**, *12*, 6631. [CrossRef]
106. Meng, Y.; Yang, Y.; Chung, H.; Lee, P.-H.; Shao, C. Enhancing Sustainability and Energy Efficiency in Smart Factories: A Review. *Sustainability* **2018**, *10*, 4779. [CrossRef]
107. Pödör, Z.; Gludovátz, A.; Bacsardi, L.; Erdei, I.; Janky, F.N. Industrial IoT techniques and solutions in wood industrial manufactures. *Infocommunications J.* **2017**, *1X*, 24–30.
108. Vianna, V.W.; Celeste, W.C.; Freitas, R.R.d. Energy efficiency in the context of Industry 4.0. *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.* **2019**, *6*, 1–16. [CrossRef]
109. Seewaldt, M.; Nagel, J.; Geckler, D.; Bracht, U. Energy-Oriented Material Flow Simulation as a Contribution to Automotive Industry 4.0. *SNE Simul. Notes Eur.* **2017**, *27*, 61–66. [CrossRef]
110. Fysikopoulos, A.; Anagnostakis, D.; Salonitis, K.; Chryssolouris, G. An Empirical Study of the Energy Consumption in Automotive Assembly. *Procedia CIRP* **2012**, *3*, 477–482. [CrossRef]
111. Franz, E.; Erler, F.; Langer, T.; Schlegel, A.; Stoldt, J.; Richter, M.; Putz, M. Requirements and Tasks for Active Energy Management Systems in Automotive Industry. *Procedia Manuf.* **2017**, *8*, 175–182. [CrossRef]
112. Neugebauer, R.; Putz, M.; Schlegel, A.; Langer, T.; Franz, E.; Lorenz, S. *Energy-Sensitive Production Control in Mixed Model Manufacturing Processes*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012; pp. 399–404.
113. Pagone, E.; Papanikolaou, M.; Salonitis, K.; Jolly, M. Metal Casting Energy Efficient Metrics for Material Selection of Automotive Parts. In *Sustainable Design and Manufacturing 2018*; Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 290–303. [CrossRef]
114. He, K.; Wang, L. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *70*, 1022–1039. [CrossRef]
115. IEA. Energy Balance Flows. Available online: www.iea.org/Sankey/index.html (accessed on 1 November 2020).
116. United Nations Industrial Development Organization. *The Role of Technology and Innovation in Inclusive and Sustainable Industrial Development*; United Nations Industrial Development Organization (UNIDO): Vienna, Austria, 2015; p. 136.
117. Vanli, A.S.; Akdogan, A.; Kerber, K.; Ozbek, S.; Durakbasa, N. Smart die casting foundry according to industrial revolution 4.0. *Acta Tech. Napoc.-Ser. Appl. Math. Mech. Eng.* **2018**, *61*. Available online: <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/1121> (accessed on 20 February 2022).
118. Wang, L. Introduction. In *Energy Efficiency and Management in Food Processing Facilities*, 1st ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2008; p. 474. [CrossRef]
119. Ramirez, C.; Patel, M.; Blok, K. How much energy to process one pound of meat? A comparison of energy use and specific energy consumption in the meat industry of four European countries. *Energy* **2006**, *31*, 2047–2063. [CrossRef]
120. Luque, A.; Peralta, M.E.; de las Heras, A.; Córdoba, A. State of the Industry 4.0 in the Andalusian food sector. *Procedia Manuf.* **2017**, *13*, 1199–1205.
121. Foundation CTIC. Article the Digital Enablers of the Industry 4.0. Available online: www.fundacionctic.org/sat/articulo-los-habilitadores-digitales-de-la-industria-40 (accessed on 2 November 2020).

