RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIQUE

UNIVERSITÉ YAHIA FARÈS DE MÉDÉA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MECANIQUE



THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de doctorat LMD

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

PAR

BOUKRIDA Aboubakr

Thème :

Estimation par plan d'expériences et de réseau de neurones du comportement mécanique du liège traité par procédés écologiques

Soutenue le 03 /07/2024 devant le jury composé de :

Kermezli Tayeb	MCA	UNIV de Médéa	Directeur de thèse
Announ Mohamed	Prof	UNIV de Médéa	Co-Directeur de thèse
Tir Mohamed	MCA	UNIV de Médéa	Président
Ladeg Soufyane	MCA	UNIV de Tissemssilt	Examinateur
Atsamnia Djamel	MCA	UNIV de Médéa	Examinateur

Dédicace

À mon père, ma mère et mes frères,

Je dédie cette thèse à vous, ma famille, qui avez été une source constante de soutien, de compréhension et d'encouragement tout au long de ce voyage académique. Votre amour inconditionnel et vos sacrifices ont été la force motrice derrière mes efforts et mes réussites.

Papa, tu m'as toujours inspiré par ta détermination infatigable et ta sagesse inébranlable. Ta foi en mes capacités m'a donné la confiance nécessaire pour poursuivre mes rêves les plus audacieux.

Maman, ton dévouement sans faille et ton amour inconditionnel ont été mes piliers dans les moments de doute et de difficulté. Ta présence rassurante et tes mots encourageants ont éclairé mon chemin vers la réussite.

À mes frères, dont le soutien inébranlable et les encouragements constants ont été une source de motivation inestimable. Votre fierté pour mes réalisations et votre confiance en mes capacités ont été des combustibles pour mon ambition.

Que cette dédicace soit une humble expression de ma reconnaissance éternelle et de mon amour infini pour vous tous.

Avec tout mon amour et ma gratitude,

Aboubakr

Remerciements

'Ma réussite n'est due qu'à Allah'

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers mon directeur de thèse, le professeur Tayeb Kermezli, pour sa guidance experte, son soutien constant et sa patience infinie tout au long de cette aventure académique. Sa passion pour la recherche et son dévouement à mon égard ont été une source d'inspiration inestimable.

Je souhaite également adresser mes sincères remerciements à mon co-directeur de thèse, le professeur Mohammed Announ, pour ses précieux conseils, son encouragement et sa disponibilité tout au long de ce projet.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers le Professeur Mustapha Douani, les docteurs Sofyane Ladeg, Tir Mohammed, kezrane mohamed et Atsamnia Djamel pour leur précieuse contribution à mes travaux de simulation. Leur expertise et leurs conseils éclairés ont grandement enrichi mon travail et m'ont permis d'atteindre mes objectifs de recherche.

Un sincère remerciement à Monsieur le Docteur Mohammed Bedronni et à Monsieur Faouzi Fekaouni pour leur soutien et leurs conseils tout au long de mon parcours universitaire.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers mon père et ma famille et mes amis Maamar Chahrour, Abdelhak et Hamza pour leur soutien inconditionnel.

Je tiens également à remercier tous les membres du laboratoire matériaux et environnement, sans oublier le Professeur Zemireline Abdelkrim, décédé, que Dieu lui fasse miséricorde

Résumé

Le traitement écologique à haute température (THT) entraîne une modification dans la structure mécanique du liège, sous l'effet de plusieurs paramètres tels que la zone de culture (Médéa, Jijel et Skikda), la direction de coupe (radiale, tangentielle et longitudinale) et la nature des échantillons (natifs et traités). Cette amélioration a été évaluée à travers le coefficient de diffusion apparent (D_{app}). Ce dernier montre que le traitement thermique a conduit à une amélioration très significative de l'isolation massique du liège, avec un meilleur D_{app} du liège cultivé dans la région de Jijel par rapport au liège de Médéa et de degré moins de la région Skikda. Après l'optimisation des coefficients de diffusion par le Bat-Algorithm, la meilleure isolation est dégagée par la direction de diffusion tangentielle ($D_{JTt} = 1.17\times10^{-13}$ m^2s^{-1}) que la direction longitudinale ($D_{JLt}=2,62x10^{-13}m^2.s^{-1}$) et de degré moins dans la direction radiale ($D_{JRt}=4,5x10^{-13}m^2.s^{-1}$), le traitement a prouvé une amélioration de 10 fois par rapport au natif, avec une erreur quadratique moyenne de 10^{-5}. En outre, cette étude a été complétée par deux approches complémentaires pour évaluer le comportement mécanique du liège traité. D'une part, les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont utilisés pour prédire ce comportement en fonction de divers paramètres, avec une architecture optimale de (5-5-13-1) et un coefficient de corrélation égale à 0,91. D'autre part, le plan d'expérience permette d'examiner l'influence et les interactions entre ces paramètres et qui a donné que le traitement thermique est un paramètre prépondérant par rapport à la direction et de la zone. De plus l'interaction entre le traitement et la direction tangentielle est significative, par rapport à l'effet de l'interaction de la zone avec les deux autres paramètres. Notre travail vise à combiner ces méthodes pour obtenir une estimation précise et durable, avec des implications potentielles pour l'industrie du liège.

Mots clés : Liège ; THT ; coefficient de diffusion ; modélisation ; optimisation ; ANN ; plan d'expérience.

ملخص

تؤدي المعالجة بدرجة الحرارة المرتفعة (THT) إلى تعديل في البنية الميكانيكية للفلين، تحت تأثير عدة عوامل مثل منطقة الزراعة (المدية ,جيجل وسكيكدة)، واتجاه القطع (شعاعي، عرضي وطولي) و طبيعة العينات (الأصلية والمعالجة). تم تقييم هذا التحسن من خلال معامل الانتشار الظاهري (D_{app}). ويبين هذا الأخير أن المعالجة الحرارية أدت إلى تحسن كبير جدا في العزل الشامل للفلين، مع D_{app} أفضل للفلين المزروع بمنطقة جيجل مقارنة بالفلين من المدية وبدرجة أقل من منطقة سكيكدة. بعد تحسين معاملات الانتشار بواسطة خوارزمية Bat-Alogorithme، يتم تحرير أفضل عزل بواسطة اتجاه الانتشار العرضي (D_{JTt}=1. 17×10^{-13}) من الاتجاه الطولي (D_{JLt}=2.62×10^{-13}) وبدرجة ناقص في الاتجاه الشعاعي (D_{JRt}=4.5×10^{-13})، أثبت العلاج تحسنًا بمقدار 10 اضعافً مقارنة بالفلين الغيرالمعالج، مع وجود متوسط الخطأ تربيعي قدره 10^{-5}. بالإضافة إلى ذلك، تم استكمال هذه الدراسة بطريقتين متكاملتين لتقييم السلوك الميكانيكي للفلين المعالج. فمن ناحية، تم استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) للتنبؤ بهذا السلوك بناءً على معاملات مختلفة، وببنية مثالية (5-5-13-1) ومعامل ارتباط يساوي 0.91. ومن ناحية أخرى، مكّن التصميم التجريبي من فحص التأثير والتفاعلات بين هذه العوامل، حيث كانت المعالجة الحرارية هي العامل السائد فيما يتعلق بالاتجاه والمنطقة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن التفاعل بين المعالجة والاتجاه العرضي له أهمية كبيرة، مقارنةً بتأثير تفاعل المنطقة مع العاملين الآخرين. يهدف عملنا إلى الجمع بين هذه الأساليب للحصول على تقدير دقيق ومستدام، مع ما يترتب على ذلك من آثار محتملة على صناعة الفلين.

الكلمات الرئيسية : الفلين , المعالجة الحرارية ,معامل الانتشار, النمذجة, التحسين, الشبكة العصبية الاصطناعية, التصميم التجريبي

.

Abstract

The ecological high temperature treatment (THT) leads to a modification in the mechanical structure of the cork, under the effect of several parameters such as the cultivation zone (Médéa, Jijel and Skikda), the cutting direction (radial, tangential and longitudinal) and the nature of the samples (native and treated). This improvement was evaluated through the apparent diffusion coefficient (D_{app}). The latter shows that the heat treatment led to a very significant improvement in the mass insulation of the cork, with a better D_{app} of the cork grown in the Jijel region compared to the cork from Médéa and less degree from the Skikda region. After the optimization of the diffusion coefficients by the Bat-Algorithm, the best insulation is released by the tangential diffusion direction (D_{JTt}=1.17x10^{-13}m^{2}s^{-1}) than the longitudinal direction (D_{JLt}=2,62x10^{-13}m^2.s^{-1}) and less in the radial direction (D_{JRt}=4,5x 10^{-13}m^2.s^{-1}), the treatment proved an 10-fold improvement over the native, with a root mean square error of 10^{-5}. In addition, this study was supplemented by two complementary approaches to evaluate the mechanical behavior of treated cork. On the one hand, artificial neural networks (ANN) are used to predict this behavior based on various parameters, with an optimal architecture of (5-5-13-1) and a correlation coefficient equal to 0.91195. On the other hand, the experimental design allowed us to examine the influence and interactions between these parameters, which resulted in heat treatment being a predominant parameter in relation to direction and zone. Moreover, the interaction between treatment and tangential direction is significant, compared with the effect of the interaction of zone with the other two parameters. Our work aims to combine these methods to obtain an accurate and sustainable estimate, with potential implications for the cork industry.

Key words: Cork; THT; diffusion coefficient; modelling; optimisation; ANN; experimental design.

Abréviations

AE	auto-encodeurs
ANN	Artificial Neural Networ$_k$
BA	Bat Algorithm
BET	Brunauer, Emmet et Teller
BR	Régularisation bayésienne
CNN	Convolutional neural network
DTG	differential thermogravimetric
DNN	Deep Neural Network
GAN	Generative adversarial networks
HR	Humidité Relative
LM	Levenberg-Marquardt
LSTM	Réseau Long short-term memory
mD	Millidarcys
MEB	Microscopie Electronique à Balayage
MLP	Multilayer perceptron
MSE	Mean Squared Error
NaCl	Chlorure de Sodium
PC	Personnel Computer
PVC	Chlorure de polyvinyle
RMSE	Racine de l'erreur quadratique moyenne
RNN	Recurrent Neural Network
SPAD	Suberin poly (aliphatics) domain
SCG	Scaled conjugate gradient
TEM	Transmission electron microscopy
TGA	Thermal gravimetric analysis
THT	Traitement à Haute Température

Nomenclatures

Symbole	Significations	Unités
A	Constante isotherme de Temkin	$L \cdot mg^{-1}$
B	Constante liée à la chaleur d'adsorption de Temkin	$J \cdot mol^{-1}$.
$(ct)_{exp}$	Concentration instantanée mesurée par le conductimètre	mM
c_i	Concentration de l'espèce chimique (i) diffusante	mol/m^3
c_0	Concentration initiale corrigée du soluté contenue dans le copeau humide	mol/l
c_∞	Concentration infinie	mM
C	Concentration de gaz	kg/m^3
C_i	Concentration de l'espèce chimique diffusante.	mol/m^3
Ce	Concentration de colorant à l'équilibre dans la solution	$mg.L^{-1}$
C_0	Concentration du colorant a l'instant t=0.	1
D_{app}	Coefficient de diffusion apparent	m^2/s
E_H	Dimension en épaisseur du copeau imprégné d'humidité.	cm
e	L'épaisseur D'échantillon	m
K_F	Capacité d'adsorption relative d'adsorbant	$mg.g^{-1}$
K_L	Constante de Langmuir	L.mg-1
L_g	Parcours apparent de la substance	m
L_r	Parcours moyen réel de la substance à travers le copeau	m
l	Demi-épaisseur de l'échantillon	m
m_∞	Masse de la substance transférée après la désorption complète en un temps infini.	g
m_t	Variation de la masse de la substance relâchée à l'instant t.	g
m_0	Masse de l'échantillon anhydre	kg
M	Masse molaire du gaz	g/mol
m_t	Masse de la substance libérée à l'instant t	mM
m_{te}	Quantité d'eau transférée au temps t	kg
P_D	Perméabilité	Kg/(m.Pa)
P_F	Perméabilité selon Fick	Kg/(m).Pa)
Q	Débit volumique	$m^3 \cdot s^{-1}$
q_e	Quantité de colorant adsorbé à l'équilibre sur l'adsorbant.	$mg \cdot g^{-1}$
q_m	Capacité d'adsorption monocouche	mg/g
Q	Débit volumique du fluide	m^3/s
R	Constante des gaz parfaits	kJ/(kg).K)
S_H	Superficie latérale du coupeau humide.	cm^2
T	Température absolue	k
t	Temps	s
v_{sol}	Quantité de liquide de la solution	L
V	Volume du récipient renfermant le gaz	m^3

J	Flux massique	Kg/(m)
ε_H	Perméabilité (porosité) de l'échantillon dans son état humide.	Kg/(m)
α	Constante d'équilibre du bois hydraté,	1
β	Constante d'équilibre du bois non hydraté.	1
Δp	Disparité de pression	Pa
$\zeta = x$	Coordonnée axiale à partir du centre du copeau.	
$\zeta = r$	Coordonnée radial à partir du centre du copeau.	

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1	Section axiale du tronc d'un chêne-liège (Quercus suber L)	5
Figure I.2	Morphologie des cellules du liège dans les directions de croissance correspondantes par rapport au tronc de liège	6
Figure I.3	Organisation des différents polymères dans les parois des cellules de liège	7
Figure I.4	Les types monomériques de la lignine. (1) Alcool p-coumarylique , (2) Alcool coniférylique ,(3) Alcool sinapylique	10

Chapitre II

Figure II.1	Représentation de la tortuosité	19
Figure II.2	Flux selon la loi de Poiseuille à travers un cylindre de rayon R, avec une variation de pression P1-P2	21
Figure II.3	Modes de transfert de matière au sein d'un matériau poreux ; ou D le diamètre du pore et l_p le parcours moyen de la molécule	23
Figure II.4	Le mécanisme de diffusion d'une molécule d'oxygène au travers des cellules de liège	25

Chapitre III

Figure III.1	Structure simplifiée d'un réseau avec plusieurs entrées, avec des poids connectés (wij et wjk)	36

Chapitre IV

Figures VI.1	Processus de détermination du coefficient apparent de diffusion de mass	47
Figures VI.2	Organigramme présente tous les échantillons	48
Figure IV.3	Orientation cellulaire dans une coupe de liège observé par MEB	48
Figure IV.4	Étude thermogravimétrique du liège de Skikda, en Algérie	49
Figure IV.6	Four de traitement thermique NABERTHERM	50
Figure IV.5	Cycle de THT optimale	51

Figure IV.7	Décomposition thermique des constituants chimiques du liège à différentes températures	52
Figure IV.8	Image du Microscope Electronique à Balayage	53
Figure IV.9	IR-FT Le spectre des échantillons de liège naturels et traités	55
Figure IV.10	Schéma de procédure	55
Figure IV.11	Photo de la plaquette du liège étudiée	56
Figure IV.12	Schéma représentant le procédé d'imprégnation sous vide	56
Figure IV.13	Représentation graphique de l'équipement de mesure de la concentration	57
Figure IV.14	Optimisation par algorithme des chauves-souris (Bat-Algorithme)	61

Chapitre V

Figure V.1	Variation de la concentration en fonction de l'état du liège	64
Figure V.2	Variation de la concentration en fonction de l'état du liège	64
Figure V.3	Variation de la concentration en fonction de la zone de récolte pour le liège coupé Longitudinale	65
Figure V.4	Variation de la concentration en fonction de la zone de récolte pour le liège coupé Tangentiel	65
Figure V.5	Variation de la concentration en fonction de la direction de coupe pour le liège de Jijel a l'état natif	66
Figure V.6	Variation de la concentration en fonction et de la direction de coupe pour le liège de Skikda a l'état traité	67
Figure V.7	Calage des résultats expérimentaux avec le modèle de diffusion dans les deux cas traité et native	67
Figure V.8	Calage des résultats expérimentaux avec le modèle de diffusion dans les trois zones	68
Figure V.9	Calage des résultats expérimentaux avec le modèle de diffusion dans les 3 directions	68
Figure V.10	Détermination du nombre de couches cachées en fonction de R^2	69
Figure V.11	Optimisation de R^2 en fonction de l'architecture de réseau	69
Figure V.12	Variation de RMSE en fonction de L'architecture de réseau	70

Figure V.13	Architecture du réseau.	70
Figure V.14	Courbe de performance	71
Figure V.15	Graphiques de régression	73
Figure V.16	Evolution de la concentration de l'espèce i (milli-moles/litre) avec le temps pour les expériences portant les ordre 3 et 6.	76
Figure V.17	Evolution de la concentration de l'espèce i (milli-moles/litre) avec le temps pour les expériences portant les ordre 3 et 6.	78
Figure V.18	Evolution de la concentration de l'espèce i (milli-moles/litre) avec le temps pour les expériences portant les ordre 3 et 6.	79
Figure V.19	Graphique des effets Principaux	81
Figure V.20	Graphique des effets Principaux.	82
Figure V.21	Graphique des effets Principaux.	83
Figure V.22	Diagramme des valeurs résiduelles pour Y.	84
Figure V.23	Diagramme des interactions pour Y	84

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1	Répartition du chêne liège dans le monde et quantités de liège produite	4
Tableau I.2	Proportion des constituants chimiques dans le liège en pourcentage de masse	8
Tableau I.3	Principaux monomères subériniques et leurs proportions moyennes	9
Tableau I.4	Composants des polyosides	10
Tableau I.5	Principaux extractibles retrouvés dans le liège (µg.g-1 de liège sec)	10
Tableau I.6	Différents domaines d'utilisation du liège	11
Tableau I.7	Propriétés mécaniques générales de liège	15
Tableau I.8	Comparaison des densités et des conductivités thermiques de divers isolants	15

Chapitre IV

Tableau IV.1	Diverse variante du procédé expérimental	52
Tableau IV.2	Comparaison entre la densité moyenne des échantillons et les valeurs de densité rapportées dans la littérature	55

Chapitre V

Tableau V.1	Caractérisation des RNA adapté	63
Tableau V.2	Matrice d'expériences	73
Tableau V.3	Codage des facteurs influençant la diffusivité apparente, D_{app}	78
Tableau V.4	Evolution de la concentration de l'espèce i (moles/litre) avec le temps et l'ordre d'expérimentation du modèle 1	78
Tableau V.5	Codage des facteurs influençant la diffusivité apparente, D_{app}	79

Tableau V.6	Résultats expérimentaux de l'évolution de la concentration et coefficient de diffusion apparent.	79
Tableau V.7	Codage des facteurs influençant la diffusivité apparente	79
Tableau V.8	Résultats expérimentaux de l'évolution de la concentration et coefficient de diffusion apparent.	80

TABLE DES MATIERES

DEDICACE..... i
REMERCIEMENTS..... ii
RESUME..... iii
ملخص..... iv
ABSTRACT..... v
ABREVIATION….....vi
NOMENCLATURES..... vii
LISTE DES FIGURES..... viii
LISTE DES TABLEAU..... ix
INTRODUCTION GENERALE..... 1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE..... 1
I.1 INTRODUCTION..... 3
I.2 FORETS DE CHENE LIEGE..... 3
I.3 TYPES DE LIEGE..... 4
I.3.1 LIEGE MALE..... 4
I.3.2 LIEGE FEMELLE..... 5
I.4 STRUCTURE..... 5
I.5 STRUCTURE CELLULAIRE DU LIEGE..... 6
I.5.1 SUBERINE..... 8
I.5.2 LIGNINE..... 9
I.5.3 POLYOSIDES..... 10
I.6 UTILISATIONS DU LIEGE..... 11
I.7 PROPRIETES PHYSIQUES DU LIEGE..... 12
I.7.1 LEGERETE..... 12
I.7.2 IMPERMEABILITE AUX LIQUIDES ET AUX GAZ..... 12
I.7.3 RESISTANCE A LA CORROSION BIOLOGIQUE..... 12
I.7.4 PROPRIETES ACOUSTIQUES ET ANTI-VIBRATION..... 13
I.7.5 INFLAMMABILITE..... 13
I.7.6 FLEXIBILITE ET COMPRESSIBILITE..... 13
I.7.7 NON-TOXIQUE..... 13
I.7.8 RENOUVELABLE..... 13
I.7.9 ESTHETIQUEMENT AGREABLE..... 14
I.7.10 RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT..... 14
I.8 PROPRIETES THERMOMECANIQUES DU LIEGE..... 14

I.8.1 PROPRIETES MECANIQUES 14
I.8.2 PROPRIETES THERMIQUES 15
I.9 PROPRIETES DE SORPTION ET REACTIVITE DU LIEGE 15
I.10 CONCLUSION 16

CHAPITRE II : TRANSPORT DANS LES MILIEUX POREUX 17
II.1 INTRODUCTION 17
II.2 PARAMETRES INFLUENÇANT LE TRANSFERT MASSIQUE DANS UN MILIEU POREAU 18
II.2.1 POROSITE 18
II.2.2 TORTUOSITE 18
II.2.3 PERMEABILITE 19
II.2.4 VISCOSITE EFFECTIVE 20
II.2.5 CONDUCTIVITE EFFECTIVE 20
II.3 LES PRINCIPES DE LA FLUIDITE 20
II.3.1 A L'ECHELLE MICROSCOPIQUE 20
II.3.2 A L'ECHELLE MACROSCOPIQUE 21
II.4 PROCESSUS DE TRANSFERT DE MATIERE AU SEIN DES SOLIDES 21
II.4.1 TRANSPORT DE GAZ 21
II.5 ETUDE DE L'ISOTHERME D'ADSORPTION 25
II.5.1 MODELE DE LANGMUIR 25
II.5.2 MODELE DE FREUNDLICH 26
II.5.3 ISOTHERMES DE TEMKIN 26
II.5.4 MODELE DE BET (BRUNAUER, EMMETT ET TELLER) 27
II.5.5 MODELE DE DENT 27
II.5.6 MODELE DE HAILWOOD ET HORROBIN 28
II.6 TECHNIQUES ET DISPOSITIFS DE MESURES 28
II.6.1 VAPORIMETRE 28
II.6.2 COULOMETRIQUE 29
II.6.3 COLORIMETRIQUE 29
II.6.4 DOSAGE DU SO2 LIBRE 30
II.6.5 CHIMI-LUMINESCENCE 30
II.6.6 MANOMETRIQUE 30
II.6.7 SPECTROMETRE 31
II.6.8 CELLULE DE WICKE ET KALLENBACH 31
II.6.9 DOUBLE ENCEINTE CLIMATIQUE 31

II.6.10 RESISTANCE ELECTRIQUE 32
II.7 CONCLUSION 33

CHAPITRE III : 18
III.1 INTRODUCTION 34
III.2 DEFINITIONS ET PROPRIETES DES RNA 34
III.2.1 AVANTAGES DES RNA DANS LA MODELISATION ET LA PREDICTION 36
III.2.2 DOMAINE D'UTILISATION DES RNA 37
III.2.3 ARCHITECTURE DU RESEAU 37
III.2.4 TYPES DE RESEAU NEURONAL 38
III.2.5 INDICATEURS DE PERFORMANCE 40
III.2.6 LES FONCTIONS DE TRANSFERT 41
III.3 MODELISATION PAR PLAN D'EXPERIENCES 42
III.3.1 INTRODUCTION 42
III.3.2 LES TECHNIQUES DU PLAN D'EXPERIENCES (DOE) 43
III.3.3 METHODOLOGIE 44
III.3.4 IMPORTANCE PRATIQUE 44
III.3.5 CONCLUSION 45

CHAPITRE IV : MODELISATION ET EXPERIMENTATION 34
IV.1 INTRODUCTION 46
IV.2 DETERMINATION DE L'ISOLATION 47
IV.3 EXPERIMENTATION A LA DETERMINATION DU TRANSFERT 47
IV.3.1 PREPARATION DES ECHANTILLONS 47
IV.3.2 ANALYSE THERMOGRAVIMETRIQUE (TGA) 49
IV.3.3 TRAITEMENT THT ET EBULLITION 50
IV.3.4 CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE 52
IV.3.5 DETERMINATION DU COEFFICIENT DE DIFFUSION MASSIQUE APPARENT (D_{APP}) 55
IV.3.6 CONCLUSION 61

CHAPITRE V: RESULTATS ET DISCUSSION 46
V.1 INTRODUCTION 62
V.2 EXPERIMENTALES 62
V.2.1 ISOLATION SOUS L'EFFET DU TRAITEMENT 62
V.2.2 ISOLATION SOUS L'EFFET DE LA ZONE DE RECOLTE 64

V.2.3 ISOLATION SOUS L'EFFET DE LA DIRECTION DE COUPE 65
V.2.4 VALIDATION DU MODELE 66
V.3 MODELISATION NEURONALE 67
V.3.1 NOMBRE DE COUCHES CACHEES 68
V.3.2 NOMBRE DE NEURONES 68
V.3.3 RESEAU OPTIMAL 70
V.4 APPROCHE DE LA THEORIE DES PLANS D'EXPERIENCES 73
V.4.1 PREMIERE SERIE D'EXPERIENCES 75
V.4.2 DEUXIEME SERIE D'EXPERIENCES 76
V.4.3 TROISIEME SERIE D'EXPERIENCES 77
V.4.4 ANALYSE DE L'IMPACT DE FACTEURS SUR D_{APP} PAR LA METHODE DE PLAN D'EXPERIENCES 79
V.4.5 ANALYSE DE REGRESSION 82
V.5 CONCLUSION 84
CONCLUSION GENERALE 71
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES 88

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le liège, obtenu à partir de l'écorce du chêne-liège, est un matériau naturel qui a été utilisé depuis des siècles pour le matériel de la pêche et l'isolation des habitations. Sa structure unique, composée de cellules très fines, emprisonne l'air (environ 96 % d'air). Cela confère au liège un coefficient de conductivité thermique favorable, ce qui signifie qu'il ralentit la pénétration de la chaleur dans les maisons, surtout pendant les étés chauds. Grâce à sa densité élevée, le liège offre également une capacité de déphasage thermique importante. Il régule la température intérieure, réduisant ainsi la nécessité d'une utilisation excessive de chauffage ou de climatisation [1]. Le liège a des caractéristiques uniques telles que la biodégradation, contrairement à d'autres matériaux polymères (polystyrène et PVC). Sa stabilité dans le temps lui confère une durée de vie illimitée.il est possède une parfaite isolation phonique. Il réduit la transmission des bruits, Utilisé dans les murs, les sols et les plafonds, il crée un environnement intérieur plus calme et confortable. Grace à sa Polyvalence, Le liège peut être utilisé sous différentes formes : panneaux, granulés, dalles, rouleaux. Il s'applique sur les façades, les murs, les sols, les toitures, et même dans les combles. Le liège est un choix écologique, durable et performant pour l'isolation de nos habitations. L'utilisation étendue du liège a ouvert de nouvelles perspectives pour les chercheurs, les incitants à approfondir leurs études afin de mieux comprendre et améliorer les caractéristiques de ce matériau polyvalent.

Notre contribution s'appuie sur l'amélioration de l'isolation massique par des expériences menées dans plusieurs laboratoires de mécanique et d'environnement, au LME Médéa, CRAPSI de Bousmail-Alger, Polytechnique Bordj el Bahri école militaire et au Laboratoire de mécanique et physique de l'Université de Boumerdes. Les échantillons de liège étudié provenant de trois zones géographiques en Algérie (Médéa, Jijel et Skikda). Ces échantillons ont été coupés selon trois orientations : radiale, longitudinale et tangentielle. De plus, nous étudions à la fois des échantillons de liège à l'état naturelle et traité.

Dans ce travail de thèse, nous concentrons sur l'estimation de la qualité d'isolation massique du liège, en utilisant deux approches complémentaires :

- Les réseaux de neurones artificiels (ANN) : La base de données expérimentale obtenue est utilisée dans notre réseau de neurones artificiel (MLP) dans le but de

prédire la diffusivité massique du liège en fonction de plusieurs paramètres (nature, zone, direction de coupe).