122. Cooper, H.M. Organizing knowledge syntheses: A taxonomy of literature reviews. *Knowl. Soc.* **1988**, *1*, 104. [[CrossRef](#)]
123. Osterrieder, P.; Budde, L.; Friedli, T. The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review. *Int. J. Prod. Econ.* **2020**, *221*, 107476. [[CrossRef](#)]

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Environnement and Climate Change Canada, Rapport: *2030 Emissions Reduction Plan: Canada's Next Steps for Clean Air and a Strong Economy*. 2022: Gatineau, QC, CANADA. p. 271.
2. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Rapport: *Politique énergétique 2030*, 2016, Québec, CANADA.
3. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Rapport: *Politique énergétique 2016-2025: EFFICACITÉ ET INNOVATION ÉNERGÉTIQUES*, 2015, Editor. Bibliothèque et Archives nationales du Québec, Québec, CANADA.
4. CEFRIO, *INDUSTRIE 4.0 Enquête auprès des entreprises manufacturières du Québec*. 2017, Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation: Québec. p. 35.
5. Garrido, N., et al., *Chapter 2 - Wood and Wood-based panels machining quality*. 2011. p. 27-82.
6. Blokdyk, G., *Ishikawa Diagram a Complete Guide - 2019 Edition*. 2018: Emereo Pty Limited.
7. ASTM, *Standard test methods for conducting machining tests of wood and wood-base materials*, in *Annual Book of ASTM Standards 2008*, A.D. 1666-87, Editor. 2004: West Philadelphia, PA, USA.
8. Composite Pannel Association, *Technical Bulletin; Storage and handling of Particleboard and Medium Density Fiberboard (MDF)*. 2000.
9. Fu, Q, *Comportement physique, chimique et mécanique du bois suite à la compression sous l'effet de la chaleur et de l'humidité*, Thèse de doctorat, in *Département des sciences du bois et de la forêt*. 2019, Université Laval: Québec. p. 178.
10. Bennamoun, L., F. Kerouaz, and A. Belhamri, *Etude du comportement énergétique d'un séchoir à bois*. Conference: 6ème Journées de Mécanique, 15-16 Avril 2008.
11. Xu, L.D., E.L. Xu, and L. Li, *Industry 4.0: state of the art and future trends*. International Journal of Production Research, 2018. **56**(8): p. 2941-2962.
12. Kagermann H, L.W., Wahlster W, *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*. , in *VDI nachrichten*. 2011, VDI nachrichten: Düsseldorf. p. 2.
13. Hermann, M., T. Pentek, and B. Otto, *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. 2015.
14. Muhuri, P.K., A.K. Shukla, and A. Abraham, *Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2019. **78**: p. 218-235.
15. Ang, J., et al., *Energy-Efficient Through-Life Smart Design, Manufacturing and Operation of Ships in an Industry 4.0 Environment*. Energies, 2017. **10**(5).

16. Cevik Onar, S. and A. Ustundag, *Smart and Connected Product Business Models*, in *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*. 2018, Springer International Publishing: Cham. p. 25-41.
17. H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig, *Final report of the Industry 4.0, Working Group: Securing the future of German manufacturing industry, Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*. 2013, Office of the Industry-Science Research Alliance Germany: Germany. p. 18.
18. Odooroga, P., *Smart Factory concept. Smart Industry process icons* in Alamy. 2016, Alamy.
19. Rößmann, M., et al. *Industry 4 . 0 : The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries April 09*. 2016.
20. Vaidya, S., P. Ambad, and S. Bhosle, *Industry 4.0 – A Glimpse*. *Procedia Manufacturing*, 2018. **20**: p. 233-238.
21. Gilchrist, A., *Introduction to the Industrial Internet*, in *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*. 2016, Apress: Berkeley, CA. p. 1-12.
22. Rojko, A., *Industry 4.0 Concept: Background and Overview*. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*, 2017. **11**(5).
23. Consortium, I.I., *Industrial Internet Reference Architecture*. industrial IoT consortium (IIC), 2015.
24. Bassi, L. *Industry 4.0: Hope, hype or revolution?* in *2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*. 2017.
25. Welbourne, E., et al., *Building the Internet of Things Using RFID: The RFID Ecosystem Experience*. *IEEE Internet Computing*, 2009. **13**(3): p. 48-55.
26. Hozdić, E., *Smart factory for industry 4.0: A review*. *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology*, 2015. **7**: p. 28-35.
27. Baheti, R. and H. Gill, *Cyber-physical systems*. The impact of control technology, 2011. **12**(1): p. 161-166.
28. Lee, J., *Smart Factory Systems*. *Informatik-Spektrum*, 2015. **38**(3): p. 230-235.
29. Gill, H., *From Vision to Reality: Cyber-Physical Systems*, in *HCSS National Workshop on New Research Directions for High Con-fidence Transportation CPS: Automotive, Aviation, and Rail*, N.S.F. NITRD High Confidence Software and Systems Coordinating Group, Editor. 2008: Washington, DC.
30. Posada, J., et al., *Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet*. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2015. **35**(2): p. 26-40.
31. Fraga-Lamas, P., et al., *A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard*. *IEEE Access*, 2018. **6**: p. 13358-13375.
32. Lee, J., B. Bagheri, and H.-A. Kao, *A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems*. *Manufacturing Letters*, 2015. **3**: p. 18-23.
33. Sami Sivri, M. and B. Oztaysi, *Data Analytics in Manufacturing*, in *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*. 2018, Springer International Publishing: Cham. p. 155-172.
34. Lee, J., et al., *Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems*. *Manufacturing Letters*, 2018. **18**: p. 20-23.

35. Aoun, A., et al., *A review of Industry 4.0 characteristics and challenges, with potential improvements using blockchain technology*. Computers & Industrial Engineering, 2021. **162**: p. 107746.
36. Salkin, C., et al., *A Conceptual Framework for Industry 4.0*, in *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*. 2018, Springer International Publishing: Cham. p. 3-23.
37. Kuhn, W. *Digital Factory - Simulation Enhancing the Product and Production Engineering Process*. in *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*. 2006.
38. Schuh, G., et al., *Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in the Context of Industrie 4.0*. Procedia CIRP, 2014. **19**: p. 51-56.
39. Erol, S., et al., *Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production*. Procedia CIRP, 2016. **54**: p. 13-18.
40. Monostori, L., *Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges*. Procedia CIRP, 2014. **17**: p. 9-13.
41. Mell, P. and T. Grance, *The NIST definition of cloud computing*. The National Institute of Standards and Technology (NIST) document, 2011.
42. Simmon, E., et al., *A vision of cyber-physical cloud computing for smart networked systems*. 2013: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology
43. Marilungo, E., et al., *From PSS to CPS Design: A Real Industrial Use Case Toward Industry 4.0*. Procedia CIRP, 2017. **64**: p. 357-362.
44. Landherr, M., U. Schneider, and T. Bauernhansl, *The Application Center Industrie 4.0 - Industry-driven Manufacturing, Research and Development*. Procedia CIRP, 2016. **57**: p. 26-31.
45. Murmura, F. and L. Bravi, *Additive manufacturing in the wood-furniture sector*. Journal of Manufacturing Technology Management, 2017. **29**(2): p. 350-371.
46. Bloem, J., et al., *The fourth industrial revolution*. Things Tighten, 2014. **8**: p. 11-15.
47. Bibby, L. and B. Dehe, *Defining and assessing industry 4.0 maturity levels – case of the defence sector*. Production Planning & Control, 2018. **29**(12): p. 1030-1043.
48. Belt, C.K., *Introduction*. 1st Edition ed. Energy-management-for-the-metals-industry, ed. E.T. Built Environment, Physical Sciences. 2017, New york: CRC Press. 218.
49. Gordic, D., et al., *Integrating energy and environmental management in wood furniture industry*. ScientificWorld Journal, 2014. **2014**:596958.