- Le plan d'expérience : Les plans d'expériences permettent de dégager l'influence de chaque paramètre sur la qualité d'isolation du liège tel que la nature, la zone et la direction de coupe. Ils nous aident à obtenir des conclusions tout en minimisant les coûts d'expérimentation et donner les paramètres les plus dominants dans l'isolation.

Les résultats obtenus pourraient avoir des implications importantes dans des domaines tels que l'isolation thermique, les bouchons, les dalles antivibratoires…

Cette thèse est conçue pour explorer de manière approfondie les différents aspects de notre problématique. Dans le chapitre 1, nous présentons un état de l'art exhaustif sur les propriétés et les applications du liège. Le chapitre deux se base sur le transport dans les milieux poreux, en examinant en particulier les phénomènes de transport qui influencent le comportement mécanique du liège.

Dans le chapitre trois, nous introduisons les concepts fondamentaux des réseaux de neurones artificiels et des plans d'expérience, démontrant leur potentiel pour modéliser et prédire le comportement complexe des matériaux comme le liège, de plus se donner l'effet de chaque paramètre sur la qualité d'isolation. Le chapitre quatre décrit en détail la partie expérimentale de notre étude, en mettant l'accent sur les procédés écologiques de traitement du liège et sur la méthodologie utilisée pour calculer la diffusivité massique, un paramètre clé pour évaluer son comportement mécanique.

Les résultats obtenus avec leurs discussions qui en découlent sont présentés dans le chapitre cinq, où nous confrontons les données expérimentales aux modèles développés à l'aide des approches combinées de réseaux de neurones et de plans d'expérience. Enfin, nous concluons cette thèse en résumant nos principales découvertes, en soulignant leurs implications pratiques et théoriques, et en identifiant les perspectives de recherche futures.

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

I.1 Introduction

Le liège est un matériau cellulaire dérivé de l'écorce du chêne-liège, provient exclusivement de cet arbre, le seul capable de produire des quantités exploitables de suber. Le suber, tissu végétal, joue un rôle essentiel en protégeant l'arbre contre les insectes, le froid, les intempéries et même les incendies, tout en lui permettant de respirer. Le liège, doté de propriétés remarquables, est flexible, antistatique, et composé à plus de 50 % d'air, conférant ainsi une faible densité et d'excellentes capacités d'isolation thermique, acoustique et vibratoire [1].

Depuis l'Antiquité, le liège est utilisé de manière variée, contribuant à la fabrication d'une multitude d'objets. À travers les siècles, l'industrie du liège a perfectionné des processus et méthodologies, stimulant l'innovation dans l'utilisation de ce matériau. Dans les années 1950, une entreprise américaine a introduit les premières dalles de liège pour revêtir les sols [1]. Par ailleurs, l'apparition du liège aggloméré à la fin du XIXe siècle a permis de valoriser les déchets de l'industrie du liège, ouvrant la voie à de nouvelles applications (plaques, panneaux, etc.) en plus des usages traditionnels tels que les bouchons.

I.2 Forêts de chêne liège

Les subéraies, qui sont des forêts de chêne liège, se situent à des altitudes en dessous de 500 mètres, dans des régions caractérisées par un climat chaud et humide. Le chêne liège est cultivé principalement dans le bassin méditerranéen, en particulier dans les zones du sud-ouest de la péninsule ibérique qui sont influencées par l'océan Atlantique. À l'échelle mondiale, les subéraies s'étendent sur environ 2,28 millions d'hectares, répartis dans quelques pays (Tableau I.1).

Le Portugal domine la production mondiale de liège [2], représentant environ 50 % , Par contre l'Algérie produit seulement 9915 tonnes, équivalant à 4,9 % de la production mondiale

Tableau I.1 Répartition du chêne liège dans le monde et quantités de liège produite [2]

Payer	Superficie [km]	Pourcentage [%]	La production annuelle [tonne]	Pourcentage [%]
Portugal	736.000	32,5	100.000	49.6
Espagne	501.000	22,1	61.504	30.5
Algérie	410.000	18,1	9.915	4.9
Maroc	277.000	12,2	11.686	5.8
Italie	151.000	6,7	6.161	3.1
France	100.000	4,4	5200	2.6
Tunisie	90.000	4,0	6.962	3.5
Total	2.265.000	100	201.428	100

Le chêne-liège a la capacité unique de renouveler son écorce après la récolte, ce qui lui permet de produire une épaisseur de liège adaptée à l'usage industriel. Le chêne-liège est récolté tous les neuf ans, le premier écorçage, appelé démasclage, ayant lieu lorsque l'arbre est âgé de 25 à 30 ans [3]. Le liège issu de la première récolte, appelé liège vierge, présente une structure, une épaisseur et une densité si irrégulières qu'il ne convient pas à la fabrication de bouchons. Ce n'est qu'à partir de la troisième récolte que l'écorce atteint une qualité suffisante pour être utilisée dans la fabrication des bouchons. Un seul arbre peut donc produire du liège pendant plus de 150 ans, avec environ 16 récoltes, fournissant une quantité et une qualité de liège suffisantes pour l'industrie du liège. La présence de lenticelles, qui constituent la macroporosité du matériau, est un paramètre essentiel pour l'évaluation de la performance du liège. Lorsqu'il y a moins de lenticelles en surface, cela indique un liège de haute qualité.

I.3 Types de liège

I.3.1 Liège mâle

Le liège mâle, également appelé liège primaire ou liège vierge, est l'écorce qui se forme lorsque le chêne-liège est récolté pour la première fois [4,5]. Il se développe lorsque l'arbre est âgé de 25 à 30 ans. Le liège mâle présente une Structure irrégulière (épaisseurs et densités irrégulières), les cellules du liège sont plus grandes et moins organisées leur donnant un aspect moins uniforme. Leurs caractéristiques sont laissés moins utiliser par rapport à l’autre qualité.

I.3.2 Liège femelle

Le liège de reproduction, également appelé liège secondaire ou liège phellodermique [6], se forme après les premières récoltes de liège mâle. Il se développe sur la surface interne de l'écorce et remplace le liège mâle récolté. Le liège de reproduction présente des caractéristiques distinctes :

- Structure plus régulière : il a une structure plus régulière et mieux organisée que le liège mâle.
- Les cellules du liège sont plus petites et plus uniformes, formant une structure en nid d'abeille dans le plan radial.

En raison de sa structure plus régulière et de sa densité plus uniforme, le liège de reproduction est utilisé pour la production de bouchons de qualité supérieure. Il offre une meilleure étanchéité et une plus grande résistance à l'oxydation, garantissant la conservation des boissons. Il est important de noter que le liège de reproduction se régénère également après chaque récolte, ce qui permet d'utiliser le chêne-liège de manière continue pendant des décennies.

I.4 Structure

L'écorce de chêne-liège (Quercus suber L.), que l'on appelle liège, se compose de cellules inertes produites par le phellogène (Figure I.1). Ce tissu sert de bouclier protecteur entre les cellules vivantes de l'arbre et l'environnement extérieur, offrant une défense contre diverses menaces telles que les incendies [7] De plus, le liège naturel est pourvu de canaux cylindriques connus sous le nom de lenticelles, qui facilitent les échanges gazeux avec l'intérieur de l'arbre, garantissant ainsi la vitalité et le renouvellement des cellules [8].

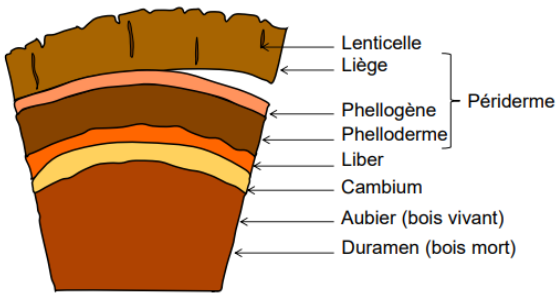


Figure I.1: section axiale du tronc d'un chêne-liège (Quercus suber L) [9].

Robert Hooke [9] fut le premier à examiner la structure du liège au microscope, ce qui conduisit à la découverte des "cellules" comme unité biologique fondamentale de tous les organismes vivants. Plus tard, Gibson et ses collègues [10] détaillèrent la morphologie de ces cellules dans les trois dimensions du liège : axiale, radiale et tangentielle (Figure I.2).

Les cellules du liège présentent une forme hexagonale et s'agencent en motif hexagonal dans le plan radial. En revanche, dans les plans axial et tangentiel, elles adoptent une forme plus parallélépipédique (similaire à des briques), avec des courbures le long de la direction tangentielle. Le liège est classé comme un matériau isotrope, signifiant qu'il possède des caractéristiques physiques similaires dans les deux orientations.

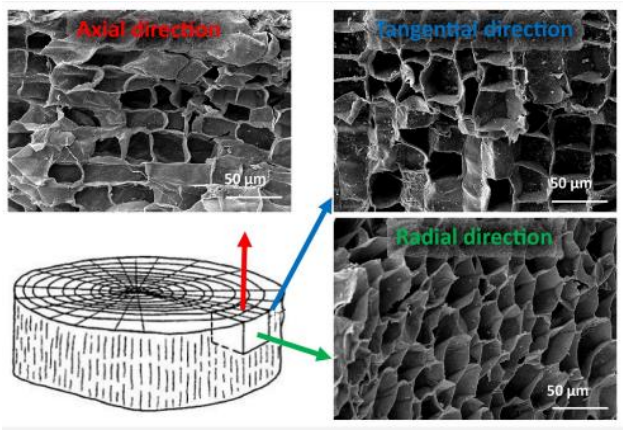


Figure I.2: Morphologie des cellules du liège dans les directions de croissance correspondantes par rapport au tronc de liège [10].

La littérature offre une description détaillée de la taille et de la configuration des cellules de liège [10]. La communication entre les cellules vivantes s'effectue par le biais des plasmodesmes, de minuscules canaux d'environ quelques centaines de nanomètres de diamètre qui traversent les parois cellulaires. Lorsque les cellules meurent, comme c'est le cas pour le liège, ces canaux se trouvent obstrués en raison de l'accumulation de subérine, ce qui entrave tout échange entre les cellules.

I.5 Structure cellulaire du liège

La tomographie à rayons X permettra d'étudier la structure 3D du liège à l'échelle cellulaire. À l'échelle nanométrique, les caractéristiques structurelles des plasmodesmes qui traversent les parois cellulaires ont été étudiées par La tomographie électronique en transmission MET. Les plasmodesmes, qui sont des canaux nanométriques ouverts permettant les échanges entre les cellules vivantes, L'utilisation de la tomographie pourrait permettre de

révéler l'ultrastructure des plasmodesmes avec une meilleure résolution 3D. Cela constitue une base pour le développement de modèles structurels plus précis afin d'établir des relations avec les propriétés fonctionnelles du liège [3].

La répartition de ces composés au sein des parois cellulaires [11] a fait l'objet de plusieurs descriptions dans la littérature [12,13,14]. Les parois cellulaires se composent de différentes couches :

- Lamelle moyenne, principalement constituée de lignine.
- Paroi primaire, fine mais riche en lignine et contenant également des polyosides, contribue à renforcer la structure de la cellule.
- Paroi secondaire, plus épaisse, se compose de subérine et de cire disposée en couches alternées.
- Paroi tertiaire est principalement constituée de polyosides (Figure I.3).

Cependant, selon l'étude de Pereira [15], il est suggéré que la paroi secondaire ne se compose pas exclusivement de subérine et de cires, mais qu'elle peut également contenir de la lignine [16].

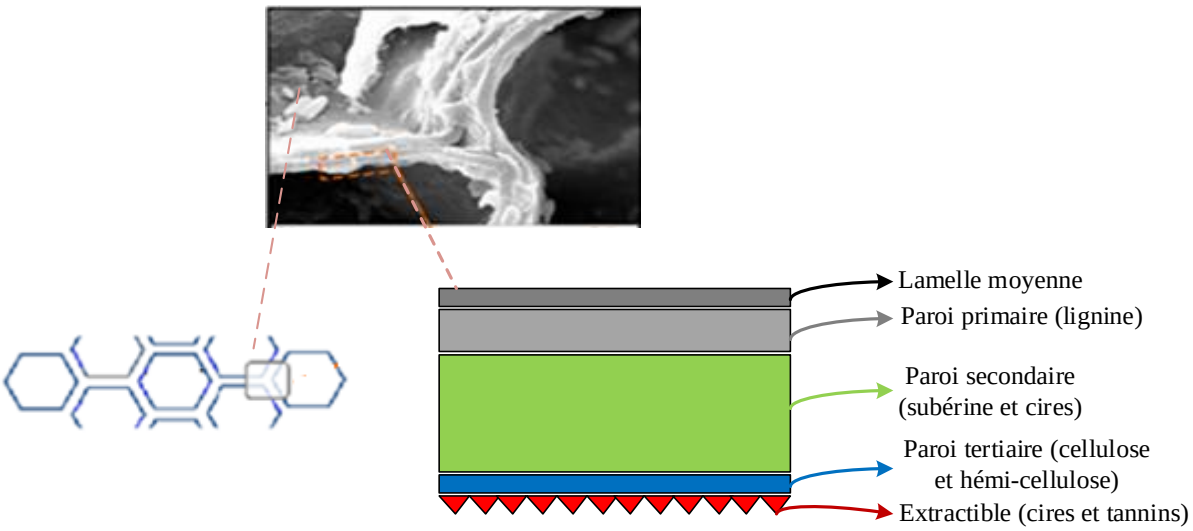


Figure I.3: Organisation des différents polymères dans les parois des cellules de liège.

La quantité de tous ces éléments varie en fonction de divers facteurs tels que l'âge de l'arbre, la région de croissance (Tableau I.2).

Tableau I.2 : Proportion des constituants chimiques dans le liège en pourcentage de masse.

	Références	[16]	[17]	[18]	[19]
Liège vierge Composition (%)	Subérine	45	45	38,6	
	Lignine	27	21	21,7	
	Polyosides (cellulose et hemicellulose)	12	13	18,2	
	Extractibles (cires et tannins)	10	19	15,3	
	Cendres (calcium, magnésium...)	5	1,2	0,7	
Liège de reproduction Composition (%)	Subérine	48	50	33,5	37
	Lignine	29	19	26	14,8
	Polyosides (cellulose et hemicellulose)	12	13	26	6
	Extractibles (cires et tannins)	8,5	15	13	15,8
	Cendres 0,85-3	2,1	3	2,5	-

I.5.1 Subérine

C’est une macromolécule de nature aliphatique. C'est un composant structurel de la paroi cellulaire et son élimination détruit l'intégrité de la cellule [20]. La subérine est polymérique et contient deux types de monomères, le glycérol et les acides gras et alcools à longue chaîne, liés par des alcools à longue chaîne, qui sont liés par des liaisons ester entre les groupes hydroxyles et carboxyliques. La composition monomérique de la subérine de liège est bien établie. Le tableau I.3 présente les principaux monomères subériniques et leurs proportions moyennes, en masse du total des produits solubilisés [21] et en pourcentages molaires des composés identifiés [19]. Plusieurs études décrivent la composition monomérique de la subérine [22,8].

Le glycérol est le monomère le plus important dans le liège [23], représentant 40,8% des molécules libérées par la méthanolyse (14,2% de la masse des produits solubilisés). Le tableau I.3 regroupe tout le composant monomérique de la subérine.

Les conditions expérimentales jouent certainement un rôle important dans ces quantifications. Il est clair que la subérine est un polyester glyderidique avec le glycérol comme pont entre ses unités monomériques à longue chaîne.

Tableau I.3 : les principaux monomères subériniques et leurs proportions moyennes.

Classes et composés chimiques	Masse (g)	Pourcentage %
Glycerol	4.2	40.8
1-Alkanols	1.1	0.8
Alkanoic acids	1.1	0.7
Saturated diacids	8. 7	6.7
Hexadecanedioic acid	2. 0	1.8
Octadecanedioic acid	0.5	0.4
Eicosanedioic acid	1.0	0.8
Docosanedioic acid	4.5	3.2
Tetracosanedioic acid	0.7	0.5
Substituted diacids	36.8	29.7
9-octadecenedioic acid	6.2	5.3
9-epoxioctadecanedioic acid	22.9	18.5
9,10-dihydroxyoctadecanedioic acid	7.7	5.9
Saturated ω-hydroxyacids	11.4	8.6
16-hydroxyhexadecanoic acid	0.4	0.4
18-hydroxyoctadecanoic acid	0.1	0.1
20-hydroxyeicodecanoic acid	0.5	0.4
22-hydroxydocosanoic acid	7.9	5.9
24-hydroxytetracosanoic acid	2.4	1.7
26-hydroxyhexacosanoic acid	0.1	0.1
Substituted ω-hydroxyacids	14.9	12.4
18-hydroxy-9-octadecenoic acid	5.4	4.7
9-epoxi-18-hydroxyoctadecanoic acid	7.3	6.0
9,10,18-trihydroxyoctadecanoic acid	2.2	1.7
Ferulic acid	0.5	0.6
Others and unidentified*		12.0
Total	100	100
* Unidentified compounds represented 10.0%		

I.5.2 Lignine

Lignine est le deuxième composant structurel le plus important de la paroi cellulaire du liège. Contrairement à la subérine, la lignine n'est pas spécifique au liège et présente dans la plupart des tissus cellulaires secondaires des plantes [20]. Elle est étudiée depuis de nombreuses décennies en raison de son importance dans la fabrication de la pâte à papier, Elle est de nature aromatique. Il s'agit d'un polymère composé de trois types de monomères phénylpropane (alcools p-coumarylique, conifférylique et sinapylique) (figure I.4)**.** Les proportions spécifiques des monomères et des liaisons intermonomériques dépendent du matériau.

La présence de lignine dans le liège a été démontrée pour la première fois par Marques et al [20]. Qui ont isolé et caractérisé une lignine de liège broyé, en montrant qu'elle remplit les conditions chimiques de ce qui est considéré comme de la lignine [24]. La lignine de liège a une composition monomérique de 95% d'unités guaiacyl (G), 3% d'unités syringyl (S) et 2% d'unités 4-hydroxyphényle (H), avec une teneur en méthoxyles de 14% [24].

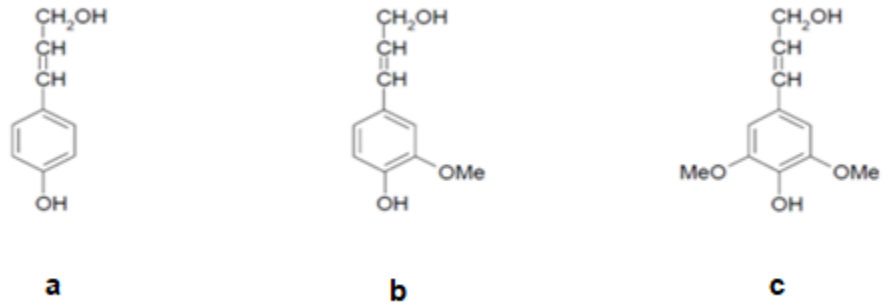


Figure I.4: les types monomériques de la lignine : a) Alcool p-coumarylique ; b) Alcool conifér ylique ; c) Alcool sinapylique.

I.5.3 Polyosides

Ils constituent environ 20 % de la composition chimique du liège en termes de masse [25, 26,27]. Le tableau I.4 montre les déférents constituants des polyosides :

Tableau I.4 : Les composants des polyosides.

	Composition
Cellulose (homopolymer) 50% de polyosides	Unités de β-glucose
Hemicellulose (hétéropolymere)	Unités d'oses : l'arabinose, le xylose, le glucose de type A, B1, B2

Les trois composants fondamentaux du liège sont étroitement interconnectés, créant ainsi ce que l'on nomme la matrice lignocellulosique. Le liège renferme également des composés extractibles qui ne sont pas liés chimiquement aux macromolécules constituant les parois cellulaires. Ces molécules de faible masse moléculaire peuvent être aisément extraites à l'aide de solvants, qu'ils soient polaires ou apolaires [18, 28, 29, 30,31]. On peut classer ces composés phénoliques en deux catégories, à savoir les cires et les tanins, en fonction de leur affinité respective pour les solvants apolaires et polaires (Tableau I.5).

Tableau I.5 : Principaux extractibles retrouvés dans le liège (µg.g^{-1} de liège sec).

Extractibles	Conde [23]	Santos [19]
Acide ellagique	228.4	1246.5
Acide protocatéchique	48.8	79.3
Acide gallique	18.3	736.5
Coniferaldéhyde	11.2	traces
Acide ferulique	10.7	traces
aesculetine	7.5	391.6

I.6 Utilisations du Liège

L'utilisation des matériaux en liège est en pleine mutation, avec un intérêt croissant pour ses caractéristiques écologiques [32], sa polyvalence et ses performances. De nouvelles applications ont vu le jour, tandis que des secteurs industriels traditionnels redécouvrent les avantages du liège. Nous explorerons certaines des applications les plus récentes et prometteuses des matériaux en liège, mettant en évidence leur pertinence dans un contexte moderne.

Tableau I.6 : Les différents domaines d'utilisation du liège.

Domaines	Description	caractéristiques	Réf
Industrie chimique, pharmaceutique et parfumerie	Boisson, pharmacie, bouteilles d'huile, tonneaux. conditionnement des produits	Isolation massique	[32]
Construction	isolation d'espaces restreints, isolation thermique phonique.	Produit abrasif, encombrement réduit, pouvoir retardant.	[33,34 ,35,36]
Construction navale	isolation, revêtement, habillage, coque de bateaux, Circuits de calorifugeage.	Isolation thermique, imputrescible, antidérapante.	[37]
Aérospatiale	Inferieur à 15mm d'épaisseur.	Écran thermique	[38,39]

Mécanique	joints d'étanchéité…	Flottabilité, résistances aux agents chimiques, compressibilité.	[40,41]
Nucléique	Capsule à isotope radioactif	Doublage contre feu et choc.	
Loisirs	Balles, jeu de fléchettes, flotteurs (pêche), bourres pour cartouches de chasse. les balles de baby-foot.	Elasticité.	[42,43]
Médical	Limitation des métaux lourds, fabrication de semelles orthopédiques, antimicrobiennes et hypoallergéniques.	Compressibilité.	

I.7 Propriétés physiques du liège

I.7.1 Légèreté

Le liège est un matériau léger en raison de sa faible densité. Le liège à une densité de 240 kg/m^3 à 400 kg/m^3, soit environ un quart du poids d'un volume équivalent 1L d'eau [44].

I.7.2 Imperméabilité aux liquides et aux gaz

Grâce à l'existence de la subérine dans le liège (l'acides gras plus l'alcool organique lourd) rend le liège imperméable aux liquides et aux gaz [45, 46]. Ce qui en fait l'un des meilleurs joints disponibles. Il présente plus de 39 à 45% de la masse du liège, utilisé pour l'usinage des bouchons.

I.7.3 Résistance à la corrosion biologique

Le liège résiste efficacement à la corrosion biologique grâce à sa teneur en tanin, ainsi qu'aux moisissures et aux champignons. Sa surface et sa structure ne favorisent pas la croissance des moisissures et ne créent pas un environnement propice à leur développement [47].

I.7.4 Propriétés acoustiques et anti-vibration

Le liège a une capacité d'absorption acoustique remarquable. Dans la gamme de fréquences de 400 à 4000 Hz, il peut absorber 30 à 70 % du son [48]. Sa structure flexible lui permet de réduire à la fois les bruits aériens et les bruits d'impact, tout en éliminant les zones de transmission du son [49].

I.7.5 Inflammabilité

Il est réputé pour sa résistance au feu en raison de sa forte inertie thermique. Contrairement à d'autres matériaux, il ne propage pas les flammes et ne dégage pas de gaz toxiques lorsqu'il brûle [50]. Cette propriété est due à la structure du liège : les éléments gazeux qu'il contient sont enfermés dans de minuscules compartiments imperméables, isolés les uns des autres. Le liège constitue ainsi une barrière naturelle contre le feu, ce qui en fait un choix sûr pour toute une série d'applications.

I.7.6 Flexibilité et compressibilité

Lorsqu'il est soumis à des forces élevées, le gaz contenu dans les cellules est comprimé, entraînant une diminution de sa structure en volume. Cependant, dès que la pression est relâchée, le liège retrouve instantanément sa forme et son volume d'origine, sans laisser apparaître de trace de déformation significative [51]. Il est naturellement résistant à l'eau et à l'humidité [52]. Le liège peut absorber jusqu'à 40 % de son poids en eau sans perdre ses propriétés isolantes [44].

I.7.7 Non-toxique

Il est un matériau naturel exempt de produits chimiques nocifs, ce qui en fait un choix sûr pour une utilisation dans les produits alimentaires et les boissons. L'autorité européenne de sécurité des aliments a approuvé l'utilisation du liège comme matériau en contact avec les aliments.

I.7.8 Renouvelable

C'est une ressource renouvelable qui est récoltée sur les chênes-lièges sans nuire à l'arbre. Selon le fonds mondial pour la nature, les chênes lièges peuvent vivre jusqu'à 300 ans et sont récoltés tous les 9 à 12 ans [44].

I.7.9 Esthétiquement agréable

Le liège a une texture et un aspect uniques qui sont souvent utilisés dans des applications de design et de mode. Le liège peut être teint, imprimé ou gaufré pour créer une variété de textures et de motifs.

I.7.10 Respect de l'environnement

Le liège est un matériau respectueux de l'environnement car il provient d'arbres qui guérissent d'eux-mêmes. Contrairement à d'autres matériaux, la récolte et l'utilisation du liège ne nuisent pas à la santé des forêts. L'écorce du chêne-liège se régénère naturellement, ce qui en fait un choix durable et écologique.

I.8 Propriétés thermomécaniques du liège

I.8.1 Propriétés mécaniques

Le liège, en tant que matériau, Lorsqu'il est soumis à des forces externes révèle des propriétés mécaniques fascinantes [10, 53] :

Viscoélasticité : Le liège est un matériau viscoélastique, se situant entre les comportements d'un solide élastique idéal et d'un liquide visqueux newtonien. Lorsqu'il subit une déformation en compression, son comportement est similaire à celui des matériaux alvéolaires et du bois [54, 55].

Le tableau I.7 résume certaines valeurs du module de Young en compression et en traction, dans les directions radiales (R) et non radiales (NR). De plus, la déformation à la rupture en traction est également prise en compte dans différentes conditions.

Tableau I.7 : Propriétés mécaniques générales de liège [56].

Propriétés	Valeur
Module en compression, liège naturel, non bouillie [MPa]	8–20 (R) 13–15 (NR)
Module en compression, bouilli [MPa]	6 (R) 8–9 (NR)
Module en compression à 100°C, 28 jours [MPa]	11(R) 11 (NR)
Module en compression, à 150°C, 28 jours [MPa]	15 (R) 14 (NR)
Module en traction [MPa]	38 (R) 24-26 (NR)
Déformation à la rupture en traction (%)	5 (R) 9 (NR)

R : direction radiale ; NR : direction non radiale

I.8.2 Propriétés thermiques

Bien que leur importance soit incontestable dans de nombreuses applications, les propriétés physiques du liège [57], à l'exception de ses propriétés mécaniques, ont été peu étudiées. Sa structure cellulaire, qui est similaire à celle des mousses cellulaires, lui confère d'excellentes propriétés en tant qu'isolant thermique. Le liège est un matériau alvéolaire qui contient environ 80 % d'air, qui lui permette de minimiser les phénomènes de transfert. La conductivité thermique du liège est compétitive à d'autres isolants (Tableau I.8) [17,58].

Tableau I.8 : Comparaison des densités et des conductivités thermiques de divers isolants, y compris le liège.

Matériau	Densité $Kg.m^{-3}$	Conductivité thermique $w.m^{-1}.K^{-1}$
Liège	120 – 240	0,040 – 0,045
Liège aggloméré expansé	100 – 120	0,035 – 0,070
Mousse de polyuréthane	20	0,025
Mousse de polystyrène	25	0,040
Laine de verre	25 –30	0,030 – 0,045
Air	1,17 (25°C, HR=50%)	0,025

I.9 Propriétés de sorption et réactivité du liège

Les propriétés de sorption d'un matériau décrivent sa capacité à adsorber, absorbé et désorber des molécules en phase gazeuse ou liquide. L'adsorption implique une interaction entre les molécules adsorbables et la surface du matériau, appelé adsorbant, conduisant à la formation de la phase adsorbée, appelée adsorbat. Deux mécanismes d'adsorption sont courants : la physisorption, un phénomène réversible, qui implique des interactions de faible énergie (< 100 $kJ.mol^{-1}$), telles que les forces de Van der Waals ou électrostatiques, avec des sites d'adsorption spécifiques ou non spécifiques ; la chimisorption, un phénomène irréversible caractérisé par la formation de liaisons covalentes entre l'adsorbat et l'adsorbant, nécessitant une énergie plus élevée (entre 100 et 400 $kJ.mol^{-1}$) et se produisant généralement avec des sites spécifiques, avec une cinétique de formation plus lente.

L'absorption se réfère au processus où les molécules d'adsorbat pénètrent dans la structure du solide au lieu de rester en surface. Ce processus peut également impliquer des liaisons de faible ou de forte énergie entre le matériau et les molécules gazeuses. Enfin, la

désorption se produit lorsque les molécules adsorbées sont libérées du solide. Cette section examinera les capacités de sorption du liège [59] en fonction de ses applications, que ce soit en tant qu'obturateur pour les molécules gazeuses ou en tant que matériau dépolluant pour la sorption de métaux lourds et d'autres polluants.

I.10 Conclusion

En résumé de cette exploration des références concernant le matériau de liège, il est manifeste que cette ressource naturelle a continué à susciter un vif intérêt au fil des ans, attirant l'attention de chercheurs et d'experts. L'examen des travaux consultés met en évidence la progression des connaissances relatives au liège, depuis son utilisation ancestrale jusqu'à ses applications contemporaines. Les sources analysées ont permis de mettre en avant les propriétés exceptionnelles de ce matériau, ainsi que les avancées continues dans la compréhension de ses caractéristiques physiques, chimiques et environnementales.

La diversité des références souligne la variété des domaines d'application du liège, allant des pratiques conventionnelles, comme la fabrication de bouchons, aux applications contemporaines, telles que les revêtements de sol innovants et les matériaux agglomérés. En explorant ces sources, on a pu apprécier la polyvalence du liège, sa durabilité et son potentiel pour relever les défis actuels, confirmant ainsi sa position en tant que matériau exceptionnel à la croisée de la tradition et de l'innovation. Ce recueil de références constitue une mine d'informations précieuse pour tous ceux désireux d'approfondir leur compréhension du liège et d'explorer les multiples perspectives fascinantes qu'il offre.

Chapitre II

Transport dans les milieux poreux

II.1 Introduction

Le phénomène de transport dans le liège est un domaine d'étude important pour comprendre les propriétés et les performances de ce matériau unique. Le liège est principalement constitué de cellules végétales mortes, connues sous le nom de cellules subéreuses, qui ont une structure cellulaire complexe avec des parois riches en subérine.

Le transport dans le liège peut s'effectuer par plusieurs mécanismes, notamment la diffusion de l'humidité, des gaz et d'autres composés chimiques à travers les pores et les canaux présents dans la structure cellulaire. La présence de subérine dans les parois cellulaires confère au liège une faible perméabilité, ce qui en fait un excellent matériau d'isolation thermique et acoustique.

L'humidité est l'une des substances les plus importantes à prendre en compte lors du transport du liège, car elle peut affecter ses propriétés physiques et mécaniques. Le liège a la capacité d'absorber et de libérer l'humidité de l'environnement, ce qui le rend résistant à la pourriture et aux moisissures. La diffusion de l'humidité à travers les parois cellulaires du liège dépend d'un certain nombre de facteurs, tels que la pression de la vapeur d'eau, la température, l'épaisseur des parois et la présence de substances hydrophobes.

Outre l'humidité, le liège peut également être soumis à la diffusion de gaz tels que l'oxygène et le dioxyde de carbone. Ces processus de diffusion sont influencés par la structure poreuse du liège, qui comprend des canaux intercellulaires et des espaces vides. La taille, la distribution et la connectivité des pores jouent un rôle clé dans le transport des gaz à travers le matériau.

La modélisation mathématique et la simulation numérique sont des outils importants pour étudier les phénomènes de transport dans le liège. Ces approches permettent de comprendre les mécanismes de diffusion, d'estimer les coefficients de diffusion et de prédire les profils de concentration et d'humidité dans le matériau. Les résultats de ces études peuvent être utilisés pour optimiser les propriétés du liège, améliorer sa durabilité et développer de nouvelles applications dans des domaines tels que la construction, l'emballage et l'isolation.

Le phénomène de transport dans le liège est un domaine d'étude fascinant qui contribue à notre compréhension des propriétés et des performances de ce matériau naturel. La diffusion de l'humidité et des gaz à travers les structures cellulaires et les pores du liège joue un rôle essentiel dans ses caractéristiques uniques. Dans ce chapitre on va voir la

modélisation mathématique et le phénomène de transport dans le matériau de liège en prend en considération tous les substances transférer tel que l'humidité, le gaz et l'oxygène.

II.2 Paramètres influençant le transfert massique dans un milieu poreau

II.2.1 Porosité

Dans le contexte d'un milieu poreux, la porosité fait référence à la proportion d'espace poreux, c'est-à-dire les petits espaces ou cavités présents entre les particules qui composent le matériau. Ces pores peuvent être interconnectés ou isolés. La porosité est un paramètre important pour caractériser la capacité d'un matériau à stocker ou à transporter des fluides, car elle influence la perméabilité, la capacité de rétention d'eau, les échanges gazeux et d'autres processus de transfert. La porosité peut varier en fonction de la structure et de la composition du matériau, ainsi que des conditions environnementales. Par exemple, dans le domaine géologique, la porosité est utilisée pour évaluer la capacité d'un réservoir de pétrole ou de gaz à stocker et à permettre le mouvement des hydrocarbures. Dans le domaine des matériaux, la porosité peut être mesurée et contrôlée afin d'optimiser les propriétés d'isolation, d'absorption ou de filtration d'un matériau [60].

Il existe différentes méthodes pour mesurer la porosité, notamment des techniques de laboratoire telles que la porosimétrie au mercure, la tomographie à rayons X, la méthode de saturation en eau …etc. [60] La porosité peut également être estimée à partir de données géophysiques ou d'observations visuelles.

II.2.2 Tortuosité

La tortuosité est une mesure de la déviation du chemin suivi par un fluide à travers un milieu poreux par rapport à une ligne droite Figure (II.1) [60]. Elle est utilisée pour décrire l'effet de la structure poreuse sur le déplacement des fluides. La tortuosité est généralement causée par la présence d'obstacles, de courbes ou de chemins sinueux dans le milieu poreux.

On a donc :

$$T = \frac{L}{L'} \qquad \text{II.1}$$

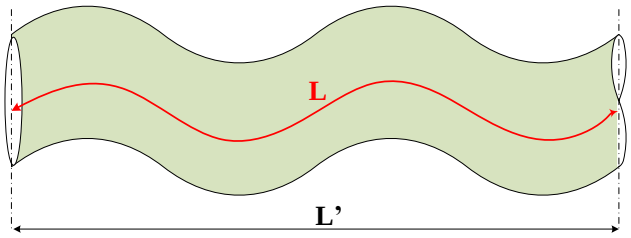


Figure II.1: Représentation de la tortuosité.

II.2.3 Perméabilité

La perméabilité est une propriété physique des milieux poreux qui mesure leur capacité à laisser passer les fluides. Elle représente la facilité avec laquelle un fluide peut se déplacer à travers un matériau poreux. Plus précisément, la perméabilité mesure la vitesse de débit d'un fluide à travers un échantillon de matériau sous un gradient de pression donné.

La perméabilité est exprimée en unités de longueur carrée,. Un matériau poreux ayant une perméabilité élevée permettra un écoulement plus facile du fluide, tandis qu'un matériau avec une perméabilité faible présentera une résistance plus importante au débit.

$$Q = k.A.\frac{\Delta P}{\rho g L} + k.A\ \frac{\Delta P}{\mu_f L} \qquad \text{II.2}$$

Avec : A la surface du milieu poreux

- L désigne la chute de pression linéaire à travers le milieu poreux.
- Q indique le flux volumétrique du fluide en circulation.
- K fait référence à la perméabilité intrinsèque du milieu, tandis que k représente le coefficient de perméabilité.

La perméabilité dépend de plusieurs paramètres, tels que la taille et la connectivité des pores, la viscosité du fluide, la porosité du matériau et la tortuosité des voies de transport. Elle joue un rôle crucial dans de nombreux domaines, notamment en géologie (étude des réservoirs pétroliers et aquifères), en génie civil (conception des systèmes de drainage) et en génie des matériaux (filtration, diffusion).

Il est nécessaire de noter que la perméabilité peut varier en fonction des conditions de l'écoulement, telles que la pression, la saturation du fluide et la composition chimique. Des

tests de perméabilité sont généralement réalisés en laboratoire à l'aide d'appareils spécifiques pour mesurer le débit du fluide à travers un échantillon poreux.

II.2.4 Viscosité effective

La viscosité effective est une mesure de la viscosité perçue par un fluide lorsqu'il s'écoule à travers une substance poreuse. Elle est influencée à la fois par la viscosité du fluide et par la porosité du milieu, ainsi que d'autres caractéristiques du matériau poreux. Différentes approches sont utilisées pour estimer la viscosité effective en fonction des propriétés spécifiques du milieu poreux étudié [60].

II.2.5 Conductivité effective

La conductivité effective est une mesure de la conductivité thermique ou électrique apparente d'un matériau composite. Elle tient compte de la composition, de la distribution des phases et des interactions aux interfaces, et diffère généralement de la moyenne pondérée des conductivités des phases individuelles. La conductivité effective est la somme des conductivités thermiques statiques et la conductivité thermique de dispersion [60].

$$\lambda_{eff} = \lambda_d + \lambda_T \qquad \text{II.3}$$

II.3 Les principes de la fluidité

II.3.1 A l'échelle microscopique

Les équations de Navier-Stokes, dérivées de la relation fondamentale de la dynamique pour de petits volumes de fluide [61], fournissent une explication du mouvement d'un fluide newtonien, en mettant l'accent sur la préservation de la masse et de la quantité de mouvement.

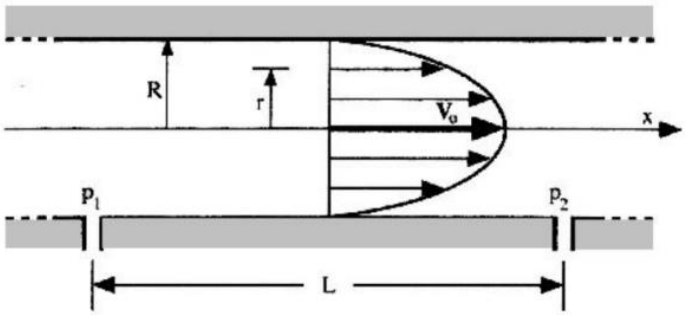


Figure II.2: Flux selon la loi de Poiseuille à travers un cylindre de rayon R, avec une variation de pression P1-P2 [61].

II.3.2 A l'échelle macroscopique

À l'échelle macroscopique, les lois d'écoulement définissent les comportements fluides à grande échelle, offrant des modèles prédictifs essentiels pour diverses situations. Parmi ces lois, l'expression empirique de Darcy joue un rôle central. Énoncée par Darcy en 1856.

$$\vec{q} = -K.\overrightarrow{grad}H \qquad \text{II.4}$$

Cette relation établit un lien entre la vitesse de filtration q, qui mesure le débit du fluide qui traverse un milieu poreux par unité de surface, et le gradient de charge hydraulique (gradH).

La charge hydraulique H combine la hauteur z avec la contribution de la pression P et de la masse volumique du fluide ρ par rapport à l'accélération due à la pesanteur g.

$$H = z + \frac{P}{\rho g} \qquad \text{II.5}$$

La conductivité hydraulique K, une caractéristique du milieu poreux, agit comme un coefficient de proportionnalité, reliant la vitesse de filtration q au gradient de charge gradH. Cette relation fondamentale forme la base de nombreuses études sur les écoulements fluides à grande échelle et continue de guider notre compréhension des phénomènes hydrodynamiques à des niveaux macroscopiques.

II.4 Processus de transfert de matière au sein des solides

II.4.1 Transport de gaz

II.4.1.1 Théorie de l'état de transition

Le docteur Adolf Fick, réalise le transfert de masse suivant le même principe que la loi de Fourier pour la chaleur ou la loi d'Ohm pour l'électricité, a ensuite postulé des lois mathématiques réalise le transfert de masse. Les mécanismes de transfert de matière (gaz) au sein des matériaux poreux tels que le liège se manifestent à travers deux modalités distinctes :

À travers la convection, qu'elle soit naturelle ou provoquée, au sein des pores de grande et moyenne taille formés par les lenticelles et les plasmodesmes [62]. Ces mouvements de matière sont régis par les lois de Darcy et de Knudsen, selon les dimensions des pores.

En parallèle, le transfert peut également s'opérer par diffusion moléculaire à travers les membranes cellulaires [63], obéissant aux principes énoncés dans les lois de Fick. Dans ce contexte, les molécules s'acheminent d'une région de concentration élevée vers une région de concentration plus faible. Toutefois, lorsque le diamètre des pores dépasse significativement la longueur libre moyenne des molécules (Figure II.3), la loi de Darcy prend le pas. Dans cette configuration, les molécules interagissent essentiellement les unes avec les autres, établissant peu de liaisons avec les parois des pores. L'écoulement volumétrique du fluide se propageant à travers le pore peut être défini comme suit :

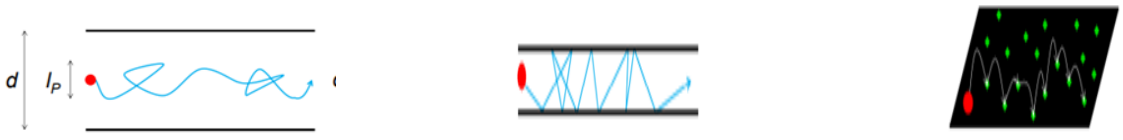
$$Q = \frac{z}{\eta}\frac{\nabla_P}{e}A \qquad \text{II.6}$$

Q, représentatif du débit volumique ($m^3 \cdot s^{-1}$), Δp, décrivant la disparité de pression (Pa),
e, définissant l'épaisseur (m), A, caractérisant la surface (m^2), η (Pa·s) : désignant la viscosité dynamique, Z : servant de coefficient de proportionnalité.

Pour appliquer cette loi il faut être des conditions spécifiques notamment des pores ouverts. Et pour la vapeur condensé la pression partielle doit être élevée. En prenant en compte la densité du fluide exprimée en $kg \cdot m^{-3}$, J : flux massique ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) déterminé selon l'équation suivante :

$$J = -\frac{z}{\eta}\rho\frac{\nabla_P}{e} = -P_D\nabla_P \qquad \text{II.7}$$

Sachant que P_D exprime la perméabilité ($kg.m^{-1}.Pa^{-1}.s^{-1}$), $P_D = \frac{z}{\eta}\rho$



(a) Darcy $d > l_p$ (b) Knudsen $d < l_p$ (c) Fick

Figure II.3 : Modes de transfert de matière au sein d'un matériau poreux ; ou D le diamètre du pore et l_p le parcours moyen de la molécule [62].

Selon Darcy (a) la Convection est spontanée et dans le domaine de Knudsen, la distance moyenne entre les collisions des molécules est supérieure au diamètre des pores.

Ainsi, lors de leur déplacement, les molécules et les parois des pores sont connecté (Figure II.3). Le flux massique se propageant dans ce pore peut être évalué en utilisant l'Équation II.7 :

$$J = -\frac{d}{3}\sqrt{\frac{8M}{\pi RT}}\frac{\nabla_P}{e} = -P_K \nabla_P \qquad \text{II.8}$$

d : diamètre en(m), M : la masse molaire en (g.mol^{-1}), R = 8,314 J.mol^{-1} .K^{-1} : la constante des gaz parfait, T c'est la température (K).

D'après knudsen la perméabilité est définie comme suit :

$$P_K = \frac{d}{3}\sqrt{\frac{8M}{\pi RT}} \qquad \text{en kg.m}^{-1}\text{.pa}^{-1}\text{.s}^{-1} \qquad \text{II.9}$$

En dernier lieu, par l'application de la loi de Fick Quand le diamètre du pore se rapproche de la taille moléculaire. Dans cette configuration, Les molécules parcourent la surface du pore en effectuant des sauts répétés d'un site d'adsorption à un autre, comme le montre la Figure II.3 Dans cette situation, la quantité de matière en diffusion varie directement en fonction du gradient de concentration du gaz au sein du matériau. En présence d'un profil de concentration en adsorbat parfaitement linéaire dans un système en régime stationnaire, la première loi de Fick peut être énoncée de cette façon :

$$J = -D_F M \nabla C = -P_F \nabla_P \qquad \text{II.10}$$

D_F : la constante de diffusion du gaz (m².s^{-1}) et C la concentration de gaz (kg.m^{-3})

P_F : selon fick représente la perméabilité en kg.m^{-1} .Pa^{-1} .s^{-1}

$$P_F = \frac{D_F M}{R\,T} \qquad \text{II.11}$$

Durant une période de transition, qui précède l'établissement du régime stationnaire, c'est la seconde loi de Fick, exprimée au moyen de l'Équation II.11, qui trouve son application :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_F \frac{\partial^2 C}{\partial C^2} \qquad \text{II.12}$$

Dans une étude préalable, Lequin utilise la méthode manométrique pour évaluer le coefficient de diffusion de l'oxygène au sein du matériau de liège [63]. Ils ont adopté

l'hypothèse selon laquelle le transfert de gaz est régi par le modèle de diffusion de Fick. Après avoir vérifié, à l'aide d'une résolution numérique par différences finies de la seconde loi de Fick, trouve que l'état stationnaire est rapidement établi, ils ont développé une approche analytique plus simple basée sur la première loi de Fick, présentée sous la forme de l'Équation II.12.

$$ln\frac{P_i}{P_t} = \propto D_F t \qquad \text{avec} \qquad \propto = \frac{S\Psi}{e\,V} D_F t \; et \qquad \Psi = \frac{C_a}{C_g} \qquad \text{II.13}$$

Où p_i pression initiale et p_t pression au moment t, S représente la superficie de l'échantillon en contact avec le gaz (m^2), e : l'épaisseur en (m), et V est la grandeur qui désigne le volume du récipient renfermant le gaz (mesuré en m^3)

Le facteur Ψ est évalué de manière expérimentale à travers l'utilisation de l'isotherme d'adsorption du gaz examiné, où C_a représente la concentration de gaz adsorbée et C_g symbolise la concentration en état gazeuse.

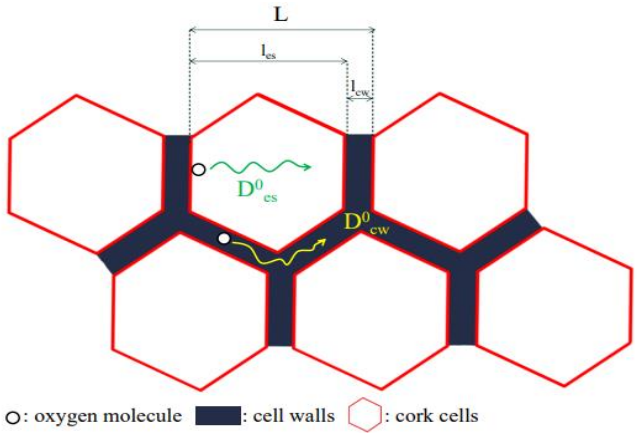


Figure II.4 : le mécanisme de diffusion d'une molécule d'oxygène au travers des cellules de liège [64].

La figure II.4 représente le mécanisme pour la diffusion d'une molécule d'oxygène au travers du liège [64], l'oxygène ne va pas diffuser uniquement dans la parois cellulaire, mais va aussi diffuser en phase gazeuse dans des espaces vides qui peuvent être des cellules ou des lenticelles, la diffusion d'une molécules dans un espace vide est bien évidement plus rapide que dans les parois cellulaires, cependant lorsque le molécule d'oxygène traverse le liège elle va inévitablement rencontrer une parois de cellule. La probabilité qu'une molécule diffuse uniquement dans des lenticelles interconnectées est nulle. Ces deux processus de transfert se

déroulent en série et non en parallèle. L'étape limitant est donc imposée par le processus le plus lent qui est la diffusion de l'oxygène au travers des parois de cellules.

Le liège est un matériau possède une structure hétérogène comprenant des pores spacieux, les lenticelles (dont le diamètre varie entre 200 µm et 1 mm), des interstices formés par les cellules du liège (d'une longueur d'environ 50 µm) ainsi que des parois cellulaires plus denses, épaisses d'environ 1 µm [7]. Ces parois sont constituées de polymères entrelacés tels que la subérine, la lignine, la cellulose et l'hémicellulose, entre lesquels se trouvent des espaces vides de dimensions nanométriques. Les trois modes de transport, régi par les lois de Darcy, Knudsen et Fick, contribuent au transfert de gaz dans le liège. Toutefois, l'étape qui constitue le facteur limitant pour ce transfert n'a pas encore été pleinement identifiée. Les recherches divergent : d'une part, des recherches [7] postulent que l'étape limitante est le transport de l'oxygène à travers les plasmodesmes, en accord avec la loi de Knudsen. D'autre part, Lequin et al. et Liger-Belair et Villaume argumentent que l'étape limitante réside dans le transfert des molécules à travers les parois cellulaires [59,65], en suivant un mécanisme de diffusion conforme à la loi de Fick.

II.5 Etude de l'isotherme d'adsorption

Les isothermes de sorption décrivent la relation entre la quantité de gaz ou d'humidité adsorbée par un matériau et la pression partielle ou l'humidité relative du milieu environnant [66, 67]. Pour les matériaux de liège, plusieurs modèles d'isothermes de sorption ont été proposés pour représenter cette relation. Voici quelques-uns des modèles couramment utilisés :

II.5.1 Modèle de Langmuir

S'applique à la monocouche d'adsorption, signifiant que chaque molécule de colorant occupe un emplacement spécifique et qu'aucune autre molécule ne peut s'adsorber à cet emplacement. De ce fait, toute opportunité d'adsorption additionnelle est exclue de cet emplacement. La configuration du modèle de Langmuir est déterminée par cette description.

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1+K_L C_e} \qquad \text{II.14}$$

L'équation suivante montre La transformation linéaire de ce modèle

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \qquad \text{II.15}$$

Avec : q_m ($mg.g^{-1}$) représente la capacité d'adsorption monocouche, et K_L ($L.mg^{-1}$) exprime la constante de Langmuir, Ce ($mg.L^{-1}$) est le concentration de colorant à l'équilibre dans la solution q_e ($mg{\cdot}g^{-1}$) représente la quantité de colorant adsorbé à l'équilibre sur l'adsorbant.

Les caractéristiques fondamentales de l'isotherme d'adsorption de Langmuir peuvent être exprimées en utilisant le facteur de séparation sans dimension constant ou le paramètre d'équilibre R_L [42], défini de la manière suivante :

$$R_L = \frac{1}{1+K_L.C_0} \qquad \text{II.16}$$

Où C_0 est la concentration du colorant a l'instant t=0. Le type d'isotherme est indiqué par la valeur R_L ; irréversible (R_L=0), favorable (0<R_L<1), linéaire (R_L=1).

II.5.2 Modèle de Freundlich

Si l'adsorption se produit sur des surfaces hétérogènes, le modèle de Freundlich peut être formulé de la manière suivante :

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \qquad \text{II.17}$$

Où K_F est la capacité d'adsorption relative d'adsorbant ($mg.g^{-1}$) ; n : constante sans dimension liée à l'intensité d'adsorption.

La configuration de l'isotherme sera déterminée par la valeur de 1/n, qui caractérise l'intensité d'adsorption et fournit des indications essentielles sur les mécanismes qui gouvernent l'adsorption du composé sur l'adsorbant.

II.5.3 Isothermes de Temkin

En supposant que la diminution de la chaleur de sorption suit une tendance linéaire logarithmique, ce qui est implicite dans l'équation de Freundlich, le modèle de Temkin peut être formulé de la manière suivante :

$$q_e = \frac{RT}{b} Ln(A.C_e) \qquad \text{Avec} \qquad B = \frac{RT}{b} \qquad \text{II.18}$$

R représente la constante des gaz parfaits, A est la constante isotherme de Temkin (exprimée en $L \cdot mg^{-1}$) et B une constante liée à la chaleur d'adsorption de Temkin ($J \cdot mol^{-1}$).

II.5.4 Modèle de BET (Brunauer, Emmett et Teller)

Le BET est l'un des modèles qui largement employés [68] pour définir l'adsorption physique sur des surfaces solides. Il suppose que les molécules adsorbées forment une monocouche sur toute la surface. Cette isotherme est souvent employée pour étudier l'adsorption de l'humidité sur le liège.

Dans la théorie BET, les molécules de gaz se forment sur la surface solide en nombre couches variable sur les sites de sorption, l'équation finale est la suivante :

$$m_n = \frac{w_m.C.h}{1-h} \frac{1-(n+1)h^n+nh^{n+1}}{1+(C-1)h-Ch^{n+1}} \qquad \text{II.19}$$

Dans le cas n = 1 (monocouche de vapeur d'eau), l'équation suivante prédit l'humidité contenue de la première couche de molécules adsorbées sur les sites de sorption.

$$m_1 = \frac{w_m.C.h}{1+Ch} \qquad \text{II.20}$$

Avec: m_n, teneur en humidité fractionnelle de n couches ; h, pression de vapeur relative ; W_m teneur en humidité lorsque la monocouche est pleine ; n, nombre de couches de molécules sur un site de sorption ; C, qui est une constante en relation avec l'énergie d'adsorption.

Au-delà De 50% d'humidité relative le modèle BET ne décrive pas l'isotherme de sorption, et les valeurs divergent de l'expérimentales. Après la première couche d'adsorption qu'avait une forte énergie de liaison, les absorbâts sont considérés comme des molécules d'eau liquide.

II.5.5 Modèle de Dent

Ce modèle est inspiré du modèle BET et porte des modifications à partir de la deuxième couche, une propriété thermodynamique différente des molécules d'eau liquide [69]. Il considère que l'adsorption se fait sur des sites accessibles au sein du matériau. La couche secondaire absorbe de la couche primaire avec une énergie de liaison plus faible. La deuxième couche devient une surface absorbante de la couche suivante et le modèle isotherme de sorption peut s'écrire :

$$\frac{M_2}{M_2} = \frac{m_2}{m_0} = \frac{b_1 b_2 h^2}{(1-b_2 h)(1-b_2 h+b_1 h)} \quad \text{II.21}$$

Avec : b_1 et b_2 sont des constantes d'équilibre reliée à l'énergie de liaison des couches primaires avec les secondaires successivement. Les valeurs calculées d'après ce modèle sont en bon accord avec la réalité sur un domaine d'HR plus étendue qu'avec le modèle de B.E.T.

II.5.6 Modèle de Hailwood et Horrobin

Le modèle de sorption de Hailwood-Horrobin [70] a été utilisé pour caractériser l'interaction entre le matériau (bois) et la vapeur d'eau, car la concordance des valeurs mesurées avec les isothermes calculées est très bonne. L'équation de sorption [71] pour le modèle HH est donné par:

$$Ut = Um + Up \quad \text{II.22}$$

$$U_t = \frac{1800}{M_p}\left(\frac{\propto.\beta.h}{1+\propto.\beta.h}\right) + \frac{1800}{M_p}\left(\frac{\propto h}{1-\propto h}\right) \quad \text{II.23}$$

Avec: U_t quantité totale d'eau absorbée (%), Um monomoléculaire absorbé (%),α constante d'équilibre du bois hydraté, β constante d'équilibre du bois non hydraté.