50. McKane, A., et al., *Thinking Globally: How ISO 50001 - Energy Management Can Make Industrial Energy Efficiency Standard Practice*. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.
51. Parliament, E., *Directive 2006/32/EC on energy end-use efficiency and energy services and repealing* in *Official Journal of the European Union*, C.o.t.E. Union, Editor. 2006, European Parliament: Europe (15 members). p. L 114/67-68.

52. I. Iliev, N. Kaloyanov, P. Gramatikov, A. Terziev, I. Palov, S. Stefanov, K. Sirakov, V. Kamburova, *Energy Efficiency and Energy Management Handbook*. Energy Efficiency and Green Economy (BEECIFE). 2012, Bulgaria: En cone services.
53. International Confederation of Energy Regulators (ICER), *A Description of Current Regulatory Practices for the Promotion of Energy Efficiency*. 2010. p. 8/176.
54. Nienke, S., et al., *Energy-Management 4.0*, in *Proceedings of the 6th International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications*. 2017. p. 6-10.
55. Khan, A. and K. Turowski, *A Survey of Current Challenges in Manufacturing Industry and Preparation for Industry 4.0*, in *Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'16)*. 2016. p. 15-26.
56. Adenuga, O.T., K. Mpofu, and R.I. Boitumelo, *Energy efficiency analysis modelling system for manufacturing in the context of industry 4.0*. *Procedia CIRP*, 2019. **80**: p. 735-740.
57. Lenz, J., J. Kotschenreuther, and E. Westkaemper, *Energy Efficiency in Machine Tool Operation by Online Energy Monitoring Capturing and Analysis*. *Procedia CIRP*, 2017. **61**: p. 365-369.
58. Javied, T., et al. *Strategic energy management in industry 4.0 environment*. in *2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)*. 2018.
59. J. Greenblatt, M. Wei, J. McMahon, *California's Energy Future: Buildings & Industrial Efficiency*. 2012, Lawrence Berkeley National Laboratory: California. p. 36.
60. Dufloy, J.R., et al., *Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach*. *CIRP Annals*, 2012. **61**(2): p. 587-609.
61. Kabalci, Y., *Communication Methods for Smart Buildings and Nearly Zero-Energy Buildings*, in *Energy Harvesting and Energy Efficiency: Technology, Methods, and Applications*, N. Bizon, et al., Editors. 2017, Springer International Publishing: Cham. p. 459-489.
62. Missaoui, R., et al., *Managing energy Smart Homes according to energy prices: Analysis of a Building Energy Management System*. *Energy and Buildings*, 2014. **71**: p. 155-167.
63. Shrouf, F., J. Ordieres, and G. Miragliotta. *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*. in *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. 2014.
64. Zheng, P., et al., *Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives*. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018. **13**(2): p. 137-150.
65. Chryssolouris, G., *Manufacturing systems: theory and practice*. 2006: Springer Science & Business Media. 606.
66. Apostolos, F., et al., *Energy Efficiency of Manufacturing Processes: A Critical Review*. *Procedia CIRP*, 2013. **7**: p. 628-633.

67. Herrmann, C. and S. Thiede, *Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2009. **1**(4): p. 221-229.
68. Miragliotta, G. and F. Shrouf. *Using Internet of Things to Improve Eco-efficiency in Manufacturing: A Review on Available Knowledge and a Framework for IoT Adoption*. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
69. Ikeyama T. Watanabe H. Isobe S. Takahashi H, *An Approach to Optimize Energy Use in Food Plants*, in *SICE Annual Conference*, W. University, Editor. 2011, Waseda University: Tokyo. p. 1574–1579.
70. Zhuming, B., X. Li Da, and W. Chengen, *Internet of Things for Enterprise Systems of Modern Manufacturing*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014. **10**(2): p. 1537-1546.
71. Wei, M., S.H. Hong, and M. Alam, *An IoT-based energy-management platform for industrial facilities*. Applied Energy, 2016. **164**: p. 607-619.