Il convient de noter que plusieurs facteurs sont influents sur les isothermes de sorption tels que la température, la taille des pores du matériau et la nature de l'adsorbant. Par conséquent, il est nécessaire de prendre en considération ces facteurs lors de la modélisation des isothermes de sorption pour les matériaux de liège.

II.6 Techniques et dispositifs de mesures

Au cours des quinze dernières années, un nombre croissant d'études ont été consacrées aux propriétés barrières du liège à l'égard de l'oxygène. Les premières données sur la perméabilité ont été publiées dans l'étude [72]. Depuis lors, plusieurs méthodes de mesure ont été mises au point :

II.6.1 Vaporimètre

Le protocole expérimental repose sur l'utilisation de la méthode indirecte du vaporimètre, qui s'appuie sur le principe du vaporimètre en équilibre. Ce dispositif est installé sur une balance [73]. Cette approche permet de calculer le coefficient de diffusion de l'eau dans une direction et à une température spécifiques en surveillant le changement de masse du

matériau au fil du temps, lorsque le système atteint un état permanent. De cette manière, nous pouvons quantifier le flux d'humidité de l'eau à travers le matériau. Il est important de noter que cette méthode présente certaines limitations, notamment l'incapacité à maintenir l'humidité relative constante dans le four. En effet, la température sèche de l'air humide dans la chambre supérieure est contrôlée à l'aide d'un régulateur PID, ce qui peut affecter l'une des deux performances de régulation, à savoir la précision ou la stabilité. De plus, cette étude est menée en régime permanent.

II.6.2 Coulométrique

Les paramètres expérimentaux sont définis conformément à la norme ASTM F1307-14 (2014). La mesure est réalisée à une température de 23°C, une humidité relative de 0 % et une variation de pression d'oxygène de 0-1000 hPa ou 0-212 hPa [58]. Pour évaluer la perméabilité de l'oxygène à travers un bouchon en liège, ce dernier peut être inséré dans l'ouverture d'une bouteille. Ce col est aussi fixé à une structure métallique reliée à l'instrument de mesure, qui comporte deux compartiments séparés par l'échantillon. Le premier compartiment est saturé en oxygène, et le second est purgé avec un gaz vecteur, l'azote. L'oxygène qui traverse l'échantillon est ensuite dirigé vers un détecteur coulométrique. Une réaction d'oxydoréduction se produit au niveau de la paire anode/cathode, et la quantité d'électricité nécessaire pour réduire l'oxygène est directement proportionnelle au transfert.

Dans ce contexte, le résultat prend en considération à la fois le transport de matière à travers le liège comprimé et celui qui se produit à l'interface entre le verre et le liège [25].

II.6.3 Colorimétrique

Il s'agit d'une méthode économique et non destructive [74], mise au point par Lopes et al. en 2005, dans le but de se rapprocher des conditions de stockage réelles des bouteilles. Cette technique de mesure repose sur la variation de teinte d'un indicateur coloré, le carmin d'indigo. Dans son état réduit, la solution prend une teinte jaune, tandis qu'à l'état oxydé, elle devient bleu indigo. Il est impératif de réaliser les essais dans des bouteilles en verre transparent. Une fois les bouteilles contenant la solution de carmin d'indigo réduit bouchées, il est possible d'estimer simplement la quantité d'oxygène ayant traversé le système bouchon/col en mesurant la couleur à l'aide d'un colorimètre. Récemment, Brotto et al. [75] ont apporté des modifications à cette méthode pour réduire la durée des expérimentations et mettre en évidence les variations entre les obturateurs. Ces ajustements ont considérablement

transformé notre approche de l'évaluation de ces paramètres tout en améliorant la précision des mesures.

II.6.4 Dosage du SO2 libre

Le transfert d'oxygène à travers l'obturateur est évalué en se basant sur la diminution de la concentration en dioxyde de soufre (SO2) dans le vin [76]. Cependant, il convient de noter que les valeurs de perméabilité peuvent être surestimées, car la réduction de la teneur en SO2 dans le vin ne dépend pas exclusivement de la présence d'oxygène, mais peut résulter de divers processus réactionnels. Ces réactions peuvent impliquer des aldéhydes, des quinones, ainsi que des composés phénoliques comme l'éthanal ou l'acide pyruvique, comme indiqué par Boulton et al [77].

II.6.5 Chimi-luminescence

Développé par Sciacchitano, Vidal et al. [78] La société Nomacorc a adopté une méthode non destructive pour évaluer la quantité d'oxygène gazeux présente dans l'espace de tête et la quantité d'oxygène dissous dans le vin en utilisant un système luminescent. Dans cette approche, une pastille contenant un luminophore sensible à l'oxygène est insérée dans la bouteille, à la fois au niveau de l'espace de tête (pour l'oxygène gazeux) et au milieu (pour l'oxygène dissous) avant le remplissage. Lors de la mesure, une fibre optique est utilisée pour exciter le luminophore, et l'intensité lumineuse résultante est directement proportionnelle à la quantité d'oxygène présente. Cette technique de mesure exige des périodes d'expérimentation relativement longues, allant de 2 à 24 mois. Par conséquent, elles ne sont pas idéales pour des mesures de perméabilité de routine.

II.6.6 Manométrique

Le dispositif expérimental se compose de deux compartiments distincts séparés par l'échantillon [72]. Cette méthode repose sur la surveillance des variations de pression dans l'un des compartiments. Dans le premier scénario, une pression d'oxygène est introduite initialement dans un compartiment à 1000 hPa, tandis que l'autre reste en vide (statique). Les augmentations de pression dans ce dernier compartiment traduisent les transferts de matière de la première partie vers la deuxième à travers l'échantillon.

Une autre approche, permettant de réduire considérablement la durée de l'analyse, consiste à maintenir le deuxième compartiment en vide dynamique. Dans ce cas, on surveille

la diminution de la pression dans la première partie du montage. De plus, cette étude démontre qu'en mesurant la perméabilité à l'oxygène d'une tranche de liège de 3 mm d'épaisseur, il est possible d'extrapoler cette mesure à un bouchon entier de 48 mm. Le temps requis pour la mesure de la perméabilité à l'oxygène d'un échantillon est de 48 heures, avec 24 heures de dégazage préalable et 24 heures de mesure. Les résultats de perméabilité sont calculés en utilisant la première loi de Fick en régime stationnaire. Un autre avantage de cette méthode réside dans la flexibilité en ce qui concerne la forme de l'échantillon. Ainsi, il est possible d'analyser séparément les effets de la compression ou de l'interface entre le verre et l'obturateur.

II.6.7 Spectromètre

Il est difficile de comprendre la perméabilité du liège en l'absence de compression. De plus, l'influence de l'orientation sur la section en liège. Une nouvelle technique basée sur une fuite de spectromètre de masse [7, 79], Dans cette technique, on utilise un détecteur de fuite par spectromètre de masse à l'hélium pour mesurer le débit de gaz. Elle permit de déterminer la perméabilité des gaz à travers le liège non compressé. A travers une image de distribution de la perméabilité, pour des échantillons sélectionnés sans défauts macroscopiques en régime transitoire.

II.6.8 Cellule de Wicke et Kallenbach

Cette méthode est mise en œuvre pour estimer de manière indirecte le déplacement de la vapeur d'eau en évolution pendant une période de transition. Les taux de diffusion demeurent insensibles à l'humidité absolue du bois. Dans cette approche, il n'est pas possible d'évaluer directement le transfert par diffusion. La méthode consiste d'abord à calculer la diffusivité effective du gaz (azote ou hélium) au sein du milieu poreux, puis à postuler que la diffusivité apparente est proportionnelle au coefficient de diffusion moléculaire. L’handicape de cette méthode est que le coefficient de proportionnalité ne dépendant pas de la nature du soluté mais uniquement de la morphologie du milieu poreux. Elle ne décrive pas fidèlement le transfert jointement [80].

II.6.9 Double enceinte climatique

Cette méthode repose sur la mesure de l'absorption et de la désorption de l'eau en régime transitoire. Elle comprend deux enceintes climatiques, reliées à un vaporimètre. Lors des expériences d'absorption, les échantillons sont préalablement stabilisés à une certaine

humidité relative dans la première enceinte, puis transférés vers une enceinte à une humidité relative plus élevée. Les mesures de la masse des échantillons sont effectuées à intervalles de temps incrémentés. Pendant 24 heures, les masses sont enregistrées quotidiennement jusqu'à ce qu'une masse constante soit atteinte, correspondant à l'équilibre thermodynamique dans la deuxième enceinte.

Pour les expériences de désorption, la procédure est inversée. Les échantillons, stabilisés dans la deuxième enceinte, sont introduits dans la première enceinte à une humidité relative plus basse. Pour estimer la masse d'eau présente dans l'échantillon, un modèle mathématique est utilisé. Ce modèle prend en compte uniquement le transport diffusif en phase adsorbée, en faisant deux hypothèses essentielles : il néglige le transport diffusif de l'eau en phase gazeuse et suppose que l'équilibre d'adsorption entre la vapeur d'eau et l'eau adsorbée n'est pas linéaire. Étant donné la non-linéarité de la relation d'équilibre entre la vapeur d'eau et l'eau adsorbée, la résolution des équations aux dérivées partielles ne peut se faire que numériquement. Toutefois, une relation approximative peut être établie pour nos expériences d'absorption et de désorption, comme détaillé par [80].

II.6.10 Résistance électrique

L'objectif est de déterminer la résistance entre les extrémités de l'échantillon en régime transitoire. Malheureusement, cette méthode est présente des problèmes de fiabilité en raison de mauvais contacts et de la non-continuité du conducteur malgré sa rapidité de réponse. Face à ces défis, nous avons opté pour une approche conductimétrique, qui permet de résoudre de nombreux problèmes associés à ces techniques de mesure [81], qu'il s'agisse du régime (transitoire ou permanent), la nature (gas ou liquide), le gonflement (après le contact avec le liquide), le temps d’analyse et les faux contacts.

Dans certaines de ces techniques, il est nécessaire d'incorporer un modèle de diffusion de masse pour calculer le coefficient de diffusion. Plusieurs auteurs ont fait usage de modèles analytiques pour estimer la diffusivité de masse. Ces modèles s'appuient généralement sur les principes de la première et de la seconde loi de Fick.

II.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exploré le fascinant monde du transport dans les milieux poreux, en nous concentrant notamment sur le cas du liège. À travers cette étude, nous avons pu constater les mécanismes complexes qui régissent les mouvements de fluides et de particules dans ces structures microscopiques. En comprenant ces phénomènes, nous sommes mieux équipés pour aborder divers domaines allant de l'ingénierie des matériaux à la biologie.

Chapitre III

Réseaux de neurones artificiels et

Plan d’expériences

III.1 Introduction

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont de puissants outils de prédiction automatique largement utilisés dans de nombreux domaines, y compris le transfert de matière. Les RNA sont des modèles mathématiques inspirés du fonctionnement des neurones biologiques du cerveau humain. Ils sont capables d'apprendre à partir de données et de prendre des décisions ou de faire des prédictions en fonction de ces apprentissages.

Dans le contexte du transfert de matière, les RNA peuvent être utilisés pour modéliser et prédire les mécanismes de diffusion, de convection ou de réaction chimique. Ils peuvent être entraînés à partir de jeux de données expérimentales ou simulées, afin de comprendre et de prévoir le comportement des matériaux en termes de transfert de matière.

L'une des principales forces des RNA réside dans leur capacité à détecter des schémas complexes et non linéaires dans les données. Ils sont capables d'extraire des informations significatives à partir de données brutes et d'apprendre des relations complexes entre les variables. Cela en fait des outils précieux pour modéliser des systèmes de transfert de matière complexes, où de multiples facteurs et interactions peuvent être présentes.

Les RNA offrent également une grande flexibilité en termes d'architecture et de configuration. Ils peuvent être conçus avec différentes couches de neurones, des fonctions d'activation variées et des méthodes d'apprentissage spécifiques. Cela permet de les adapter aux besoins spécifiques du problème de transfert de matière étudié.

Dans cette étude, nous explorerons l'utilisation des réseaux neuronaux artificiels pour modéliser et prédire le transfert de matière dans un contexte spécifique. Nous entraînerons le RNA avec des données expérimentales ou simulées, et nous évaluerons sa capacité à reproduire les profils de concentration et à prévoir le comportement de diffusion dans le liège. Cette approche ouvre de nouvelles perspectives pour une meilleure compréhension et une optimisation plus précise des processus de transfert de matière.

III.2 Définitions et propriétés des RNA

Le premier modèle de calcul proposé utilisant des neurones comme architecture en 1943 [82]. L'introduction des ordinateurs a permis de développer et de tester les réseaux

neuronaux artificiels [83]. Les premiers réseaux neuronaux artificiels sur ordinateur étaient le perceptron [84].

Les réseaux neuronaux artificiels (ANN) sont des modèles informatiques construits sur la base de la structure des réseaux neuronaux biologiques, comme le cerveau humain [85]. Le processus piloté par les données avec les ANN à l'aide d'algorithmes mathématiques peut résoudre des problèmes complexes qui sont non linéaires en utilisant la relation entre les données d'entrée et les données de sortie [86]. La structure d'un réseau artificiel se compose de trois éléments clés : La couche d'entrée, les couches cachées, et la sortie [87]. En outre, les connexions entre la couche d'entrée la couche cachée et la couche de sortie sont représentées par des poids S'il y a plusieurs couches cachées, les connexions ont les poids de plusieurs couches. Les autres éléments sont le biais (b) et la fonction d'activation ou de transfert de la couche cachée ((y)) [88].

La fonction d'un réseau simple avec un neurone d'entrée peut être exprimée mathématiquement par :

$$y = f(y) = f(wx + b)$$

III.1

Où la sortie prédite (y) est obtenue à partir de la fonction d'activation ou d'apprentissage (y) calculée à partir de l'entrée (x), du poids (w) et du biais (b).

Dans un réseau à entrées multiples, la sortie (y_k) est la somme pondérée de toutes les entrées et des biais. A exemple simple avec des entrées multiples (x_i) et une couche cachée (i) et une couche cachée j est illustré à la figure III.1.

En général, les connexions des neurones d'entrée sont connectées à tous les neurones de la couche cachée. Les entrées multiples ($x1$, $x2$ ... . xi), sont connectées à poids ($w1,1$, $w1,2$ ... . $wi,$) de la couche d'entrée i à une couche cachée j et de la couche cachée vers la couche de sortie ($w2,1$, $w2,2$ ... . wj,k).

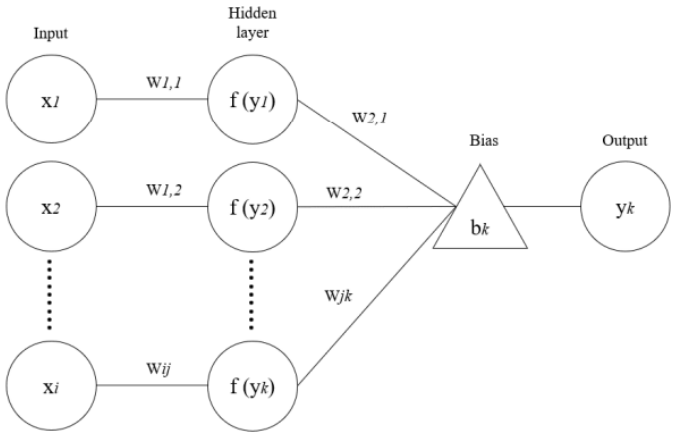


Figure III.1 : Structure simplifiée d'un réseau avec plusieurs entrées, avec des poids connectés (wij et wjk) [88].

Ensuite, la sortie nette du réseau peut être exprimée comme la somme des poids, des entrées et des biais de toutes les couches (Eq. III.2). La sortie prédite, y_k, dans la couche de sortie k ou dans une couche cachée est générée à l'aide d'une fonction d'activation ou de transfert (f). La sortie prédite dépend de la fonction de transfert qui est choisie.

$$\sum y_k = \sum(w_{i,j}x_i + b_{i,j}) + (w_{i,j}x_i + b_{j,k}) \qquad \text{III.2}$$

III.2.1 Avantages des RNA dans la modélisation et la prédiction

Les réseaux neuronaux, avec leurs capacités remarquables à dériver le sens de données compliquées ou imprécises, peuvent être utilisés pour extraire des motifs et détecter des tendances trop complexes pour être remarquées par les humains ou d'autres techniques informatiques. Un réseau de neurones formé peut être considéré comme un «expert» dans la catégorie d'informations qui lui a été donné d'analyser. Parmi les autres avantages, nous pouvons citer :

- Apprentissage adaptatif : Capacité d'apprendre à effectuer des tâches en fonction des données fournies pour la formation ou l'expérience initiale.
- Auto-organisation : Un RNA peut créer sa propre organisation ou représentation de l'information qu'il reçoit pendant le temps d'apprentissage.
- Fonctionnement en temps réel : Les calculs RNA peuvent être effectués en parallèle et des dispositifs matériels spécifiques peuvent être conçus et fabriqués pour en tirer parti.
- Tolérance aux pannes via des informations redondantes de codage. La destruction partielle d'un réseau entraîne la dégradation correspondante des performances.

Cependant, certaines capacités du réseau peuvent être conservées même avec des dommages majeurs sur le réseau.

III.2.2 Domaine d'utilisation des RNA

Le nombre d'application des réseaux de neurones ne semble limité que par l'imagination humaine. Toutes les tâches du quotidien on industrielles peuvent être réalisées par ce type d'approche, à l'instar de l'intelligence artificielle (deep ou machine learning). Sans être exhaustif, nous donnons ci-après quelques exemples typiques de cette technologie :

- Traitement du signal: suppression du bruit de ligne, suppression adaptative de l'écho, séparation de la source aveugle [89] ;
- Contrôle et automatisation industriel : Siemens utilise avec succès les réseaux de neurones pour l'automatisation des processus dans les industries de base, par exemple, dans le contrôle des laminoirs, plus de 100 réseaux de neurones font leur travail, 24 heures sur 24 [90] ;
- Véhicule autonome (l'aide à la conduite) [91] ;
- Robotiques [92] ;
- Navigation, reconnaissance de la vision[93] ;
- Reconnaissance de motifs, c'est-à-dire la reconnaissance de caractères manuscrits ;
- Médecine avec déjà de nombreuses application comme le stockage des dossiers médicaux en fonction de l'information [94] ;
- Production de discours: lecture de textes à haute voix (NETtalk) ;
- Reconnaissance de la parole [95] ;
- Vision : reconnaissance faciale, moteurs de recherche visuelle, [96] ;
- Applications financières : analyse de séries temporelles, prédiction boursière [97] ;
- Compression de données: texte, son et images ;
- Jeu: backgammon, échecs [98] ;

III.2.3 Architecture du réseau

La sélection d'un type de réseau robuste pour l'approximation et la connectivité entre les nœuds sont importants. La connexion entre les nœuds détermine la manière dont l'information est transmise à travers le réseau [83]. De nombreux chercheurs s'accordent à dire que la qualité du résultat dépend de la taille du réseau utilisé pour résoudre le problème [99]. Une étape cruciale pour la construction d'un réseau neuronal consiste à sélectionner une

architecture ou une taille de réseau appropriée [99]. La taille du réseau est liée au nombre de couches cachées, aux neurones dans les couches cachées, à la connectivité entre chacune des couches. En général, la taille du réseau affecte les éléments suivants :

- La complexité du réseau
- le temps d'apprentissage du réseau
- Les capacités de généralisation

Le nombre de couches cachées dans un réseau neuronal est défini par l'utilisateur. Selon les recherches, un réseau à deux couches cachées est considéré comme acceptable pour l'approximation de toute fonction non linéaire pour les problèmes de classification [100]. Il est également prouvé qu'une couche cachée est suffisante pour une approximation proche de n'importe quelle fonction continue par un réseau continu utilisant une fonction sigmoïdale [101]. Dans de nombreux cas, les réseaux neuronaux sont de grande taille et formés à de très petites erreurs, car il est plus facile de les former avec un grand nombre de neurones.

La méthode choisie dans cette étude est celle des réseaux neuronaux, précisément des types de réseaux feedforward. Le site réseaux neuronaux peut varier considérablement dans leur structure ou leur architecture en fonction du problème. Le type de réseau feedforward utilisé dans notre recherche est le perceptron multicouche ou l'architecture de réseau multicouche feedforward (MLP).

III.2.4 Types de réseau neuronal

Il existe plusieurs types de réseaux de neurones, chacun adapté à des applications spécifiques, les plus couramment utilisés :

1. **Perceptron single :** C'est le bloc de construction de base d'un réseau de neurones. Il consiste en un seul neurone avec des poids et un biais, utilisé pour des tâches de classification binaire [102].
2. **Réseaux de neurones à couches multiples (MLP) :** Aussi connus sous le nom de réseaux de neurones feedforward, les MLP sont constitués de plusieurs couches de neurones, comprenant une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées et une couche de sortie. Ces réseaux sont utilisés pour des tâches de classification et de régression [103].
3. **Réseaux neuronaux récurrents (RNN) :** Les RNN sont conçus pour traiter des données séquentielles en introduisant des connexions récurrentes. Ils sont adaptés aux

séquences de données, comme le traitement du langage naturel, la reconnaissance de la parole et la prédiction temporelle [95].

4. **Réseaux de neurones convolutionnels (CNN) :** Les CNN sont particulièrement efficaces pour le traitement d'images. Ils utilisent des filtres convolutifs pour extraire des caractéristiques spatiales des données d'entrée. Les CNN sont couramment utilisés dans la vision par ordinateur et la reconnaissance d'images [104].
5. **Réseaux de neurones génératifs (GAN) :** Les GAN consistent en deux réseaux neuronaux, un générateur et un discriminateur, qui s'entraînent simultanément. Ils sont utilisés pour générer de nouvelles données, comme des images réalistes, à partir de données existantes [105].
6. **Réseaux de neurones récurrents à mémoire à court et long terme (LSTM) :** Une amélioration des RNN, les LSTMs sont conçus pour gérer les problèmes de disparition du gradient sur de longues séquences. Ils sont largement utilisés dans des tâches impliquant des séquences de données [106].
7. **Réseaux de neurones auto-encodeurs (AE) :** Les auto-encodeurs sont utilisés pour apprendre une représentation compacte des données en minimisant la perte de reconstruction. Ils sont utilisés pour la réduction de dimension et la génération de données [107].
8. **Réseaux de neurones siamois :** Ces réseaux sont conçus pour comparer deux entrées et sont souvent utilisés dans les tâches de vérification de similarité, comme la reconnaissance faciale [108].
9. **Réseaux de neurones modulaires :** Ces réseaux sont constitués de sous-réseaux spécialisés qui peuvent être combinés pour résoudre des tâches complexes [109].
10. **Réseaux de neurones profonds (DNN) :** Ce terme fait référence à tout réseau de neurones avec un grand nombre de couches, souvent utilisé pour des tâches complexes où des représentations hiérarchiques sont nécessaires [95].

Dans notre recherche, Le choix d'un réseau de neurones à propagation avant, tel qu'un Multi-Layer Perceptron (MLP), pour l'estimation du coefficient de diffusion par un réseau de neurones artificiels (RNA), est justifié par la capacité intrinsèque des MLP à modéliser des relations non linéaires complexes. Le coefficient de diffusion, souvent influencé par des interactions subtiles entre différentes variables, peut bénéficier de la flexibilité des MLP pour capturer ces nuances. De plus, la capacité d'ajuster les poids du réseau par rétropropagation du gradient permet d'optimiser le modèle pour minimiser l'écart entre les prédictions et les

valeurs réelles du coefficient de diffusion. La simplicité relative des MLP par rapport à des architectures plus complexes offre également une interprétabilité accrue, ce qui peut être crucial dans des domaines où la compréhension du modèle est tout aussi importante que sa performance prédictive. Ainsi, le choix d'un MLP se justifie par sa capacité à traiter efficacement des données complexes et à s'adapter de manière précise aux particularités du problème d'estimation du coefficient de diffusion.

III.2.5 Indicateurs de performance

Les indicateurs de performance couramment utilisés pour évaluer un modèle de régression, y compris les réseaux de neurones artificiels, comprennent le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne (MSE - Mean Squared Error) et la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE - Root Mean Square Error).

III.2.5.1 Coefficient de Détermination (R^2)

Le coefficient de détermination, ou R-carré, mesure la proportion de la variance de la variable dépendante (la variable que vous essayez de prédire) qui est expliquée par le modèle de régression. Il varie de 0 à 1, où 0 signifie que le modèle n'explique aucune variance et 1 signifie qu'il explique toute la variance. Plus le R-carré est proche de 1, l'adéquation du modèle aux données est meilleure.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{m}(X_i - Y_i)(X_i - Y_i)}{\sum_{i=1}^{m}(\overline{Y} - Y_i)(\overline{Y} - Y_i)} \qquad \text{III.3}$$

III.2.5.2 Erreur Quadratique Moyenne (MSE - Mean Squared Error)

Le MSE mesure la moyenne des carrés des écarts (ou erreurs) entre les prédictions du modèle et les valeurs réelles de la variable dépendante. Il est calculé en prenant la moyenne des carrés des erreurs individuelles. Le MSE quantifie l'écart moyen entre les prédictions du modèle et les données réelles. Plus le MSE est faible, la performance du modèle est meilleure.

$$MSE = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(X_i - Y_i)^2 \qquad \text{III.4}$$

III.2.5.3 Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne

La Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE - Root Mean Square Error) est une version du MSE où la racine carrée est prise pour revenir à l'échelle d'origine des données. Cela signifie que le RMSE est généralement exprimé dans les mêmes unités que la variable dépendante. Comme le MSE, un RMSE plus bas indique une meilleure adéquation du modèle.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(X_i - Y_i)} \quad \text{III.5}$$

III.2.6 Les fonctions de transfert

Les couches cachées utilisent des fonctions de transfert pour détecter la relation existante entre les entrées et les sorties [89]. La structure MLP peut utiliser une variété de fonctions de transfert, les plus courantes étant "Sigmoïde" et "Tansig". Dans la plupart des cas, la "ligne pure" est utilisée comme couche de sortie [110]. Les équations (1), (2), (3) et (4) présentent certaines des fonctions de transfert les plus souvent utilisées.

- Logsig = Sigmoid : $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ III.6
- Linear = Purelin : $f(x) = \mathrm{x}$ III.7
- Sinusid : $f(x) = \sin(\mathrm{x})$ III.8
- Tansig = Tanh : $f(x) = \frac{e^{x}-e^{-x}}{e^{x}+e^{-x}} = \frac{2}{1-e^{-2x}} - 1$ III.9

Les performances d'un réseau MLP sont influencées par le nombre de couches cachées et de neurones dans ces couches. Après la définition de la structure MLP, de nombreux poids et biais pour chaque neurone doivent être choisis dans la section de formation pour améliorer l'efficacité du réseau. Le réseau MLP peut être entraîné à l'aide de diverses techniques, notamment les algorithmes de régularisation bayésienne (BR) [111], de Levenberg-Marquardt (LM) [113] et de gradient conjugué échelonné (SCG) [112] Ces algorithmes sont chargés de calculer les biais et les poids.

III.3 Modélisation par Plan d'expériences

III.3.1 Introduction

Dans le cadre de la théorie de l'optimisation, une expérience est une série de tests dans lesquels les variables d'entrée sont modifiées selon une règle donnée afin d'identifier les raisons de l'échec. Selon Montgomery "Les expériences sont réalisées dans presque tous les domaines de recherche et sont utilisées pour étudier les performances des processus et des systèmes. Le processus est une combinaison de machines, de méthodes, de personnes et d'autres ressources qui transforment une entrée en une sortie ayant une ou plusieurs réponses observables. Certaines des variables du processus sont contrôlables, tandis que d'autres variables sont incontrôlables, bien qu'elles puissent être contrôlées pour les besoins d'un test. Les objectifs de l'expérience sont les suivants :

- Déterminer les variables qui ont le plus d'influence sur la réponse ;
- Déterminer où fixer les variables influentes contrôlables de manière à ce que la réponse soit presque toujours proche de la valeur optimale souhaitée, que la variabilité de la réponse soit faible, de sorte que l'effet des variables incontrôlables soit minimisé. Ainsi, l'objectif des expériences est essentiellement l'optimisation.

Le DOE, ou plan d'expérience, est le nom donné aux techniques utilisées pour guider le choix des expériences à réaliser de manière efficace. Antony et Kaye ont défini le DOE comme une technique puissante utilisée pour découvrir les paramètres du processus les plus influents et pour déterminer à quels niveaux ils doivent être réglés pour optimiser les mesures de performance associées [114]. Il est donc préférable d'analyser les données à l'aide de méthodes statistiques appropriées. Les principes de base des méthodes statistiques dans la conception expérimentales est la réplication. La réplication est la répétition de l'expérience afin d'obtenir un résultat plus précis et d'estimer l'erreur expérimentale. Certains termes sont utilisés dans la littérature lorsqu'on parle du plan d'expériences tels que les facteurs, les niveaux les interactions, les effets.

- **La réponse**

Est le résultat expérimental correspondant au réglage des paramètres du processus [115]. Dans les études d'ingénierie de la qualité, la réponse est désignée comme une caractéristique critique pour la qualité ou une mesure de performance [116].

- **Les facteurs**

Sont les paramètres du processus qui sont censés avoir une certaine influence sur la réponse. Ils peuvent être quantitatifs ou mesurables (par exemple, la température, pression, temps, etc.) ou qualitatifs ou catégoriques, Les facteurs peuvent être classés comme suit conception/contrôle ou nuisance/bruit. Les premiers sont ceux qui peuvent être facilement contrôlés, non seulement lors de l'expérimentation, mais aussi dans le cadre des opérations quotidiennes, tandis que les seconds sont ceux qui sont difficiles ou impossibles à contrôler ou ceux qui varient pendant l'utilisation du produit ou du processus, comme la température et l'humidité ambiantes. Dans ce travail, les termes facteur et paramètre seront utilisés indifféremment sont qualitatifs et quantitatifs.

- **Les niveaux**

Sont les valeurs qu'un facteur peut prendre ou assumer ; ils sont parfois appelés traitements, notamment dans les expériences agricoles, médicales et biologiques [117]. Les plus simples n'utilisent que deux niveaux pour chaque facteur. Les niveaux peuvent être fixes, c'est-à-dire des niveaux spécifiques d'intérêt, ou bien ils peuvent être aléatoires, c'est-à-dire choisis au hasard dans une population plus large de niveaux possibles

- **L'effet**

Est la modification de la réponse moyenne rendue par un changement dans les niveaux d'un facteur. Il est fréquemment appelé effet principal car il se réfère aux principaux facteurs d'intérêt de l'expérience.

- **L'interaction**

Est l'incapacité d'un facteur à produire le même effet sur la réponse à différents niveaux d'un autre facteur, c'est-à-dire que la différence de réponse entre les niveaux d'un facteur n'est pas la même à tous les niveaux des autres facteurs.

III.3.2 Les techniques du plan d'expériences (DOE)

Plusieurs techniques DOE sont à la disposition du concepteur d'expériences. Cependant, comme c'est toujours le cas en matière d'optimisation, il n'existe pas de meilleur choix. Dépend du problème à étudier et de l'objectif de l'expérimentation. Les éléments à prendre en compte sont les suivants

- Le nombre d'expériences N que l'on peut se permettre ;
- Le nombre de paramètres k de l'expérience ;
- Le nombre de niveaux L pour chaque paramètre.

L'objectif de Plan d'expériences varie en fonction des impératifs de l'expérimentation. Pour une estimation approximative des effets principaux, la méthode de Plackett-Burman est privilégiée, tandis qu'en présence d'une nécessité de calcul plus précis des effets principaux et des interactions, une méthode factorielle fractionnée ou complète est préférable. Pour se concentrer sur un facteur primaire, un carré latin ou un plan en bloc complet randomisé est approprié, et en cas d'influence significative des variables de bruit, la méthode Taguchi est recommandée malgré ses coûts relativement bas [117].

L'étude que nous présentons vise à investiguer les influences conjointes de plusieurs facteurs sur des paramètres clés dans le processus de diffusion dans le liège. Nous avons choisi de subdiviser notre base en trois catégories distinctes afin d'explorer les variations résultantes sur trois facteurs à deux niveaux. Ces facteurs, déterminants la diffusivité massique du liège, la localisation géographique (Médéa Skikda et Jijel), la direction de coupe (radiale tangentielle et longitudinale) et la nature du liège (traité et natif). L'utilisation d'un plan factoriel complet, avec ses avantages de pouvoir explorer les interactions entre les facteurs, permettra une analyse approfondie des effets de chaque variable sur les performances globales du processus d'isolation.

III.3.3 Méthodologie

Nous avons mis en place un plan d'expériences en utilisant un design factoriel complet, couvrant toutes les combinaisons possibles des niveaux de chaque facteur. Les trois facteurs (zone, direction de coupe et la nature du liège "traité ou native") sont étudiés à deux niveaux, permettant une évaluation approfondie des interactions potentielles entre eux.

III.3.4 Importance pratique

La compréhension des relations complexes entre ces facteurs peut avoir des implications significatives pour l'industrie. Les résultats permettront d'optimiser expériences de tests, conduisant potentiellement à des livrer un produit de haute qualité.

Cette recherche contribue à élargir notre compréhension des facteurs qui influent sur le processus de diffusion du liège, avec des applications potentielles dans divers secteurs allant

de la construction à la fabrication des bouchons. Nous présentons ici les étapes initiales de notre étude, avec l'intention de détailler les résultats et les implications pratiques dans les sections à venir.

III.3.5 Conclusion

L’utilisation de techniques avancées telles que les plans d'expérience et les réseaux de neurones artificiels (ANN) offre des perspectives prometteuses pour approfondir notre compréhension de la diffusion du liège. Les plans d'expérience permettent une optimisation systématique des facteurs expérimentaux, tandis que les réseaux de neurones artificiels offrent la possibilité de modéliser et de prédire de manière précise les comportements de diffusion du liège en fonction de différentes conditions opérationnelles. En combinant ces approches méthodologiques avancées, nous sommes en mesure d'apporter des contributions significatives à la compréhension et à l'application des propriétés de diffusion du liège dans divers domaines industriels et environnementaux.

Chapitre IV

Modélisation et expérimentation

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous examinons en détail les étapes essentielles de la préparation et de la caractérisation des échantillons dans le cadre de notre travail expérimental. Nous débutons par la préparation des échantillons de liège des trois zones (Médéa, Jijel et Skida) selon la direction (longitudinale, tangentiel et Radiale) et la nature (traité et natif), par le traitement thermique (THT) et l'ébullition. Ensuite, nous abordons la détermination du coefficient de diffusion massique apparent (D_{app}), une technique de conductimétrie indirecte utilisé pour évaluer la diffusion dans le liège.

Pour étudier l'isolation on fait l'appel au coefficient D_{app} qu'est une grandeur très représentative à la détermination du transfert massique dans un milieu poreux. Nous adoptons également une approche analytique en utilisant le bilan massique à la modélisation mathématique comme un outil essentiel pour comprendre et prédire le comportement mécanique des échantillons dans des conditions variées. Cette approche combinée entre expérimentation et modélisation vise à déterminer par calage la valeur du D_{app}.

IV.2 Détermination de l'isolation

La détermination de l'efficacité de l'isolement du liège se fait selon l'organigramme suivant :

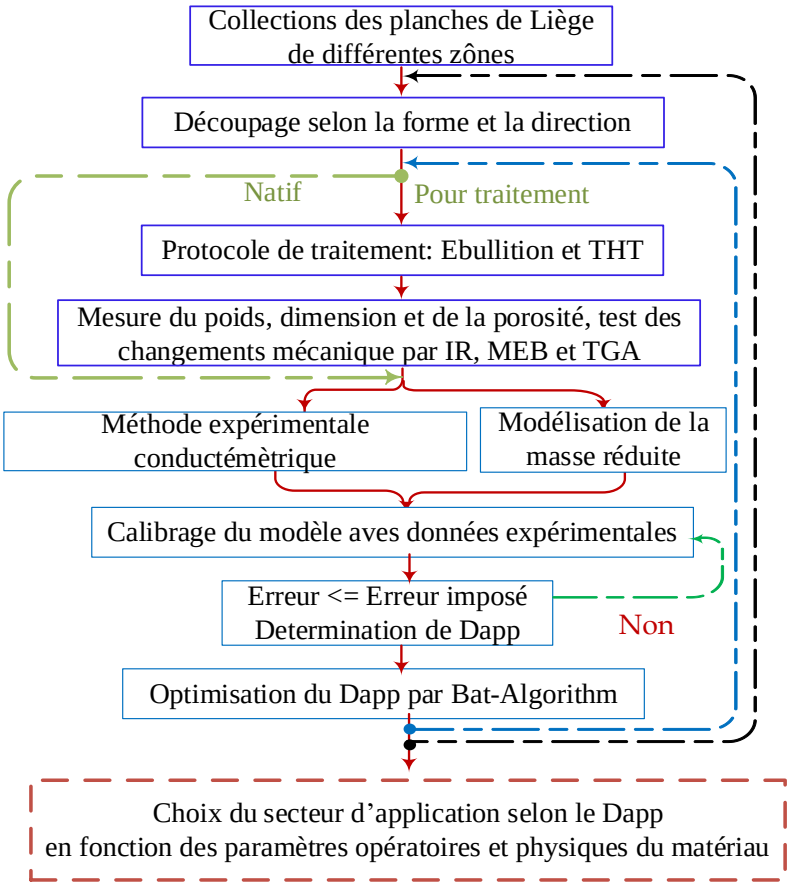


Figure IV.1 : Processus de détermination du coefficient apparent de diffusion de masse.

IV.3 Expérimentation à la détermination du transfert

IV.3.1 Préparation des échantillons

Dans cette étude, le protocole expérimental consiste à préparer des copeaux de liège naturel provenant de trois régions en Algérie, notamment Jijel, Médéa et Skikda. Ces spécimens ont été collectés auprès de l'unité industrielle «EPE Jijel Liège Étanchéité SPA" et sur d'autre cite. Ces copeaux proviennent de liège de haute qualité [53].

Chaque échantillon présent un coupeau d'une seule zone et d'une seul direction sois à l'état native ou traité, l'organigramme si dessous présente tous les échantillons étudié.

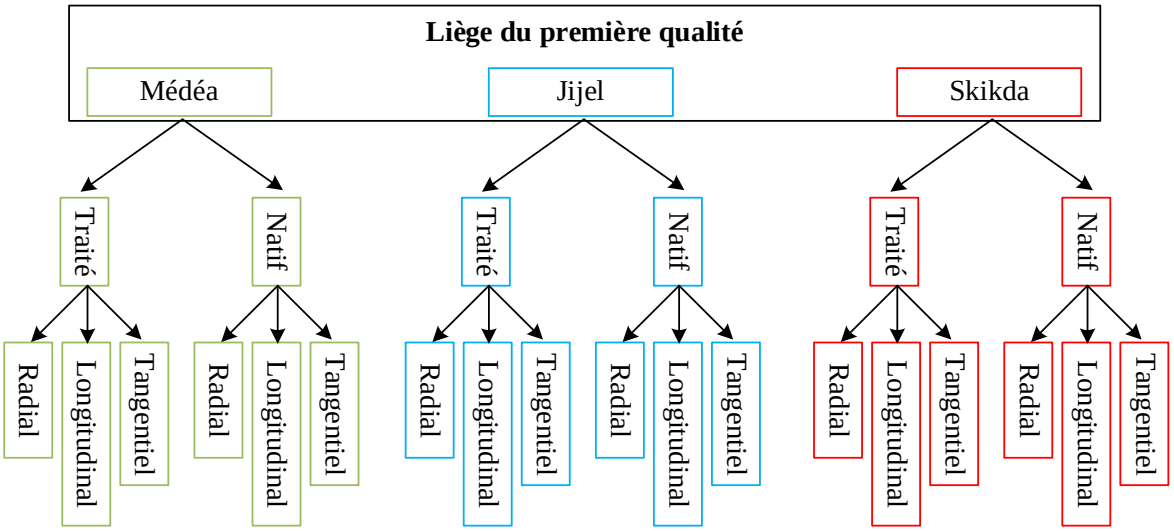


Figure IV.2 : Organigramme des échantillons étudié.

Les spécimens ont été découpés en blocs orthotropes dans une direction spécifique (figure VI.3). Les dimensions ont été déterminées selon les dimensions appropriées requises pour la méthode de conductimétrie. Pour le calcul du coefficient de diffusion (D_{app}), des plaquettes ont été utilisées, avec une surface moyenne de facettes de $1{,}934 \times 10^{-3}$ m^2 et une épaisseur moyenne de $5{,}91 \times 10^{-3}$ m dans une direction donnée.

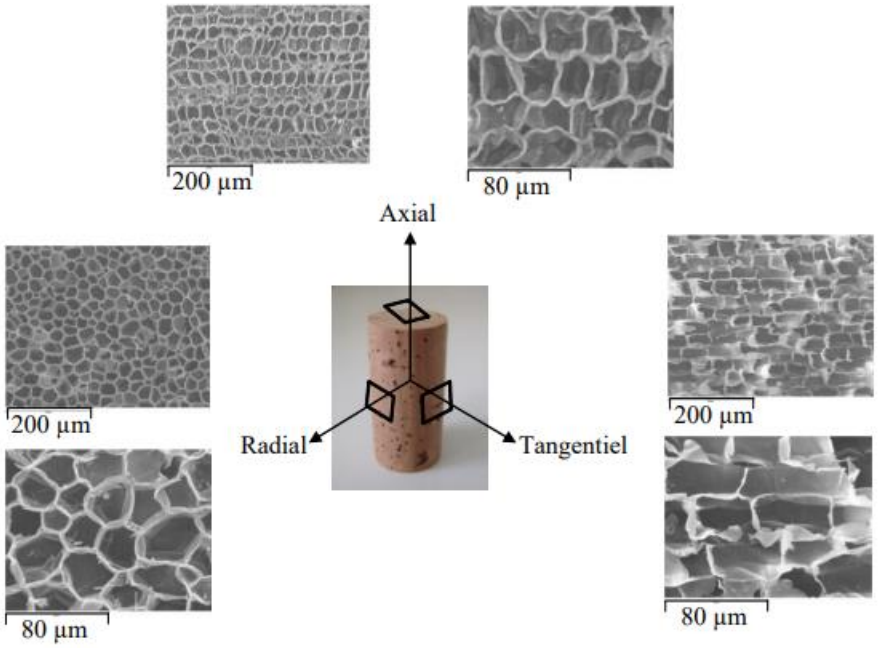


Figure IV.3: Orientation cellulaire dans une coupe de liège observé par MEB [55].

IV.3.2 Analyse thermogravimétrique (TGA)

La thermogravimétrie est définie comme une méthode qui mesure le changement de masse d'un coupeau soumis à des cycles de chauffage à des températures prédéfinies dans le temps (mode isotherme) et dans une atmosphère contrôlée [118,119]. Elle permet d'effectuer une analyse quantitative des transformations qui se produisent au sein du liège lors d'un traitement thermique dans une atmosphère soigneusement contrôlée (figure IV.4). Les mesures ont été effectué par l'appareil PC/PG NETZSCH STA 409 (URMPE, UMB, Boumerdes, Algérie), avec un plan de chauffage linéaire de 5°C/min, couvrant une plage de température allant de la température ambiante à 600°C.

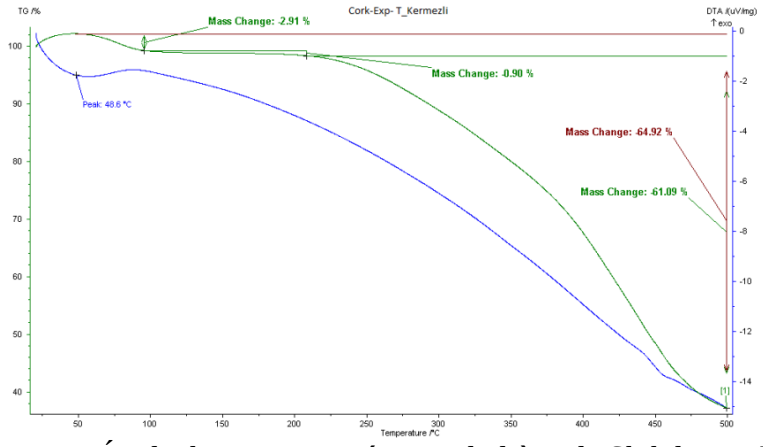


Figure IV.4 : Étude thermogravimétrique du liège de Skikda, en Algérie.

A partir de l'analyse proposée, il a été possible de surveiller la diminution de masse des coupeaux en fonction de la température. Cette réduction a apporté des données précieuses et une compréhension très approfondie sur l'effet des différentes étapes de traitement thermique (THT) sur les zones d'élimination de quelque élément constitutif qui contribuent à la durabilité du matériau (par exemple, la cellulose à 215°C, l'hémicellulose à 385°C, la lignine à 460°C). De plus, cette étude a permis d'identifier le palier d'homogénéisation du cycle de traitement thermique d'échantillon de liège à une température 175°C, ainsi que le début de la courbe où la progression devient plus prononcée, indiquant une diminution de poids substantielle.

Durant le processus de chauffage de l'échantillon, différentes températures ont provoqué la libération de composés volatils, ce qui démontre l'importance de la température sur la composition chimique du liège traité. L'analyse (TGA) du liège non traité reproduit (Figure IV.4) a révélé des résultats significatifs. Au cours du processus de chauffage, Une

diminution de poids d'environ 3 % a été observée jusqu'à ce que la température atteigne 175 °C. La phase de séchage comme si la température inférieure à 200 °C (première étape), le temps laquelle l'humidité résiduelle est éliminée. Le liège reste thermiquement stable jusqu'à 240°C, avec une perte de masse de 6% par rapport à sa masse initiale, sans que les constituants principaux ne se dégradent encore. Entre 175°C et 500°C, Une diminution constante de la masse de 64,99 % a été relevée, affichant une tendance linéaire.

IV.3.3 Traitement THT et ébullition

Le procédé de traitement se présente en 4 variantes selon le tableau VI.1. Le traitement de THT est effectué par un four de haute qualité NABERTHERM '30-3000°C' (figure IV.5) Avec des rythmes de chauffage variés, sous un gaz inerte (Argon). Tandis que l'ébullition se réalise dans l'eau distillée à 100°C pendant une heure,



Figure IV.5 : Four de traitement thermique NABERTHERM.

Le protocole de THT est inspirée des travaux de référence [120], avec une modification du taux d'augmentation de température et un palier d'homogénéisation des échantillons à 175°C à la place de 165°C. Cette température est en relation directe avec le point de fusion global de la subérine, ainsi qu'avec le début de la courbe de perte de masse, caractérisée par une pente plus accentuée, comme indiqué par le spectre de l'analyse TGA. À la suite de chaque ébullition, une période d'aération naturelle d'environ 15 jours est observée pour le séchage des échantillons. Jusqu'à ce qu'ils atteignent un taux d'humidité d'équilibre compris entre 2 et 9%. Ensuite, les copeaux sont placés dans une étuve à 103°C pendant 3 heures afin de les sécher, permettant ainsi de mesurer la variation de masse et de dimensions au fil du temps. Avant chaque essai, les échantillons sont pesés, Par ailleurs, à chaque niveau de température, on procède à des pesées pour quantifier la perte instantanée de masse ainsi que les modifications de dimensions.

Tableau IV.1 : Diverse variante du procédé expérimental.

		Protocole 1			Protocole 2			Protocole 3			Protocole 3
Les échantillons / Traitement		A1	B1	C1	A2	B2	C2	A3	B3	C3	D
Procédure 1	Ebullition	X	X	X							X
Procédure 2	THT	5°C	1°C	0.5°C	5°C	1°C	0.5°C	5°C	1°C	0.5°C	
Procédure 3	Ebullition				X	X	X				

D'après les 4 protocoles on inspire le 5eme protocole qui est considérer comme optimum, un échauffement de 1°C/min jusqu'à 175 °C dans une période de 150 min, un palier d'homogénéisation à 175°C d'environ 75 min précédente un autre échauffement de 5°C/min dans une courte durée 25 min.

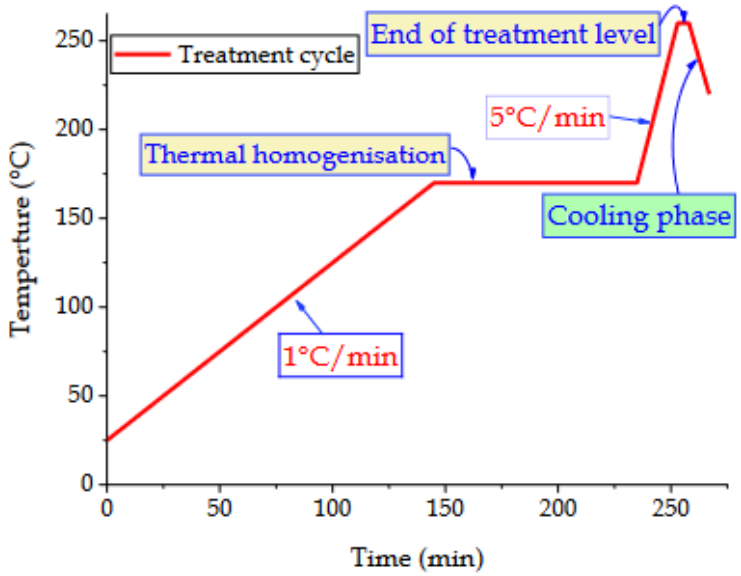


Figure IV.6 : Cycle de THT optimale.

Selon la recherche bibliographique et les résultats expérimentaux obtenus, il peut être conclu que l'hémicellulose le premier composant à se dégrader, (Figure IV.7), d'après les recherches [121 ,122] la plage de dégradation s'étend de 177°C à 427°C, tandis que les études [123 ,124,12] mentionnent généralement une dégradation de l'hémicellulose à partir de 200°C jusqu'à 300°C. En revanche, la subérine présente une plus grande stabilité et sa dégradation se produit dans la plage de température de 230°C à 370°C. À l'intérieur de cette plage, Une transformation chimique de la structure a été observée, attribuable à la dégradation de la cellulose. Généralement, selon les chercheurs, les diverses celluloses atteignent leur taux de décomposition maximal entre 365°C et 440°C [125].

La quatrième zone, au-dessus de 457°C, correspond à une dégradation continue des lignines, comme il est indiqué dans des études sur le bois et le liège [55,126]. La perte de masse continue démontre que la dégradation de la lignine se produit à une cinétique plus lente par rapport aux autres composés [127,128].

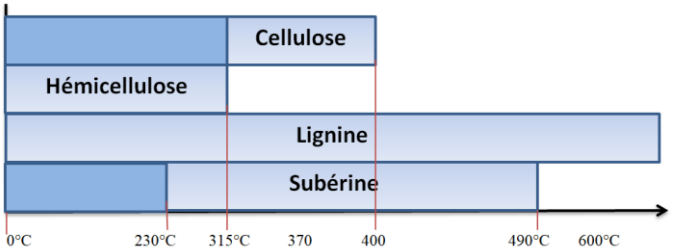


Figure IV.7 : Décomposition thermique des constituants chimiques du liège à différentes températures.

D'après les données présentées dans la Figure VI.7, il est clairement discernable que la superposition des domaines permet d'identifier les zones de dégradation des éléments, ce qui reflète efficacement la perte de masse mesurée par thermogravimétrie [129].

IV.3.4 Caractérisation morphologique

IV.3.4.1 Microscopie électronique à balayage

Les échantillons de liège, qu'ils soient naturels ou traités, ont été examinés au microscope électronique à balayage (MEB) Quanta 250 de la société FEI (figure IV.8). Cette étude a été menée dans le cadre d'une prestation de services demandée à la division de la filiale du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyse Physico-Chimique (CRAPC EXPERTISE, Bou-Ismail, Tipaza), en partenariat avec le département matériaux et environnement de l'Université de Médéa.

Le système de configuration choisi comprend un niveau de pression de vide faible, à 60 et 50 Pascal respectivement, ainsi qu'une tension du faisceau principal réglée entre 15 et 20 KV. Le dimensionnement du spot du faisceau d'électrons est fixé à 3, et le détecteur utilisé est le LFD (détecteur de faible débit d'électrons). La distance de travail peut varier entre 8,1 et 14,2 mm, tandis que les facteurs de grossissement disponibles sont de 500X, 2000X et 2500X.

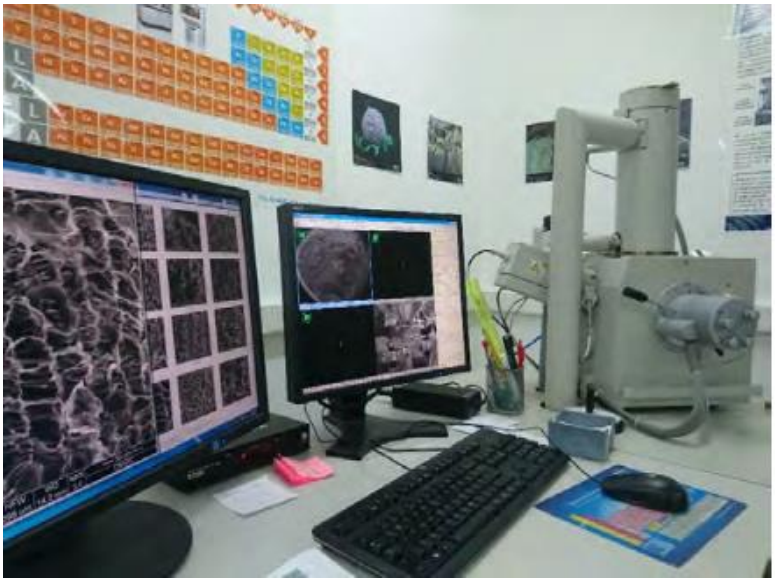


Figure IV.8 : Image du Microscope Electronique à Balayage.

IV.3.4.2 Mesure de la densité du liège

L'utilisation de la méthode de pesé nous a permet de déterminer la densité du matériau poreux sec. Nous avons mesuré le volume de 10 échantillons de forme cylindrique standard provenant de la même planche de liège, fabriqués à l'aide d'une machine de remplissage automatique (Tableau IV.2). La mesure de la hauteur de chaque cylindre est réalisé au moyen d'un pied à coulisse, offrant une précision de 0.01 mm, les valeurs de hauteur varient entre (43,42 mm et 44,28mm). Chaque cylindre est de volume moyen $V_{Cylindre}$ = 20352,4x10^{-9} m^3. Avec une balance de très bonne précision (ARRV70 OHAUS) 0.001 g ont été effectuées les mesures de poids. Chaque cylindre de liège est de masse varié entre 2,324 g et 3,489 g.

Suite à une série exhaustive d'expérimentations et de mesures méticuleuses, nous avons réussi à déterminer la densité moyenne du matériau poreux lorsqu'il est complètement sec ρ_{moy} = 154,2814 kg/m^3.

Tableau IV.2 : Comparaison entre la densité moyenne des échantillons et les valeurs de densité rapportées dans la littérature.