72. Fei, T., et al., *Internet of Things and BOM-Based Life Cycle Assessment of Energy-Saving and Emission-Reduction of Products*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014. **10**(2): p. 1252-1261.
73. Meng, Y., et al., *Enhancing Sustainability and Energy Efficiency in Smart Factories: A Review*. Sustainability, 2018. **10**(12).
74. Javied, T., T. Rackow, and J. Franke, *Implementing Energy Management System to Increase Energy Efficiency in Manufacturing Companies*. Procedia CIRP, 2015. **26**: p. 156-161.
75. May, G., et al., *Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework*. Journal of Cleaner Production, 2017. **167**: p. 1464-1489.
76. Berglund, J., et al. *Energy efficiency analysis for a casting production system*. in *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC)*. 2011.
77. Page, M.J., et al., *The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews*. BMJ, 2021. **372**: p. n71.
78. Tesch da Silva, F.S., et al., *Looking at energy through the lens of Industry 4.0: A systematic literature review of concerns and challenges*. Computers & Industrial Engineering, 2020. **143**.
79. Vieira, E.L., et al., *Application of the Proknow-C Methodology in the Search of Literature on Performance Indicators for Energy Management in Manufacturing and Industry 4.0*. Procedia Manufacturing, 2019. **39**: p. 1259-1269.
80. Nota, G., et al., *Energy Efficiency in Industry 4.0: The Case of Batch Production Processes*. Sustainability, 2020. **12**(16).
81. Vianna, V.W., W.C. Celeste, and R.R.de Freitas, *Energy efficiency in the context of Industry 4.0*. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 2019. **6**(12): p. 1-16.
82. Pödör, Z., et al., *Industrial IoT techniques and solutions in wood industrial manufactures*. Infocommunications Journal, 2017. **IX**: p. 24-30.
83. Lin, C.C., et al., *Key design of driving industry 4.0: joint energy-efficient deployment and scheduling in group-based industrial wireless sensor networks*. IEEE Communications Magazine, 2016. **54**(10): p. 46-52.

84. Winkler-Goldstein, R., et al. *Fractal Production Reprogramming “Industrie 4.0” Around Resource and Energy Efficiency?* in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. 2018.
85. Mohamed, N., J. Al-Jaroodi, and S. Lazarova-Molnar, *Leveraging the Capabilities of Industry 4.0 for Improving Energy Efficiency in Smart Factories*. IEEE Access, 2019. **7**: p. 18008-18020.
86. Javied, T., S. Huprich, and J. Franke, *Cloud based Energy Management System Compatible with the Industry 4.0 Requirements*. IFAC-PapersOnLine, 2019. **52**(10): p. 171-175.
87. Zhou, K., C. Fu, and S. Yang, *Big data driven smart energy management: From big data to big insights*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **56**: p. 215-225.
88. Ko, J.-S., J.-H. Huh, and J.-C. Kim, *Improvement of Energy Efficiency and Control Performance of Cooling System Fan Applied to Industry 4.0 Data Center*. Electronics, 2019. **8**(5).
89. Seewaldt, M., et al., *Energy-Oriented Material Flow Simulation as a Contribution to Automotive Industry 4.0*. SNE Simulation Notes Europe, 2017. **27**(2): p. 61-66.
90. Haddouche, M. and A. Ilinca, *Energy Efficiency and Industry 4.0 in Wood Industry: A Review and Comparison to Other Industries*. Energies, 2022. **15**(7): p. 2384.
91. Statistique Canada . *Un aperçu des ressources forestières du Canada*. 2018, Gouvernement du Canada, <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/180314/g-b001-fra.htm>.
92. Delisle, J.-F., *Ressources et industries forestières du québec- Portrait statistique 2020*, Direction du développement et de l'innovation de l'industrie, Editor. 2020, Ministère Des Forêts, De La Faune Et Des Parcs.