Échantillon Masse	Volume ($10^{-9}m^3$)	Masse (10^{-3} kg)	Masse volumique (kg/m^3)
1	20451,3	3,084	150,7972
2	20220,4	2,324	114,9337
3	20452,2	3,308	161,7426
4	20437,4	3,390	165,8720
5	20253,9	3,278	161,8451
6	20397,7	3,161	154,9682
7	20794	3,162	152,0630
8	19889	3,083	155,0099
9	20349,7	3,489	171,4522
10	20278,4	3,121	153,9076

IV.3.4.3 Étude physico-chimique du liège par (FTIR).

Les spectres FT-IR (Figure IV.9) [130] montre la comparaison de liège traité et de liège à l'état naturel. Les deux courbes ont des pics et des creux à des nombres d'onde similaires, mais leurs intensités varient. La courbe bleue représente le liège naturel et la courbe rouge représente le liège qui subit un traitement thermique. Le liège traité présente à une diminution de l'absorbance par rapport au liège naturel cela peut indiquer une réduction des groupes esters dans la subérine du a un traitement thermique contrairement le liège naturel présente une absorbance supérieure, cela peut signifier qu'il contient plus de groupe fonctionnels qui absorbe la lumières infrarouge

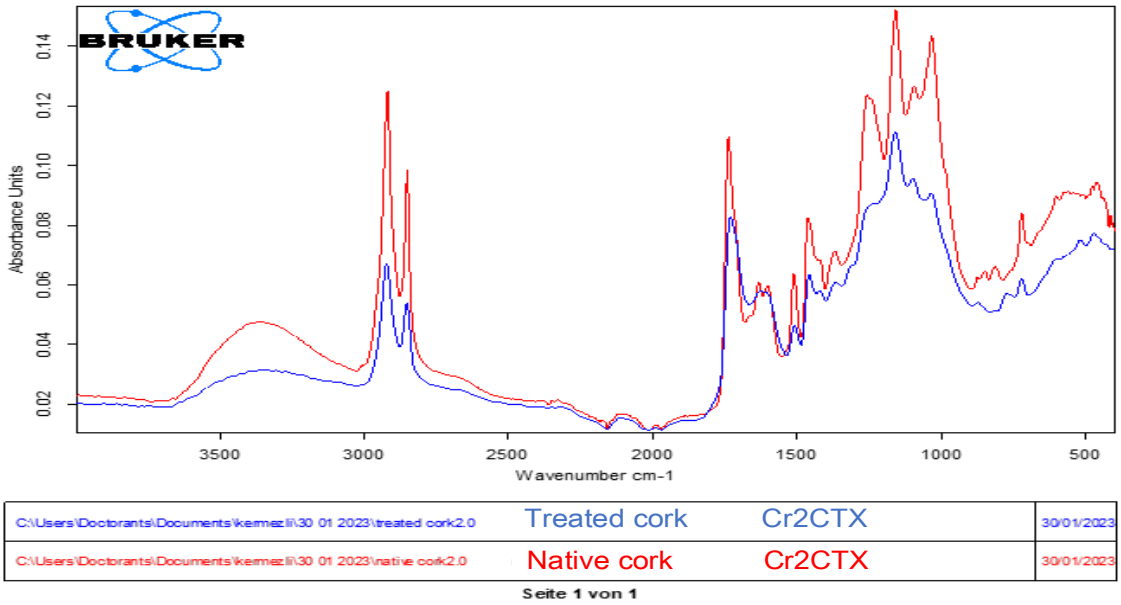


Figure IV.9 : IR-FT Le spectre des échantillons de liège naturels et traités.

IV.3.5 Détermination du coefficient de diffusion massique apparent (D_{app})

Le coefficient de diffusion massique apparent est utilisé pour évaluer la vitesse à laquelle les substances se propagent à travers le liège, en tenant compte des éventuels obstacles et interactions présents dans le matériau. Ce coefficient peut être déterminé expérimentalement en mesurant les variations de concentration des espèces à travers le liège au fil du temps. Les différentes étapes impliquées dans le calcul sont visualisées dans schéma suivant (Figure IV.10).

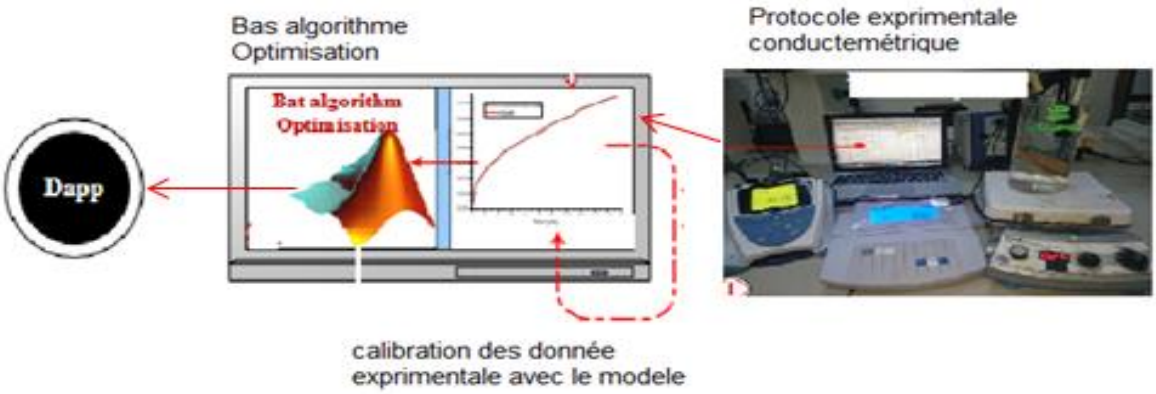


Figure IV.10 : Schéma de procédure

IV.3.5.1 Méthode conductimétrique

Les échantillons préparés selon les paramètres de forme dont les directions radiale longitudinale et tangentiel, la zone et la nature sont imprégnés sous vide avec le soluté (NaCl) 0.7 M avec le protocole de la figure suivante:



Figure IV.11 : Photo de la plaquette du liège étudiée

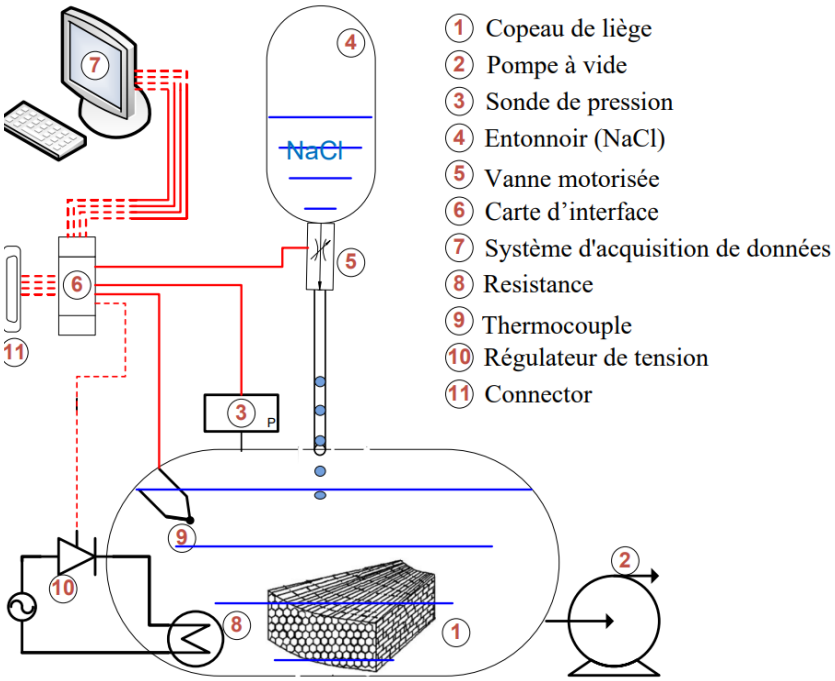


Figure IV.12 : Schéma représentant le procédé d'imprégnation sous vide.

Le suivi de l'évolution de la concentration diffusante de l'espèce chimique en régime transitoire (Figure IV.12). Elle consiste à introduire l'échantillon imprégné auparavant dans un volume de 1000 ml d'eau distillée et ionisée pour être soumis à une vitesse d'agitation de 120 tr/min. Apres l'étalonnage du conductimètre (CONSORT C832) en commence à relever les conductivité qui sont initialement nulle, en poursuivre le relevé après l'introduction du copeau dans la solution. L'acquisition de cette mesure est réalisée au moyen d'une interface informatique élaborée par les ingénieurs de l'Université de Médéa, laquelle permet d'afficher en temps réel les données expérimentales recueillies sous forme graphique (figure IV.13).

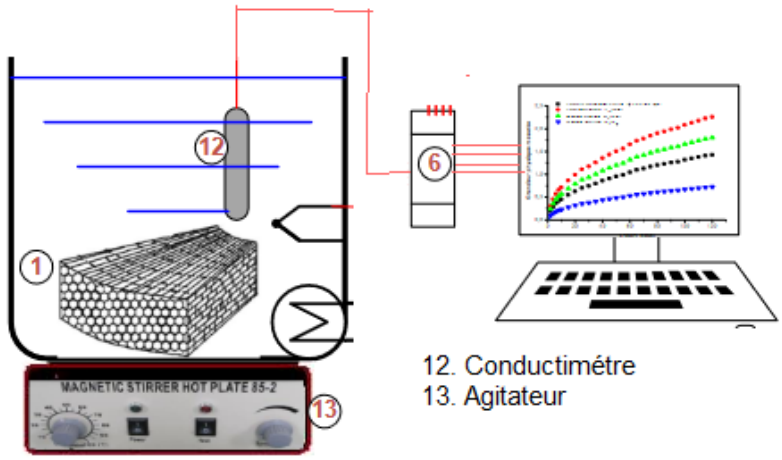


Figure IV.13 : Représentation graphique de l'équipement de mesure de la concentration.

Dans le processus d'évaluation du coefficient de diffusion, il est nécessaire de calculer la concentration du soluté relâché à l'état d'équilibre m_∞ (mol) pour des durées considérablement prolongées (160 minutes). Cette valeur est approximée en utilisant l'expression qui suit :

$$m_\infty = c_0.(\boldsymbol{\upsilon}_{sol})_{échantillon} = C_0.\varepsilon_H.e_H.S_H \qquad \text{VI.1}$$

En considérant que l'état stationnaire est atteint, ce qui conduit à une concentration d'équilibre du milieu (en mM) est :

$$\boldsymbol{C}_\infty = \frac{\boldsymbol{m}_\infty}{\boldsymbol{\upsilon}_{sol}} \qquad \text{VI.2}$$

Où c_0, L'intensité de la concentration de soluté initial dans le copeau (exprimée en mol/L) ; e_H : La dimension en épaisseur du copeau imprégné d'humidité. (cm) ; S_H : La superficie latérale du coupeau humide en (cm^2) ; ε_H : La porosité de l'échantillon dans son état humide ; $\boldsymbol{\upsilon}_{sol}$: La quantité de liquide de la solution (mesurée en litres) où l'objet est immergé.

La détermination expérimentale de la substance relâchée au temps t $(m_t)_{exp}$ à partir de la mesure instantanée de la concentration $(c_t)_{exp}$ en recourant à la formulation ci-dessous

$$(m_t)_{exp} = (C_t)_{exp}.\upsilon_{sol} \qquad \text{IV.3}$$

Avec

$$C_t = \frac{conductivité\ instantannée\ corregée}{conductivité\ du(cation+Anion)} = \frac{\sigma_{ct}}{126{,}45} \qquad \text{IV.4}$$

IV.3.5.2 Modélisation mathématique

Pour la modélisation on recoure a un bilan massique introduisant les hypothèses simplificatrices avec les conditions initiale et aux limites a donné : L'équation de conservation de la masse devient simplifiée à :

$$\text{Terme D'accumulation} \quad - \quad \text{Terme de diffusion} \quad = \quad 0$$

IV.5

Soit

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} - D_{iapp}\left(\frac{\partial^2 c_i(\zeta,t)}{\partial \zeta^2} - \frac{\beta}{\zeta}.\frac{\partial c_i(\zeta,t)}{\partial \zeta}\right) \qquad \text{IV.6}$$

Où C_i est la concentration de l'espèce chimique diffusante (i) (en mol/m³), le temps de diffusion est noté t (en secondes), et ζ est utilisé comme une coordonnée spatiale (ζ = x ζ = r : coordonnée axiale et radial à partir du centre du copeau. La constante β dépend de la géométrie du composite, prenant la valeur de 0 dans le cas d'une structure plane, avec une épaisseur (2l).D'après les conditions appliquées on aura le système suivant :

$$\begin{cases} D_{iapp}\dfrac{\partial^2 c_i(x,t)}{\partial x^2} - \dfrac{\partial c_i(x,t)}{\partial t} = 0 \\ c_i(x,t)\Big|_{t=0}^{x>0} = c_{io} \\ c_i(x,t)\Big|_{t>0}^{x=l} = c_{ip} \\ \dfrac{\partial c_i(x,t)}{\partial x}\Big|_{t>0}^{x=0} = 0 \end{cases} \qquad \text{IV.7}$$

Dans le processus de résolution de l'équation du modèle, nous supposons que la concentration à la surface du copeau est C_{ip}.

En appliquant la transformée de Laplace, on peut exprimer la variation de la concentration de l'espèce diffusante par la résolution de l'équation aux dérivées partielles. L'expression analytique associée est donnée par :

$$\frac{c_i(x,t)-c_{io}}{c_{ip}-c_{io}} = 1 - \frac{4}{\pi}\sum_{n=0}^{\infty}\left\{\frac{(-1)^n}{(2n+1)}\cos\left(\frac{(2n+1).\pi}{2l}.x\right).\exp\left(-\frac{(2n+1)^2.\pi^2.D_{iapp}}{4l^2}.t\right)\right\} \quad \text{IV.8}$$

Sachant que

$$\frac{m_t}{m_\infty} = \frac{c_t}{c_\infty} \quad \text{IV.9}$$

L'étude est fait par une symétrie de la surface diffusante centrale du copeau (x = l), L'évolution de la masse de l'élément en diffusion au cours du temps est formulée par :

$$\frac{m_t}{m_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\left\{\frac{1}{(2n+1)^2}.\exp\left(-\frac{(2n+1)^2.\pi^2.D_{iapp}}{4l^2}.t\right)\right\} \quad \text{IV.10}$$

Un programme Matlab a été développé pour effectuer l'ajustement des données expérimentales à l'expression analytique de la solution dérivée du modèle, en tenant compte les paramètres (zone direction et nature) expérimentale pour chaque cas.

IV.3.5.3 Optimisation par Bat-Algorithme

Dans la dernière étape de la détermination de Dapp, l'ajustement du modèle aux données expérimentales est suivi d'une exploration d'une approche d'optimisation précise, inspirée des comportements naturels et des techniques génétiques [131 ,132]. l'algorithme des Chauves-souris (Bat Algorithme) se distingue comme l'un des méthodes de résolution innovantes développés en 2010 par Yang Xin-She [134]. Ces représentations et algorithmes sont cruciaux scientifiquement et pratiquement, cherchant à réduire l'erreur entre la fonction de transfert et les données mesurées [135 ,136], visant à estimer D_{app} en corrélant le schéma de transfert de masse avec les résultats expérimentaux.

L'objectif est d'optimiser la correspondance entre les prédictions du modèle et les données expérimentales pour obtenir une estimation précise de D_{app}.

Le Bat Algorithme utilise divers mécanismes comme l'ajustement de la fréquence et la modulation du volume sonore pour guider la recherche de solutions. En permettant aux "chauves-souris virtuelles" d'explorer les régions prometteuses, il optimise le calage du modèle de transfert de masse avec les données expérimentales, améliorant la précision des résultats de recherche.

L'utilisation de la fréquence guide les mouvements des chauves-souris de manière adaptable, tandis que l'ajustement du niveau sonore et de la fréquence des impulsions équilibre l'exploration et l'exploitation. Le Bat Algorithm, simple et flexible, est applicable à divers problèmes d'optimisation dans des domaines variés tels que la classification et la planification [136].

Cet algorithme repose sur des règles fondamentales [121]:

1. L'accord de fréquence : Les chauves-souris ajustent leur fréquence d'émission des pulsations pour explorer différentes zones de l'espace de recherche. Les chauves-souris avec des fréquences plus élevées ont plus de chances d'explorer de nouvelles solutions.
2. Le volume sonore (loudness) : Le volume sonore contrôle l'intensité des pulsations émises par les chauves-souris. Les chauves-souris avec un volume sonore plus élevé ont une probabilité plus élevée de trouver des solutions prometteuses.
3. L'émission d'impulsion : Les chauves-souris émettent des impulsions pour communiquer entre elles et partager les informations sur les solutions. Cela permet d'exploiter collectivement les connaissances acquises et de guider la recherche vers des solutions plus optimales.

En utilisant l'algorithme BA, nous avons appliqué notre modèle aux résultats expérimentaux en utilisant une gamme de fréquences en prenant comme point central la valeur du coefficient (±10%) * D_{app}, qui a été déterminée par ajustement. Cela est conforme à l'organigramme présenté dans la figure IV.14. Grâce à cette approche, nous avons abouti à l'obtention d'un coefficient de diffusion d'une extrême précision, présentant une variation d'environ 10^{-7}.

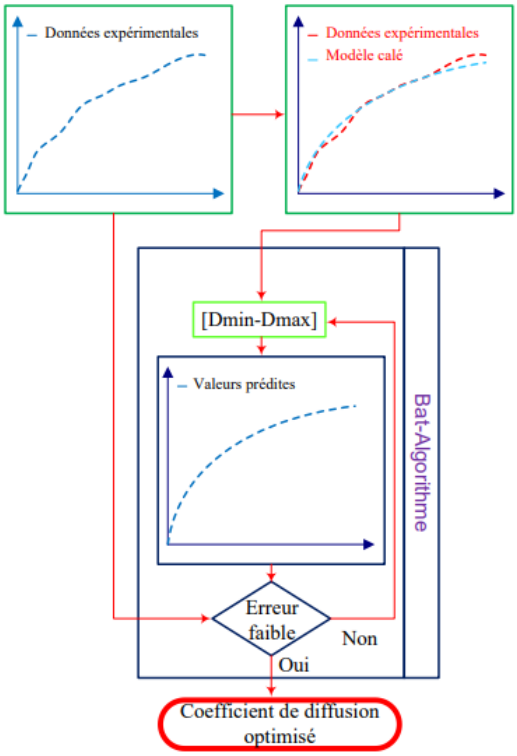


Figure IV.14 : Optimisation par algorithme des chauves-souris (BAT-ALGORITHME).

IV.3.6 Conclusion

La méthodologie expérimentale adoptée dans cette étude offre une approche complète et rigoureuse pour évaluer la diffusion du liège, un processus influencé par une multitude de paramètres. En combinant des techniques analytiques telles que la thermogravimétrie (TGA), la microscopie électronique à balayage (MEB) et la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), nous avons pu obtenir des données précises et détaillées sur les caractéristiques de diffusion du matériau. Cette approche multidisciplinaire nous a permis d'explorer en profondeur les mécanismes de diffusion du liège et d'identifier les facteurs clés influençant ce processus.

Chapitre V

Résultats et Discussion

V.1 Introduction

Le présent chapitre focalise sur l'estimation du comportement mécanique du liège traité à différentes paramètres par le biais de Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) et de la Méthode des Plans d'Expériences (DOE) après détermination expérimentales des coefficients de diffusion. À travers cette section, nous allons examiner en détail les résultats obtenus lors de notre investigation, ainsi que les implications et les interprétations qui en découlent.

La combinaison novatrice de l'utilisation des RNA et de la DOE offre une approche robuste et précise pour prédire le comportement mécanique du liège, ouvrant ainsi la voie à une meilleure compréhension de ses propriétés et de ses performances.

Cette analyse des résultats nous permettra de discuter des tendances observées, des facteurs influençant le comportement mécanique du liège, et des implications pratiques de nos directives. Globalement, ce chapitre vise à fournir une perspective complète sur les résultats de notre étude, tout en ouvrant la voie à des discussions approfondies sur l'utilisation des RNA et de la DOE dans l'estimation du comportement mécanique du liège.

V.2 Expérimentales

V.2.1 Isolation sous l’effet du traitement

L'analyse des graphes (Figures V.1, V.2) révèle une tendance significative dans la variation de la concentration en fonction du temps entre les échantillons de liège à l'état natif et ceux ayant subi un traitement, comme illustré respectivement par les courbes noires et rouges. Il est clair, à travers les trois graphiques, que le liège traité présente une diffusion plus lente par rapport au liège à l'état naturel, ce qui se traduit par une différence marquée dans leur comportement de diffusion.

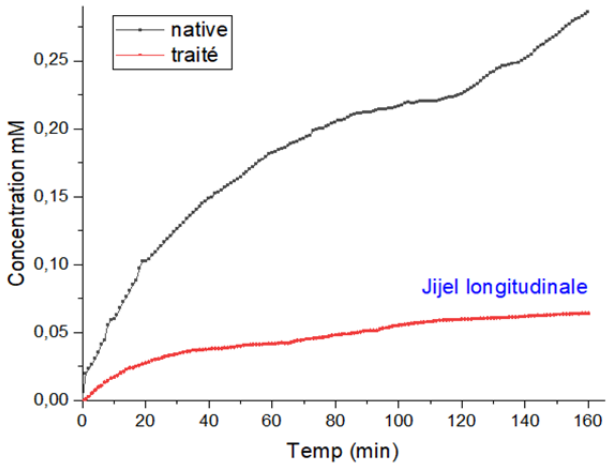


Figure V.1: Variation de la concentration en fonction de l'état du liège.

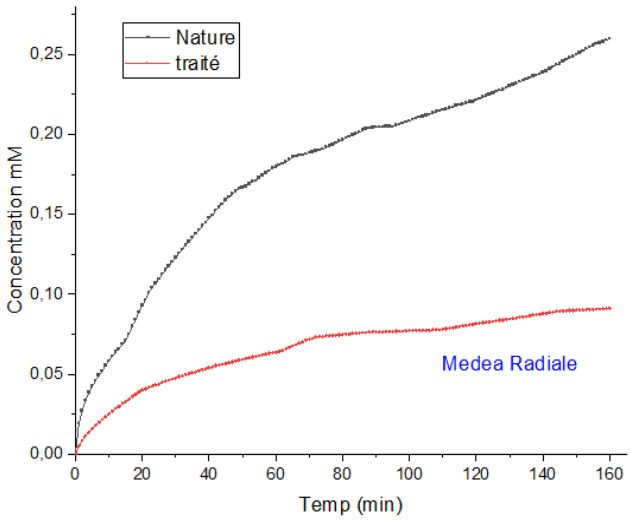


Figure V.2: Variation de la concentration en fonction de l'état du liège.

Cette différence de diffusivité entre les échantillons peut être attribuée à une variété de facteurs, y compris les changements structuraux induits par le traitement, les interactions entre les composants du liège et les modifications de la surface. Il est également important de noter que cette réduction de la diffusivité peut être bénéfique dans certains contextes, en offrant une meilleure résistance aux processus de diffusion indésirables ou en améliorant la durabilité du matériau dans des environnements spécifiques.

V.2.2 Isolation sous l'effet de la Zone de récolte

Les graphiques (Figure V.3 et V.4) présentent l'impact des zones de récolte du liège sur la diffusion massique en suivant la variation de la concentration en fonction de temps. Les données indiquent une diffusion moins prononcée pour les échantillons de Jijel et celle de skikda .

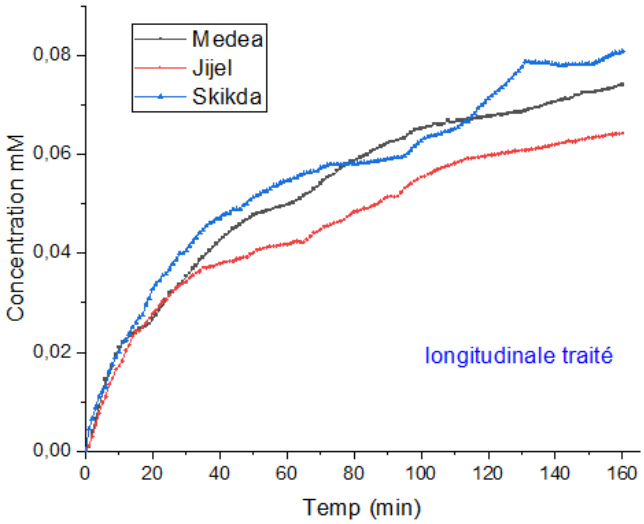


Figure V.3 : Variation de la concentration en fonction de la zone de récolte du liège.

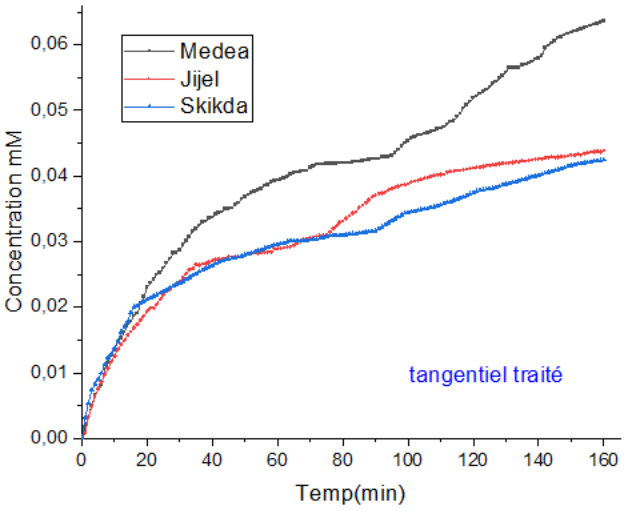


Figure V.4: Variation de la concentration en fonction de la zone de récolte du liège.

V.2.3 Isolation sous l'effet de la Direction de coupe

Les figures V.5 et V.6 illustre l'influence de la direction de coupe sur la diffusivité du liège. Les deux graphiques présentent des échantillons distincts et mettent en évidence que le liège coupé tangentiellement présente une diffusivité réduite. Cela signifie que les coupes sont faites parallèlement aux couches de croissance du liège. Cette méthode de coupe réduit la perméabilité du matériau, ce qui diminue sa capacité à permettre la diffusion. En revanche, pour les coupes radiales, c'est-à-dire perpendiculairement aux couches de croissance, cela crée des voies de diffusion plus efficaces à travers le matériau, favorisant ainsi une diffusivité plus élevée.

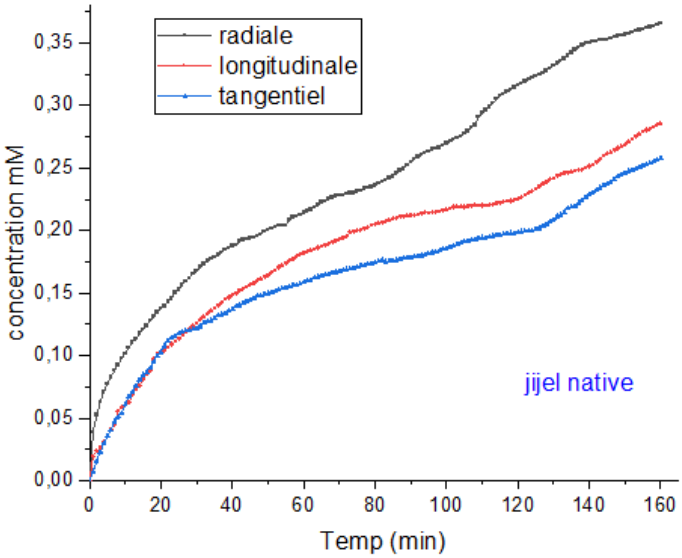


Figure V.5 : Variation de la concentration en fonction de la direction de coupe du liège.

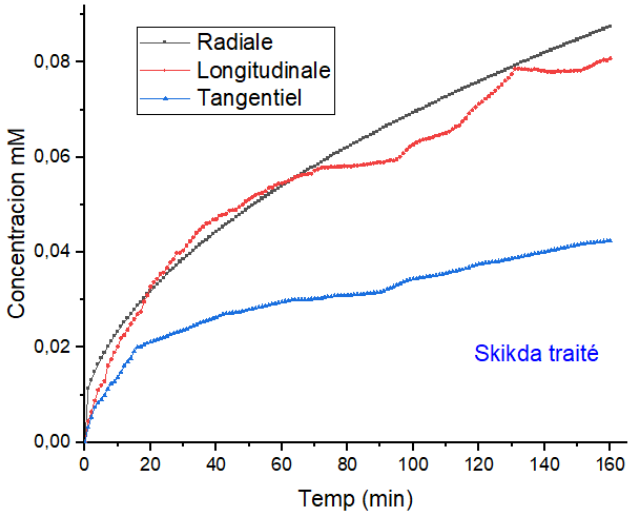


Figure V.6 : Variation de la concentration en fonction et de la direction de coupe du liège.

V.2.4 Validation du modèle

Les résultats expérimentaux avec le modèle de diffusion démontre un excellent accord entre le profil expérimental de concentration instantanée de l'électrolyte et celui prédit par le modèle, comme illustré dans la figure V.7, figure V.8 et figure V.9. Cette concordance témoigne de la capacité du modèle à décrire fidèlement les phénomènes de transfert de masse dans l'échantillon de liège.

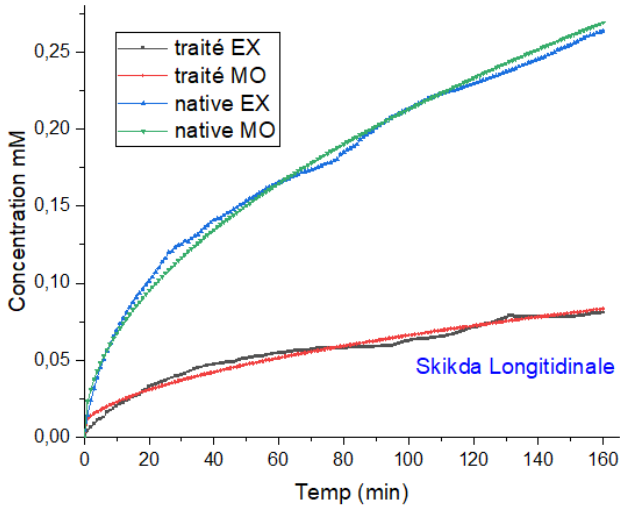


Figure V.7 : Calage des résultats expérimentaux avec le modèle de diffusion.

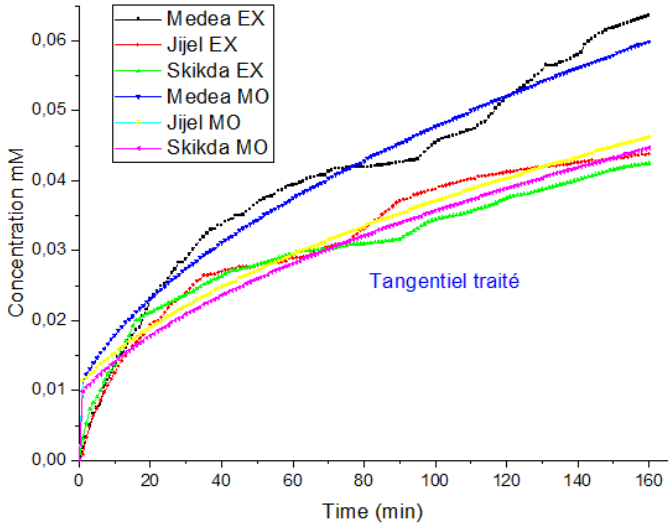


Figure V.8 : Calage des résultats expérimentaux avec le modèle de diffusion dans les 3 zones.

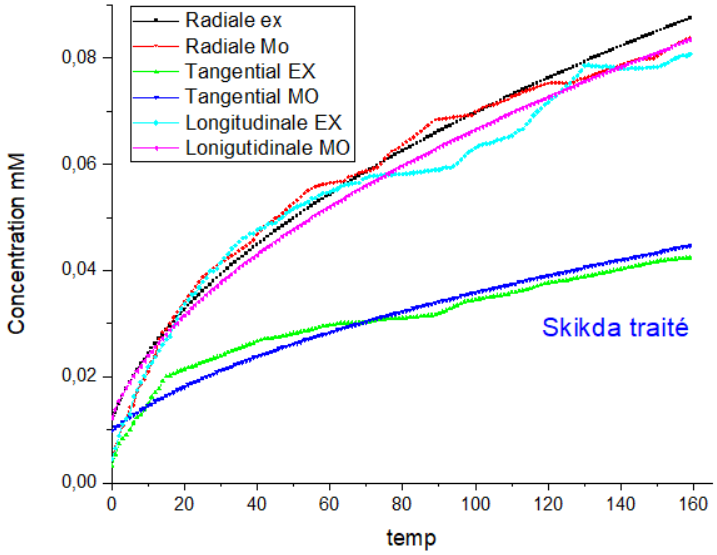


Figure V.9 : Calage des résultats expérimentaux avec le modèle de diffusion.

V.3 Modélisation neuronale

Le développement du modèle ANN dont la base expérimentale qui contient 2880 (matrice 160x18) est réparti en 70% pour l'apprentissage, 15% pour validation et 15% pour les tests, a dégagé des paramètres d'une architecture qui comporte 5 neurones à l'entrée et 1 neurone à la sortie et avec les paramètres de modélisation suivante :

V.3.1 Nombre de couches cachées

On a testé le réseau avec plusieurs architecture avec le nombre de couche cachée est de 1 et 2 dont le nombre de neurone varie de 4 à 6. La figure V.10 montre l'impact des couches cachées sur les performances du réseau neuronal, la valeur de R^2 augmente avec l'augmentation du nombre de neurone jusqu'à 6 neurones la valeur atteint le maximum et que le R^2 maximal était de 0.9992, obtenu pour 2 couches cachées dans le réseau.

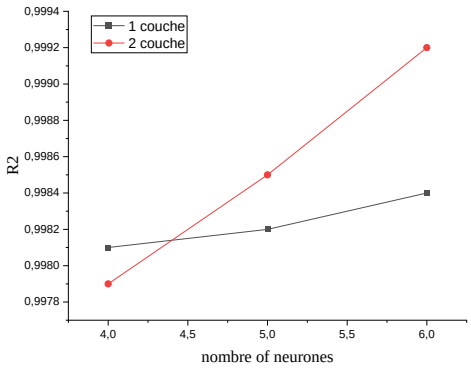


Figure V.10 : Détermination du nombre de couches cachées en fonction de R^2.

V.3.2 Nombre de neurones

Les figures V.11 et V.12 montrent la performance de formation du réseau en termes de R^2 et de RMSE d'un réseau varie de 5 à 15 neurones.

Le R^2 le plus élevé a été obtenu pour 5 et 13 neurones dans la couche 1 et 2 successivement, soit 0.9998. La tendance est d'augmenter le nombre de neurones dans la couche cachée pour avoir des résultats précis.

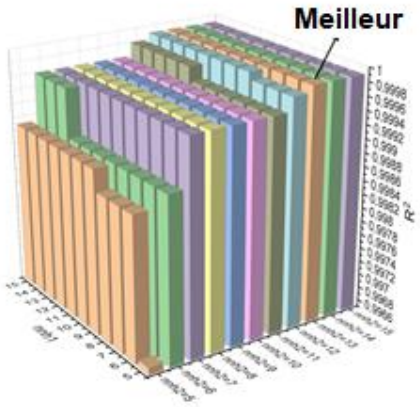


Figure V.11 : Optimisation de R^2 en fonction de l'architecture de réseau.

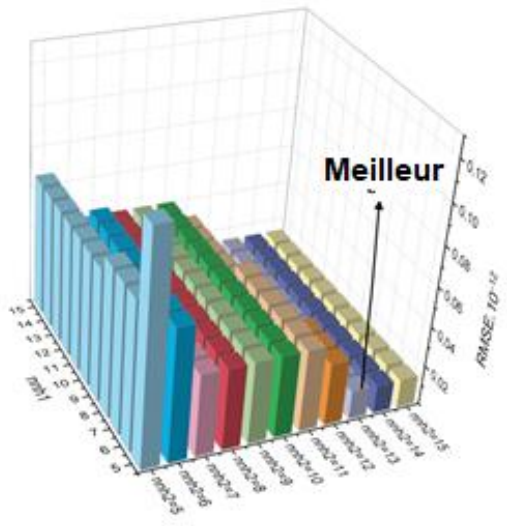


Figure V.12 : Variation de RMSE en fonction de L'architecture de réseau.

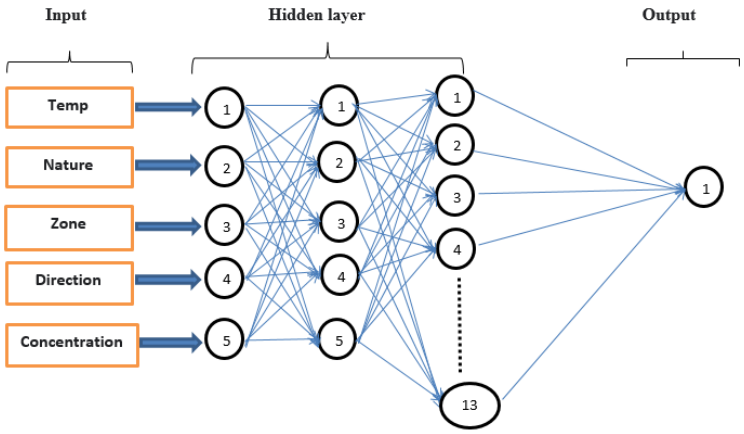


Figure V.13 : Architecture du réseau.

D'après les résultats présentés sur les figures 11 et 12, il s'est dégagé que l'architecture optimale pour notre modèle neuronal est (5-5-13-1) (Figure V.17**)**. Le tableau 2 résume les paramètres mis en jeu pour la détermination du modèle optimisé obtenu par ANN.

Tableau V.1 : Caractérisation des RNA adopté.

Network type	Algorithm	Input layer	Hidden layer 1		Hidden layer 2		Output layer	
		Neurons number	Neurons number	AF	Neurons number	AF	Neurons number	AF
FFBP NN (newff)	SCG (trainscg)	5	5	purelin	13	purelin	1	trainlm

V.3.3 Réseau optimal

La figure V.14 monte la performance du réseau dans le cas de 3 epoch est de 0.038146, le modèle ANN optimal était composé de 2 couches cachées avec de nombreux neurones (5-5-13-1).

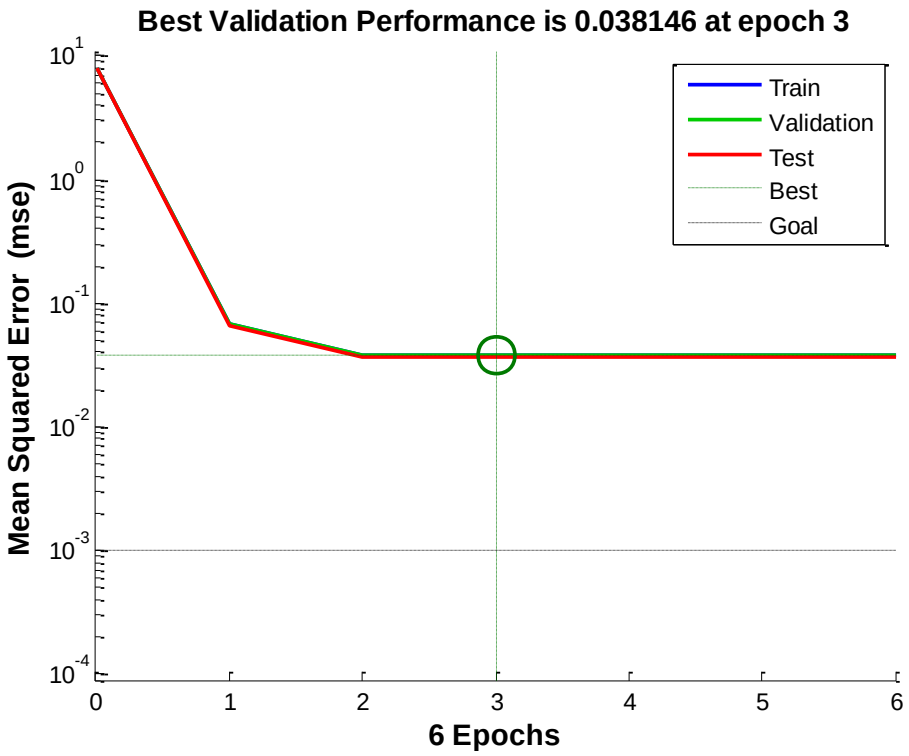


Figure V.14 : Courbe de performance.

Les courbes de la figure V.15 représente une analyse de régression comparant les sorties prédites (Y) aux valeurs cibles réelles :

- **Graphique d'apprentissage (Training) :** Ce graphique montre la performance du modèle sur l'ensemble d'apprentissage (données utilisées pour entraîner le modèle), La corrélation R est de 0,91197, ce qui indique une forte relation linéaire positive entre les prédictions et les valeurs réelles.
- **Graphique de validation et de test:** Ces graphiques montrent la performance du modèle sur un ensemble de données de validation et de test (données non utilisées pendant l'entraînement). La corrélation R de validation et de teste égale 0,91012 et 0,91371 successivement, ce qui confirme une forte relation linéaire positive entre les prédictions et les valeurs réelles.
- **Graphique global (All) :** Ce graphique combine toutes les données (apprentissage, validation et test) pour évaluer la performance globale du modèle. La corrélation R est de 0,91195, ce qui suggère encore une fois une forte corrélation entre les prédictions et les valeurs réelles. Plus les lignes en pointillés et solides sont proches l'une de l'autre, la capacité du modèle à prédire les nouvelles données est meilleure. Les valeurs R élevées indiquent que le modèle a une bonne capacité prédictive.

Cependant, dans cette étude, le modèle développé peut être utilisé pour prédire le coefficient de diffusion pour n'importe quelle qualité de liège (nature, direction de coupe et la zone d'élevage) dans la plage donnée des paramètres d'entrée utilisés pour former le réseau.

L'inclusion de plusieurs paramètres d'entrée différents, comme dans cette étude, peut aider à définir le processus et ainsi présenter un modèle généralisé ou universel pour prédire la performance d'isolation du liège.

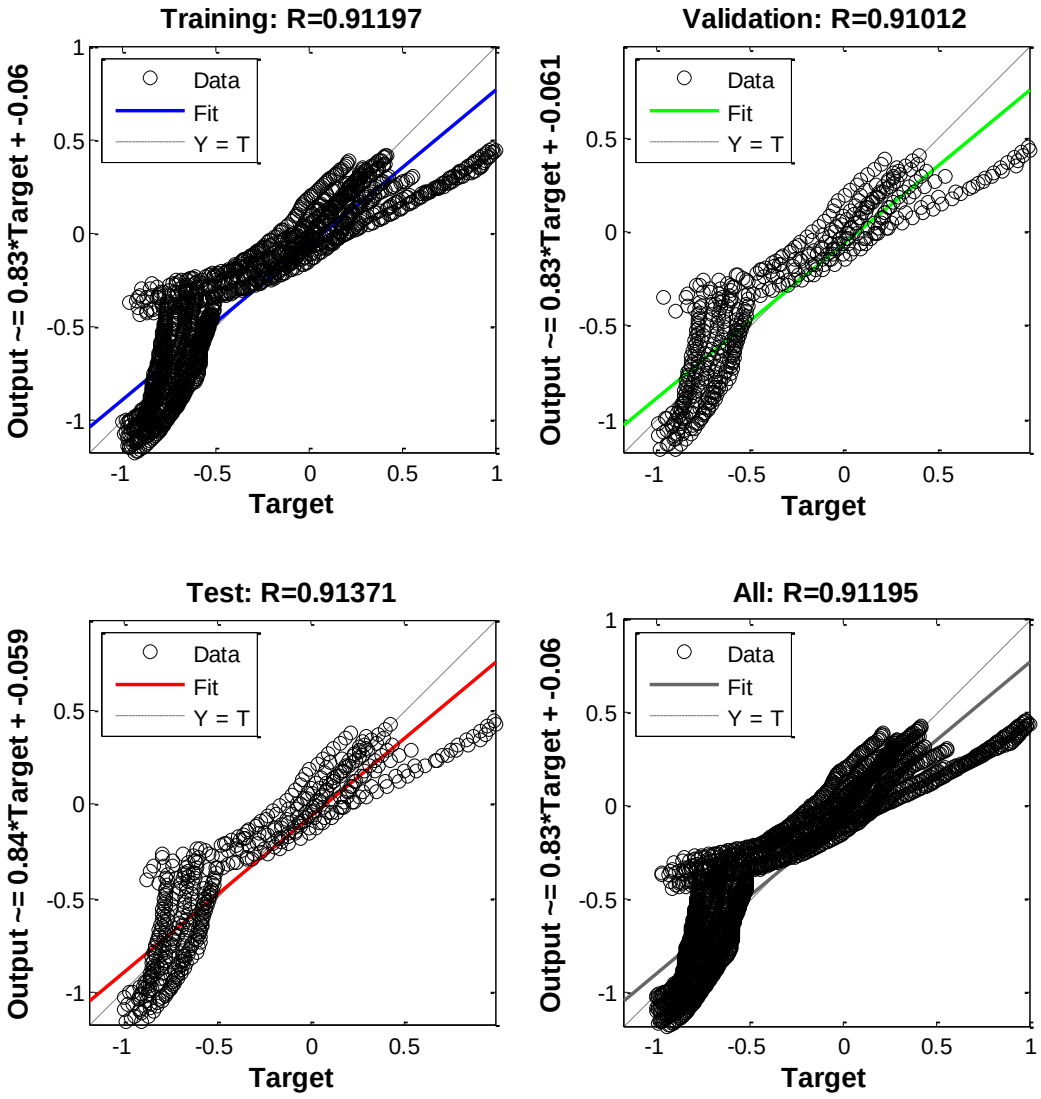


Figure V.15: Graphiques de régression.

V.4 Approche de la théorie des plans d'expériences

Etant donnés que les trois facteurs retenus dans le cadre de cette étude sont tous de nature qualitative, alors on a approché leur influence sur le coefficient de diffusion par le recours à la théorie des plans d'expériences où on leur a affecté abstraitement des niveaux distincts lors de leur couplage. Suite à la combinaison des facteurs deux à deux, ce couplage conduit à l'établissement de trois modèles complets qui s'y rapportent. Ainsi, un modèle complet à trois facteurs et deux niveaux est testé pour discerner l'effet de chaque facteur et des interactions. Il se dégage que le modèle général est de la forme linéaire:

$$\mathfrak{D}_{i,App} = a_0 + a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + a_3 * x_3 + a_{12} * x_1x_2 + a_{13} * x_1x_3 + a_{23} * x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3 + \varepsilon \qquad \text{V.1}$$

où a_i est l'effet du facteur i, alors que a_{ijk} sont les interactions supérieures des facteurs i, j et k. La détermination de leurs valeurs respectives est obtenue en exploitant les expériences ciblées par la matrice d'expériences. On précise que chaque modèle se concentrerait sur deux niveaux et trois facteurs spécifiques en explorant une partie spécifique de l'espace des facteurs pour appréhender leur impact respectif et faciliter l'interprétation des résultats obtenus. Il en sort qu'on doit dégager trois matrices distinctes pour réaliser, de façon optimale, les 24 expériences pour l'estimation, pour chaque combinaison, les coefficientsa_i, a_{ij} et a_{ijk}. Ayant procédé par codage des facteurs, la matrice d'expériences est donnée par le tableau I.

Tableau V.2 : Matrice d'expériences

Ordre de l'expérience	I	x_1	x_2	x_3	$x_1 * x_2$	$x_1 * x_3$	$x_2 * x_3$	$x_1 * x_2 * x_3$	$(\mathfrak{D}_{App})_i$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	$(\mathfrak{D}_{App})_1$
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	$(\mathfrak{D}_{App})_2$
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	$(\mathfrak{D}_{App})_3$
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	$(\mathfrak{D}_{App})_4$
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	$(\mathfrak{D}_{App})_5$
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	$(\mathfrak{D}_{App})_6$
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	$(\mathfrak{D}_{App})_7$
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$(\mathfrak{D}_{App})_8$

Les coefficients a_i, a_{ij} et a_{ijk} sont facilement calculés en utilisant les résultats expérimentaux $(\mathfrak{D}_{App})_i$ consignés dans le tableau V.3. Dans la partie de définition de facteurs, on rappelle que l'étude porte sur la combinaison de:

1) facteurs géographiques (lieux de plantation) à savoir Jijel, Médéa et Skikda ;
2) facteurs liés à la direction de coupe de l'échantillon de liège (radiale, longitudinale et tangentielle) ;
3) facteurs se rapportant au traitement thermique ou non du copeau.

Par ailleurs, la diffusivité $\mathfrak{D}_{App}$ est déterminée par voie expérimentale, en utilisant la méthode conductimétrique d'une part, et par calage de tels résultats par l'équation obtenue par résolution de diffusion de Fick établie en régime non stationnaire d'autre part.

Par ailleurs, il y a lieu de mentionner que le dépouillement des résultats de l'analyse par la méthode des plans d'expériences et particulièrement l'analyse de significativité de la régression, par la technique de l'ANOVA, implique la répétition des expériences aux points délimitant le domaine d'expérimentation. Toutefois, le recours à certaines hypothèses permet d'alléger considérablement cette analyse. Principalement, ces Quatre hypothèses sont souvent citées dans la littérature.

- **Hypothèse 1** les interactions d'ordre trois et toutes celle d'ordre plus élevé peuvent être négligées.
- **Hypothèse 3** Si deux facteurs sont fort, on se méfiera de leur interaction qui peut être forte.
- **Hypothèse 4** Si deux facteurs sont forts, on suppose que leur interaction l'est aussi
- **Hypothèse 5** Un facteur principal faible et un facteur principal fort engendrent le plus, souvent mais pas toujours, une interaction faible.

On rappelle que l'ordre d'expérimentation est totalement défini par la matrice d'expériences où on a retenu un plan factoriel complet à deux niveaux et à trois facteurs. Ayant défini les facteurs expérimentaux qualitatifs (zone de plantation, direction de coupe, l'état du copeau traité ou non) d'une part et après avoir identifié les expériences à réaliser par le biais de la matrice d'expériences d'autre part, nous avons dénombré trois séries de matrices d'expériences où nous avons suivi l'évolution temporelle de la concentration. Par conséquent et à titre d'illustration on présente l'évolution de la concentration avec le temps pour l'expérience classée d'ordre 3 et 6 pour chaque série d'expériences où on a regroupé les

résultats qui s'y rattachent. On note que les expériences sont subdivisées en trois sous-groupes, définis par trois matrices d'expériences différentes alors qu'on projette l'analyse de l'interaction entre les différents facteurs, à savoir la zone de plantation, la direction de coupe et l'état de l'échantillon du liège (natif ou traité). Pour chaque facteur, on a affecté deux niveaux, définis par leur codage soit -1 et +1.

V.4.1 Première série d'expériences

Dans le Tableau V.3, nous avons défini les facteurs ainsi que leur codage en vue d'étudier leur impact sur le coefficient D_{app}. Les données expérimentales se rapportant à l'évolution de la concentration en NaCl dans le milieu aqueux, peuvent être scrutées dans la Figure V.16. Il y a lieu de mentionner que les trois facteurs sont dénotés A, B et C respectivement.

Tableau V.3 : Codage des facteurs influençant la diffusivité apparente, Dapp.

Zone de plantation (A)	Direction de coupe (B)	Etat du copeau de liège (C)
Médéa (+1)	Radiale (+1)	Traité(+1)
Jijel (-1)	Longitudinale(-1)	Natif(-1)

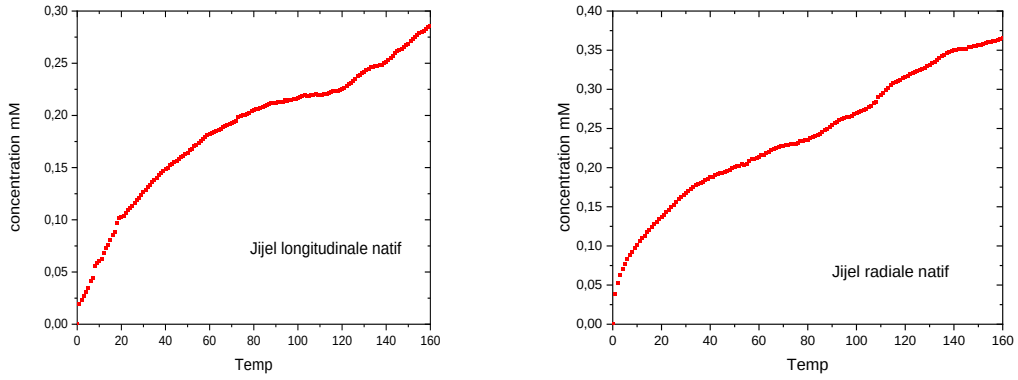


Figure V.16 : Evolution de la concentration de l'espèce i (milli-moles/litre) avec le temps pour les expériences portant les ordre 3 et 6.

Pour le calcul du coefficient D_{app}, on précise qu'il est facilement estimable par calage de ces résultats expérimentaux à la solution analytique de l'équation de diffusion de Fick. Les valeurs, ainsi obtenues, sont consignées dans le tableau V.4.

Tableau V.4 : Evolution de la concentration de l'espèce i (moles/litre) avec le temps et l'ordre d'expérimentation du modèle 1

t(mn) / Ordre d'expérience	t=0	t=5	t=50	t=75	T=100	T=130	t=160	$10^{+13} * \mathfrak{D}_{App}$
1	1,076	9,841	40,149	4,631	55,389	60,727	64,250	2,62
2	0,789	11,734	47,677	56,700	65,149	68,477	73,941	3,93
3	19,694	35,137	164,361	200,058	216,888	241,708	285,596	36,00
4	16,765	8,196	152,075	175,247	190,431	210,517	238,987	29,00
5	4,967	15,929	59,178	73,788	77,111	84,613	91,139	4,57
6	39,040	77,480	200,554	230,901	269,722	331,608	365,259	50,70
7	4,855	15,708	58,524	72,988	76,278	83,705	90,166	4,50
8	18,979	42,388	166,667	191,899	208,494	230,383	259,747	34,00

V.4.2 Deuxième série d'expériences

Dans une logique identique d'analyse et de présentation de résultats, on s'est conformé aussi bien au codage de facteurs de cette deuxième série de facteurs à travers le tableau V.5 d'une part, et en suivant l'évolution de la concentration de l'espèce diffusante (molécule de NaCl) ainsi que le coefficient D_{app} estimés via le tableau V.6.

Tableau V.5 : Codage des facteurs influençant la diffusivité apparente, D_{app}

Zone de plantation (A)	Direction de coupe (B)	Etat du copeau de liège (C)
Médéa (+1)	Radial(+1)	Traité(+1)
Skikda (-1)	Tangentiel(-1)	Native(-1)

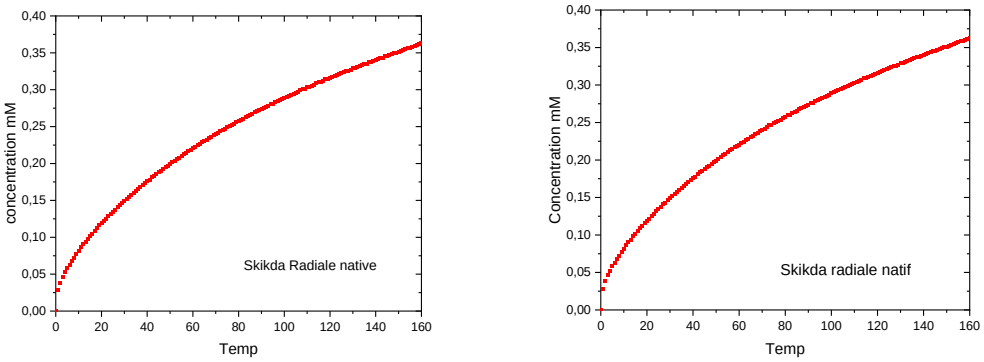


Figure V.17 : Evolution de la concentration de l'espèce i (milli-moles/litre) avec le temps pour les expériences portant les ordre 3 et 6.