93. Ministère des Ressources Naturelles, *L'état des forêts au Canada- RAPPORT ANNUEL 2020*, 2020. p. 96.
94. Ministère Des Forêts, De La Faune Et Des Parcs, *PLAN STRATÉGIQUE 2019-2023*, 2021, Gouvernement du Québec.
95. Forestier en chef, *Analyse des risques de feux de forêt dans la région Nord-du-Québec*. 2022, Gouvernement du Québec: Roberval, Québec. p. 18.
96. Price waterhouse Coopers (PwC), *Étude d'impact économique de l'industrie québécoise du bois*. 2020, Quebec Wood Export Bureau (QWEB). p. 83.
97. Jolicoeur, M., *Hausse de 300% des prix du bois - Un dur coup qui affecte les projets de rénos des ménages québécois et ça ne fait encore que commencer*, in *Le journal de Montréal*. 2021: Montréal.
98. Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie. *l'industrie de l'ameublement au Québec 2021*, Gouvernement du Québec.
99. Miller, R.B., *Characteristics and availability of commercially important woods*. Wood handbook: wood as an engineering material. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL; GTR-113: Pages 1.1-1.34, 1999. **113**.

100. Wiemann, M.C. *Characteristics and availability of commercially important woods*. Forest Products Laboratory. Wood handbook: wood as an engineering material. Madison: United States Department of Agriculture: Forest Service 2010.
101. Ramage, M.H., et al., *The wood from the trees: The use of timber in construction*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **68**: p. 333-359.
102. Moutee, M. *Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage*. 2006. Conference paper
103. Wiedenhoef, A.C. *Structure and Function of Wood*. 2004, Conference paper.
104. Salem, T., *Séchage intermittent du bois d'oeuvre : étude expérimentale et numérique- Intermittent wood drying : experimental and numerical investigation*. 2016, Université de Lorraine, PhD Thesis.
105. Stokke, D.D., et al., *Introduction to Wood and Natural Fiber Composites*. 2013: Wiley.
106. Glass, Samuel V.; Zelinka, Samuel L. *Moisture relations and physical properties of wood*. Wood handbook : wood as an engineering material: chapter 4. 2010. Centennial ed. General technical report FPL ; GTR-190. Madison, WI : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 4.1-4.19.
107. Simpson, W. and A. TenWolde, *Physical properties and moisture relations of wood*. Chapter 3, 1999. p. 2-1.
108. Wu, Q., *Development Of An Interactive Computer Simulation Model For Designing Laminated Composite Panels*, 2005, School of Renewable Natural Resources, Louisiana State University Baton Rouge Louisiana.
109. Hiziroglu, S. *Dimensional changes in wood*. 2007, Oklahoma State University. Division of Agricultural Sciences and Natural Resources. Cooperative Extension Service.
110. Clausen, C.A., *Biodeterioration of wood*. Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 14. Centennial ed. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010, General technical report FPL; GTR-190: p. 14.1-14.16., 2010. **190**.
111. Highley, T.L., *Biodeterioration of wood*. Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 14 Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL; GTR-113: p 13.1-13.16, 1999. **113**.
112. Bergman, R., *Drying and control of moisture content and dimensional changes*. Chapter 13 in FPL-GTR-282, 2021: p. 13-1.
113. Reimer, J., *Arbre généalogique des panneaux dérivés du bois* 2008, Lignum - Economie suisse du bois: Suisse, Image libre.
114. Baca, G.R.R., *Soudage du bois par rotation*. 2010, Université Laval.
115. Davis, E.M., *Machining and related characteristics of United States hardwoods*. 1962: US Department of Agriculture.
116. Mate, A.A, *Energy analysis and diagnostics in wood manufacturing industry*. 2002, Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports, 1270, West Virginia University.
117. Bal, B.C. and F. Dumanoğlu, *Surface Roughness and Processing Time of a Medium Density Fiberboard Cabinet Door Processed via CNC Router, and the Energy Consumption of the CNC Router*. BioResources, 2019. **14**(4): p. 9500-9508.

118. Falk, R.H., *Wood as a sustainable building material*. Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 1. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 1.1-1.6., 2010. **190**: p. 1.1-1.6.
119. Beaulac, P., et al., *Parameters Affecting Dust Collector Efficiency for Pneumatic Conveying: A Review*. *Energies*, 2022. **15**(3): p. 916.
120. Beaulac, P., et al., *Improving the Energy Efficiency of Cyclone Dust Collectors for Wood Product Factories*. *Open Journal of Energy Efficiency*, 2021. **10**: p. 97-119.
121. Chian, C. and J. Ricardo, *Stratégies de séchage à haute température pour le bois à valeur ajoutée*. 2006 M. Sc. memoire , Département des sciences du bois et de la forêt, Faculté de foresterie et géomatique, Université Laval.
122. Barbosa de Lima, A.G., et al., *Drying of Bioproducts: Quality and Energy Aspects*, in *Drying and Energy Technologies*, J.M.P.Q. Delgado and A.G. Barbosa de Lima, Editors. 2016, Springer International Publishing: Cham. p. 1-18.
123. ASTM, *Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-base Materials*. 2007: ASTM International.
124. Simpson, W.T., *Drying and control of moisture content and dimensional changes*. Wood handbook: wood as an engineering material. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL; GTR-113: Pages 12.1-12.20, 1999. **113**.
125. Sanchez, C.M.d.L.C., *Utilisation de conduites de séchage oscillantes pour réduire les contraintes liées au retrait du bois*. 2012, PhD thesis, L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement AgroParisTech.
126. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE Standard 55a*, in *Addendum to Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. 1995: Atlanta, GA.
127. Siau, J.F., *Transport Processes in Wood*. 1984: Springer-Verlag.
128. Liu, R., et al., *Dynamic moisture sorption and formaldehyde emission behavior of three kinds of wood-based panels*. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018. **76**(3): p. 1037-1044.
129. Irle, M., et al., *Wood-Based Panels: An Introduction for Specialists*. 2010, Brunel University Press, ISBN 978-1-902316-82-6.
130. Nelson, R.M., *A model for sorption of water vapor by cellulosic materials*. *Wood and Fiber Science*, 1983. **15**(1): p. 8-22.
131. Wu, Q., *Application of nelson's sorption isotherm to wood composites and overlays*. *Wood and Fiber Science*, 1999. **31**: p. 187-191.
132. Wu, Q. and O. Suchsland, *Prediction of moisture content and moisture gradient of an overlaid particleboard*. *Wood and Fiber Science*, 1996. **28**(2): p. 227-239.
133. Ganev, S., et al., *Effect of panel moisture content and density on moisture movement in MDF*. *Wood and Fiber Science*, 2003. **35**: p. 68-82.
134. Cloutier, A. and Y. Fortin, *A model of moisture movement in wood based on water potential and the determination of the effective water conductivity*. *Wood Science and Technology*, 1993. **27**(2): p. 95-114.

135. Crank, J. and G. Park, *An evaluation of the diffusion coefficient for chloroform in polystyrene from simple absorption experiments*. Transactions of the Faraday Society, 1949. **45**: p. 240-249.
136. Crank, J., *The Mathematics of diffusion*. 2nd ed. 1975: Clarendon Press.
137. Luikov, A.V., *Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies*, in *Advances in Heat Transfer*, T.F. Irvine and J.P. Hartnett, Editors. 1966, Elsevier. p. 123-184.
138. Simpson W. T. *Measuring dependence of diffusion coefficient of wood on moisture concentration by adsorption experiments*. Wood and Fiber Science, 1974, p. 299-307.
139. Liu, J.Y., *A new method for separating diffusion coefficient and surface emission coefficient*. Wood and Fiber Science, 1989: p. 133-141.
140. Simpson, W.T. and J.Y. Liu, *Dependence of the water vapor diffusion coefficient of aspen (Populus spec.) on moisture content*. Wood Science and Technology, 1991. **26**: p. 9-21.
141. Whitaker, S., *Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying*, in *Advances in Heat Transfer*, J.P. Hartnett and T.F. Irvine, Editors. 1977, Elsevier. p. 119-203.
142. Stanish, M., G. Schajer, and F. Kayihan, *A mathematical model of drying for hygroscopic porous media*. AIChE Journal, 1986. **32**(8): p. 1301-1311.
143. Fortin, Y., *Moisture content-matric potential relationship and water flow properties of wood at high moisture contents*. 1980, Phd Thesis, University of British Columbia.
144. Cloutier, A. and Y. Fortin, *Moisture content" water potential relationship of wood from saturated to dry conditions*. Wood Science and Technology, 1991. **25**: p. 263-280.
145. Liping, C. and S. Deku, *Modelling of the moisture transfer process in particleboards*. Holz als Roh- und Werkstoff, 1992. **50**(10): p. 395-399.
146. Cai, L. and F. Wang, *Steady and unsteady state moisture movement in particleboards*. Holz als Roh- und Werkstoff, 1994. **52**(5): p. 304-306.
147. Wu, Q and Xiong M, *A Simulation of Moisture Diffusion Process in Furniture-grade Medium Density Fibreboard*. in *Proceedings of 7th International IUFRO Wood Drying Conference*. 2001. Tsukuba, Japan.
148. Monteith, J.L. and Unsworth, M.H., *Chapter 2 - Properties of Gases and Liquids*, in *Principles of Environmental Physics (Fourth Edition)*, 2013, Academic Press: Boston. p. 5-23.
149. Routa, J., M. Kolström, and L. Sikanen, *Dry matter losses and their economic significance in forest energy procurement*. International Journal of Forest Engineering, 2018. **29**(1): p. 53-62.
150. Autengruber, M., M. Lukacevic, and J. Füssl, *Finite-element-based moisture transport model for wood including free water above the fiber saturation point*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020. **161**: 120228.
151. Qing-xian, Y., *Study on the specific heat of wood by statistical mechanics*. Journal of Forestry Research, 2000. **11**(4): p. 265-268.
152. Li, K.Y., C.M. Fleischmann, and M.J. Spearpoint, *Determining thermal physical properties of pyrolyzing New Zealand medium density fibreboard (MDF)*. Chemical Engineering Science, 2013. **95**: p. 211-220.

153. TenWolde, A., McNatt, J. D., and Krahn, L. *Thermal properties of wood and wood panel products for use in buildings*. 1988. Technical Report, Forest Products Laboratory, Forest Service, Department of Agriculture United States.
154. Zhang, D.-y., L.-p. Sun, and J. Cao, *Modeling of temperature-humidity for wood drying based on time-delay neural network*. Journal of Forestry Research, 2006. **17**(2): p. 141-144.
155. Demir, A., A.U. Birinci, and H. Ozturk, *Determination of the surface characteristics of medium density fibreboard processed with CNC machine and optimisation of CNC process parameters by using artificial neural network*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2021. **35**: p. 929-942.
156. Melo, R. and E. Miguel, *Use of artificial neural networks in predicting particleboard quality parameters*. Revista Árvore, 2016. **40**: p. 948-958.
157. Chai, H., et al., *Artificial Neural Network Modeling for Predicting Wood Moisture Content in High Frequency Vacuum Drying Process*. Forests, 2019. **10**(1): p. 16.
158. Pham, H., *A New Criterion for Model Selection*. Mathematics, 2019. **7**(12): p. 1215.
159. Corallo, A., M. Lazoi, and M. Lezzi, *Cybersecurity in the context of industry 4.0: A structured classification of critical assets and business impacts*. Computers in Industry, 2020. **114**: p. 103165.