Tableau V.6. : Résultats expérimentaux de l'évolution de la concentration et coefficient de diffusion apparent.

t(sec) / Ordre d'expérience	t=0	t=5	t=50	t=75	t=100	T=130	t=160	$10^{+13} * \mathfrak{D}_{App}$
1	18,979	42,388	166,667	191,899	208,494	230,383	259,477	34,00
2	6,673	30,030	119,452	158,958	190,857	223,423	236,236	26,00
3	3,183	9,052	7,987	30,656	34,408	38,755	42,426	1,51
4	1,727	7,460	36,805	41,858	45,341	55,745	63,559	2,10
5	11,385	17,709	49,345	57,982	69,344	57,982	87,492	5,95
6	28,261	058,064	199,372	177,747	288,782	237,163	362,776	62,30
7	4,967	15,929	59,178	073,788	77,111	84,613	91,139	4,57
8	1,472	38,110	129,298	152,587	172,992	195,546	222,748	22,50

V.4.3 Troisième série d'expériences

Cette série d'expériences est programmée pour boucler l'analyse de l'effet des facteurs, prévus dans cette étude, sur le coefficient de diffusion tout en suivant la variation de la concentration en NaCl dans le milieu aqueux où est plongé le copeau saturé. Le suivi de la concentration, et dans le même esprit, nous avons présenté graphiquement et dans le tableau suivant après avoir codé les trois facteurs. La Figure V.18 et les tableaux V.7 et 8 regroupent le codage de facteurs et l'évolution de la concentration de l'espèce diffusante dans le temps

ainsi que le coefficient D_{app} obtenu en appliquant le Bat algorithme suite au calage de données expérimentales.

Tableau V.7 : Codage des facteurs influençant la diffusivité apparente, D_{app}

Zone de plantation (A)	Direction de coupe (B)	Etat du copeau de liège (C)
Jijel (+1)	Longitudinale (+1)	Traité (+1)
Skikda (-1)	Tangentielle (-1)	Natif (-1)

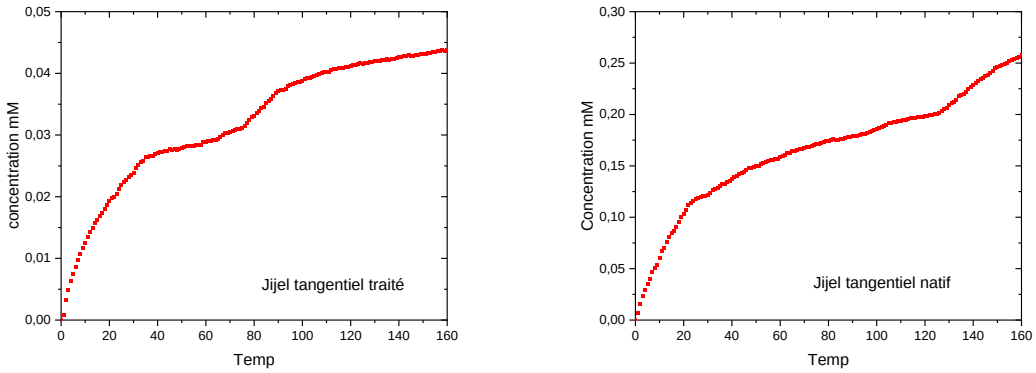


Figure V.18 : Evolution de la concentration de l'espèce i (milli-moles/litre) avec le temps pour les expériences portant les ordre 3 et 6.

Tableau V.8 : Résultats expérimentaux de l'évolution de la concentration et coefficient de diffusion apparent.

t(sec) / Ordre d'expérience	t=0	t=5	t=50	t=75	t=100	t=130	t=160	$10^{+13} * \mathfrak{D}_{App}$
1	17,472	38,110	129,298	152,587	172,992	195,546	222,748	22,50
2	0,860	7,528	27,909	31,082	38,826	41,964	43,846	1,17
3	19,694	35,137	164,361	200,058	216,888	241,708	285,596	36,00
4	14,517	45,287	153,500	177,747	213,067	237,163	263,707	51,90
5	1,075	9,841	40,149	46,311	55,389	60,727	64,250	2,62
6	7,315	35,389	149,545	170,897	185,962	208,877	257,433	30,50
7	4,473	12,117	51,243	57,982	62,625	76,724	80,801	4,12
8	3,183	9,052	27,987	30,656	34,408	38,755	42,426	1,51

V.4.4 Analyse de l'impact de facteurs sur D_{app} par la méthode de plan d'expériences

Après avoir réalisé les expériences prévues par la matrice d'expériences et postulé un modèle théorique, l'analyse de l'impact des facteurs et de leurs interactions supérieures nécessite le calcul des coefficientsa_i, a_{ij} et a_{ijk} pour chaque série d'expériences d'une part et elle doit être conduite par une analyse de variance de la significativité de la régression ainsi établie d'autre part. Pour ce faire, on recoure au logiciel Minitab. Pour la première série d'expériences et pour les facteurs codés, le traitement par Minitab a permis d'établir la régression suivante :

V.4.4.1 Modèle 1

$$\mathcal{D}_{app} = 20.66 - 2.790 * A + 2.778 * B - 16.76 * C + 3.135 * A * C - 2.148 * B * C + 1.056A * B * C \quad \text{V.2}$$

Selon la théorie des plans d'expériences, les interactions d'ordre supérieur ou égal à trois peuvent être négligées (Hypothèse n°1). Il se dégage que l'interaction des facteurs A,B et C est négligée. Il en découle que tout effet ou interaction dont le coefficient est du même ordre de grandeur que le coefficient de l'interaction d'ordre est automatiquement négligé. Ce constat conduit à considérer non significative l'interaction A et B. A ce stade, la régression peut être simplifiée à :

$$\mathcal{D}_{app} = 20.66 - 2.790 * A + 2.778 * B - 16.76 * C + 3.135 * A * C - 2.148 * B * C \quad \text{V.3}$$

Cette équation de régression peut être simplifiée sur la base de l'hypothèse n°5 qui stipule qu'une interaction est souvent faible si elle se compose d'un facteur principal faible et d'un facteur principal fort. Une analyse que le facteur C est fort en valeur absolue et au vu de l'expression analytique du coefficient $\mathcal{D}_{app}$, on peut affirmer que toutes les interactions des facteurs avec C peuvent être conséquemment négligées. Il en résulte que la régression $\mathcal{D}_{app} = \mathcal{D}_{app}(A, B, C)$ est réduite à :

$$\mathcal{D}_{app} = 20.66 - 2.790 * A + 2.778 * B - 16.76 * C \quad \text{V.4}$$

Comme conséquence de cette simplification, on note que les effets ou interaction, dont l'influence est moyennement inférieure à celui de A*C, sont sensiblement nuls. Cette analyse de significativité conduit à l'établissement de l'expression finale suivante ;

$$\mathcal{D}_{app} = 20.66 - 16.76 * C \quad \text{V.5}$$

Sur la base de l'ANOVA, une analyse plus rigoureuse mérite d'être développée suite à la répétition des expériences identifiées par la matrice d'expériences.

En effet, cette simplification est pleinement justifiée sur la base de la comparaison des valeurs des coefficients de la régression données par le diagramme de Pareto (Figure V.19**)**.

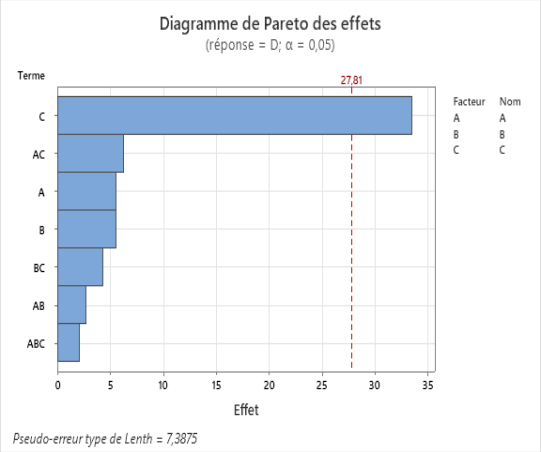


Figure V.19 : Graphique des effets Principaux.

V.4.4.2 Modèle 2

$$\mathcal{D}_{app} = 19{,}87 - 3{,}199\,\mathrm{A} + 6{,}839\mathrm{B} - 16{,}33\mathrm{C} - 4{,}221\mathrm{A}*\mathrm{B} + 3{,}001\,\mathrm{A}*\mathrm{C} - 5{,}111\,\mathrm{B}*\mathrm{C}$$

$$+3{,}729\,\mathrm{A}*\mathrm{B}*\mathrm{C} \qquad \text{V.6}$$

D'après les hypothèses énoncées, nous pouvons tirer les conclusions suivantes concernant les interactions d'ordre supérieur et les facteurs influents. Tout d'abord, les interactions d'ordre 3 sont négligeables. Ensuite, la zone n'a qu'une faible influence, car ses coefficients sont inférieurs à ceux des interactions d'ordre 3. Le facteur C (traitement) est crucial, et l'effet de la direction est également significatif, notamment avec la direction tangentielle. Conformément à l'hypothèse 5, lorsque des facteurs faibles interagissent avec des facteurs forts, l'interaction entre les deux est faible. Par conséquent, l'interaction entre l'état et la zone est éliminée. Les facteurs restants sont la direction (avec le coefficient tangentiel de -1) et l'état (avec le traitement, également à +1). De plus, nous observons une interaction entre la zone et la direction (dans le cas de Skikda, tangentielle) ainsi qu'une interaction entre la direction et l'état (radiale, traité). L'équation de régression devient :

$$\mathcal{D}_{app} = 19{,}87 + 6{,}839\,\mathrm{B} - 16{,}33\,\mathrm{C} - 4{,}221\,\mathrm{A}*\mathrm{B} - 5{,}111\,\mathrm{B}*\mathrm{C} \qquad \text{V.7}$$

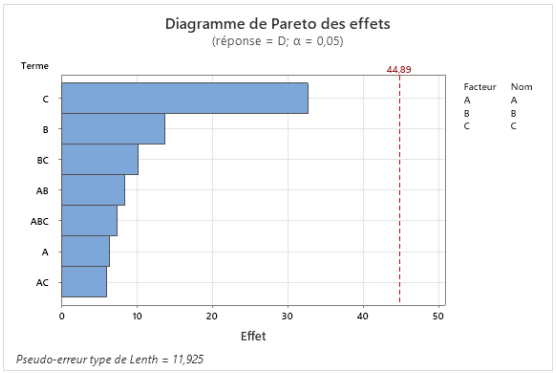


Figure V.20 : Graphique des effets Principaux.

V.4.4.3 Modèle 3

$$\mathcal{D}_{app} = 18{,}79 - 1{,}217\,\mathrm{A} + 4{,}870\,\mathrm{B} - 16{,}43\,\mathrm{C} - 3{,}133\,\mathrm{A}*\mathrm{B} + 0{,}7575\,\mathrm{A}*\mathrm{C} - 3{,}855\,\mathrm{B}*\mathrm{C}$$

$$+2{,}843\,\mathrm{A}*\mathrm{B}*\mathrm{C} \qquad \text{V.8}$$

Dans cette troisième série de régressions, nous constatons que les interactions d'ordre trois (hypothèse 1) sont négligeables. L'effet de la zone et des interactions entre l'état et la zone est moins prononcé, conformément à la cinquième hypothèse. Cependant, l'effet du traitement sur le coefficient de diffusion est confirmé dans cette série d'analyses. De plus, l'influence de la direction tangentielle est significative. En résumé, le traitement et la direction sont des facteurs clés à prendre en compte pour comprendre les variations du coefficient de diffusion.

$$\mathcal{D}_{app} = 18{,}79 + 4{,}870\,\mathrm{B} - 16{,}43\,\mathrm{C} - 3{,}855\,\mathrm{B}*\mathrm{C} \qquad \text{V.9}$$

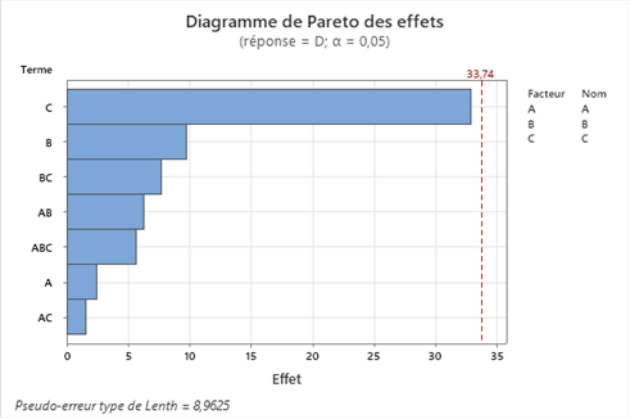


Figure V.21 : Graphique des effets Principaux.

V.4.5 Analyse de Régression

$$\mathcal{D}_{app} = 20.66 - 16.76 * C \qquad \text{V.10}$$

$$\mathcal{D}_{app} = 19.87 + 6.839 * B - 16.33 * C - 5.111 * BC \qquad \text{V.11}$$

$$\mathcal{D}_{app} = 18.79 + 4.780 * B - 16.43 * C - 3.855 * BC \qquad \text{V.12}$$

A travers le résumé de cette étude, on remarque que l'analyse de ces expressions analytiques montre que :

-1) Ni la zone de plantation ni ses interactions ont un effet sensible sur le coefficient de diffusion ;

-2) La direction tangentielle de coupe donne un coefficient de diffusion plus approprié a exploité en matière d'isolation soit une valeur plus fable ;

-3) Compte tenu du signe négatif de l'effet C, il se dégage que le traitement thermique conduit à la formulation d'un coefficient $\mathcal{D}_{app}$ plus faible. Son effet est quatre plus faible que l'effet de la direction tangentielle de coupe ;

-4) Quant à l'interaction de la direction de coupe et de l'état du matériau (natif ou traité) sur le coefficient $\mathcal{D}_{app}$, on mentionne que compte tenu du signe négatif du coefficient B*C, les plus faibles coefficients de $\mathcal{D}$ sont obtenus lorsque les facteurs B et C ont les deux modalités confirmant les deux conclusions 2 et 3.

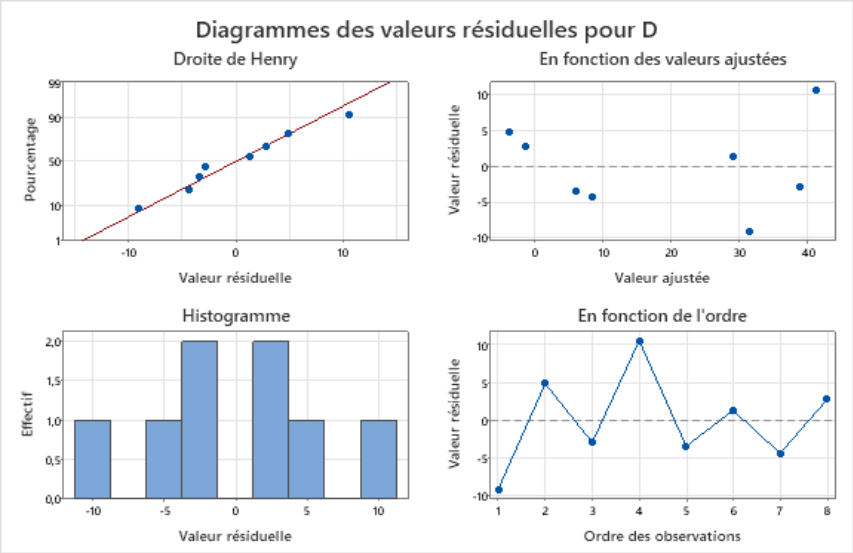


Figure V.22 : Diagramme des valeurs résiduelles pour Y.

Il est évident que la courbe de probabilité normale présente une réponse presque linéaire, ce qui démontre que les erreurs sont distribuées normalement. Ceci est confirmé par l'histogramme de la Figure V.22**,** qui montre également une distribution normale. Il est observé que les résidus sont normalement distribués près des lignes de zéro, ce qui implique qu'il y a une bonne association avec les paramètres qui ont un impact sur les résultats. Une tendance similaire a été observée dans les deux autres modèles.

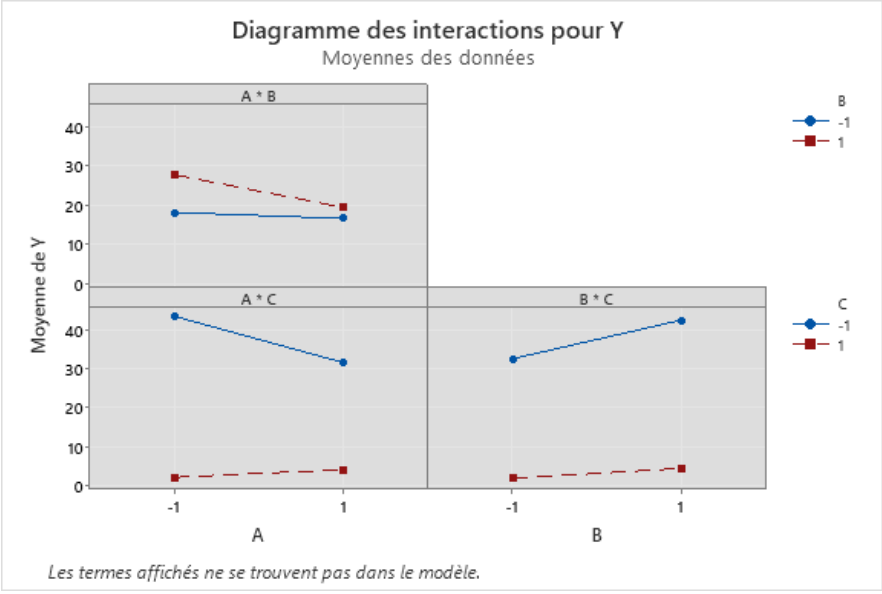


Figure V.23 : Diagramme des interactions pour Y.

Les graphiques de la Figure V.23 représentent visuellement comment les changements dans un facteur affectent un autre facteur dans un contexte expérimental ou d'analyse de données. Ils sont utiles pour comprendre les relations complexes au sein des données ou lors de la conception d'expériences. Les interactions entre les variables du processus peuvent être mises en évidence à l'aide du diagramme d'interaction. Des lignes parallèles entre la zone et la nature dans un diagramme d'interaction indiquent qu'il n'y a pas d'interaction. Plus les lignes s'écartent de l'état parallèle, plus le degré d'interaction est élevé comme le cas entre la zone d'élevage et la direction de coupe, et entre la direction et la nature du liège.

V.5 Conclusion

Dans cette étude, nous avons examiné les effets de plusieurs facteurs essentiels sur les propriétés de diffusion du liège, notamment l'état du liège (traité ou non traité), la direction de coupe (radiale, longitudinale et tangentielle) et la zone d'élevage (Médéa, Jijel et Skikda). Nos analyses ont révélé que l'état du liège influence significativement ses propriétés de diffusion, avec des variations observées dans le liège qui subit un traitement à haute température. De plus, la direction de coupe a montré un impact notable sur la diffusion, en particulier la coupe tangentielle qui a démontré une diffusivité plus faible par rapport aux coupes radiale et longitudinale. Par ailleurs, l'emplacement géographique et la zone d'élevage du liège, notamment Médéa, Jijel et Skikda, a également joué un rôle dans les caractéristiques de diffusion du matériau.

L'utilisation du plan d'expérience et des réseaux de neurones artificiels a généré des résultats significatifs, démontrant une capacité remarquable dans la prédiction précise des propriétés mécaniques du liège. Ces travaux offrent une avancée considérable pour l'optimisation des procédés de traitement du liège, tout en considérant les variations géographiques et structurales.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La présente thèse s'est attelée à explorer et comprendre de manière approfondie le comportement mécanique du liège traité par des procédés écologiques. En suivant une approche méthodique, le travail s'est articulé autour de trois axes majeurs, à savoir l'expérimentation, la modélisation par plan d'expérience et par réseaux de neurones artificiels.

L'expérimentation relative au liège a apporté des éclairages précieux sur l'impact des divers paramètres tels que le traitement à haute température, la zone de récolte et l'orientation de coupe. Ces résultats expérimentaux ont constitué une base solide pour la compréhension des paramètres clés influençant le comportement mécanique du matériau étudié.

Les résultats trouvés montrent que le liège traité présente une diffusivité massique plus faible, environ 10 fois que le liège naturel. Les valeurs des coefficients pour le liège naturel et traité sont respectivement les suivantes : $D_N = 6{,}23 \times 10^{-12}$ m^2/s et $D_t = 5{,}95 \times 10^{-13}$ m^2/s. L'influence de la direction de coupe est également significative, avec des coefficients $D_R = 5{,}07 \times 10^{-12}$ m^2/s, $D_L = 3{,}6 \times 10^{-12}$ m^2/s et $D_T = 3{,}05 \times 10^{-12}$ m^2/s, dont la direction tangentielle montrant une diffusivité plus faible. En ce qui concerne l'emplacement géographique, la zone de Jijel a eu une coefficient de diffusivité plus favorable, dont $D_{TtJ} = 1{,}17 \times 10^{-13}$ m^2/s et $D_{TtM} = 2{,}1 \times 10^{-13}$ m^2/s, $D_{TtS} = 1.51 \times 10^{-13} m^2/s$.

La modélisation par plan d'expérience a constitué une étape cruciale dans le processus d'optimisation. En utilisant des méthodes statistiques et des plans d'expérience, cette approche a permis de formuler des modèles mathématiques décrivant les relations entre les variables d'entrée et les propriétés mécaniques du liège. Ces modèles ont non seulement contribué à la conceptualisation du comportement mécanique, mais ils ont également ouvert la voie à des prédictions et des ajustements pertinents.

Enfin, l'intégration des réseaux de neurones artificiels a ajouté une dimension contemporaine à cette thèse. En exploitant la puissance des algorithmes d'apprentissage profond, cette approche a permis de capturer des relations complexes et non linéaires entre les paramètres du traitement du liège et ses propriétés mécaniques. Les réseaux de neurones ont ainsi fourni une méthode robuste pour la prédiction et l'optimisation du comportement mécanique du liège avec un coefficient de corrélation égale 0,91195, complétant ainsi les informations obtenues par les approches expérimentales et de modélisation.

Cette thèse représente une contribution significative à la compréhension approfondie du comportement mécanique du liège traité écologiquement. Les résultats obtenus à travers les travaux expérimentaux, la modélisation par plan d'expérience, et l'utilisation de réseaux de neurones artificiels ont ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine, offrant des outils puissants pour l'optimisation des procédés et la prise de décision éclairée dans l'industrie du liège. Cette approche holistique marque une avancée significative dans la recherche sur le liège, soulignant l'importance de combiner différentes méthodologies pour obtenir une compréhension complète et précise du comportement mécanique des matériaux traités écologiquement.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

[1] A. Cortes *et al.*, "The effect of cork-based living walls on the energy performance of buildings and local microclimate," *Build. Environ.*, vol. 216, p. 109048, 2022.

[2] I. H. Sørensen, M. Torralba, C. Quintas-Soriano, J. Muñoz-Rojas, and T. Plieninger, "Linking Cork to Cork Oak Landscapes: Mapping the Value Chain of Cork Production in Portugal," *Front. Sustain. Food Syst.*, vol. 5, no. November, pp. 1–15, 2021, doi: 10.3389/fsufs.2021.787045.

[3] R. Rowell, "Structure and Chemistry," *Handb. Wood Chem. Wood Compos. Second Ed.*, vol. 10, no. 2005, pp. 7–8, 2012, doi: 10.1201/b12487-3.

[4] E. Vignes and E. V. Sylviculture, "SY LV I C U LT U R E D ES," no. 2, pp. 125–130, 2022.

[5] F. Birem, "Synthèse bibliographique sur le comportement du chêne liège (Quercus suber L.) après incendie et ses problèmes de régénération." Université Mouloud Mammeri, 2020.

[6] Ben Boudjema, H., & Sadou, S. (2019). *Contribution à l'étude de la variabilité de la qualité du liège de reproduction des subéraies d'El kala cas des stations: Day ezzitoun, Laachlahmar, Forêt Nahal* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

[7] D. P. Faria, A. L. Fonseca, H. Pereira, and O. M. N. D. Teodoro, "Permeability of cork to gases," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 59, no. 8, pp. 3590–3597, 2011, doi: 10.1021/jf200491t.

[8] M. H. Lopes, A. M. Gil, A. J. D. Silvestre, and C. P. Neto, "Composition of suberin extracted upon gradual alkaline methanolysis of Quercus suber L. Cork," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 48, no. 2, pp. 383–391, 2000, doi: 10.1021/jf9909398.

[9] H. Gest, "The discovery of microorganisms revisited," *ASM News*, vol. 70, no. 6, pp. 269–274, 2004.

[10] K. E. L. J. Gibson, "The structure and mechanics of cork," *R. Soc.*.

[11] A. N. Dias, V. Simão, J. Merib, and E. Carasek, "Cork as a new (green) coating for solid-phase microextraction: Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in water samples by gas chromatography-mass spectrometry," *Anal. Chim. Acta*, vol. 772, pp. 33–39, 2013, doi: 10.1016/j.aca.2013.02.021.

[12] P. Boher *et al.*, "A comparative transcriptomic approach to understanding the formation of cork," *Plant Mol. Biol.*, vol. 96, pp. 103–118, 2018.

[13] M. Soler, O. Serra, M. Molinas, G. Huguet, S. Fluch, and M. Figueras, "A genomic

approach to suberin biosynthesis and cork differentiation," *Plant Physiol.*, vol. 144, no. 1, pp. 419–431, 2007.

[14] I. M. Aroso, A. R. Araújo, R. A. Pires, and R. L. Reis, "Cork: Current Technological Developments and Future Perspectives for this Natural, Renewable, and Sustainable Material," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 12, pp. 11130–11146, 2017, doi: 10.1021/acssuschemeng.7b00751.

[15] H. Pereira, "Chemical composition and variability of cork from Quercus suber L.," *Wood Sci. Technol.*, vol. 22, no. 3, pp. 211–218, 1988.

[16] L. Le Barbenchon, "Description multi-échelles du comportement mécanique d'un matériau cellulaire composite sous sollicitations sévères. - Application aux agglomérés de liège pour l'aéronautique -," p. 312, 2020.

[17] R. M. Novais, L. Sen, J. Carvalheiras, M. P. Seabra, R. C. Pullar, and J. A. Labrincha, "Sustainable and e ffi cient cork - inorganic polymer composites : An innovative and eco-friendly approach to produce ultra-lightweight and low thermal conductivity materials," vol. 97, no. October 2018, pp. 107–117, 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.024.

[18] M. F. S. Bento, H. Pereira, M. Á. Cunha, A. M. C. Moutinho, K. J. Van den Berg, and J. J. Boon, "A study of variability of suberin composition in cork from Quercus suber L. using thermally assisted transmethylation GC–MS," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 57, no. 1, pp. 45–55, 2001.

[19] M. F. Bento *et al.*, "Fragmentation of suberin and composition of aliphatic monomers released by methanolysis of cork from Quercus suber L., analysed by GC-MS, SEC and MALDI-MS," 2001.

[20] H. Pereira and A. V. Marques, "The effect of chemical treatments on the cellular structure of cork," *IAWA J.*, vol. 9, no. 4, pp. 337–345, 1988.

[21] J. Graça and H. Pereira, "Suberin structure in potato periderm: glycerol, long-chain monomers, and glyceryl and feruloyl dimers," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 48, no. 11, pp. 5476–5483, 2000.

[22] N. Cordeiro, M. N. Belgacem, A. J. D. Silvestre, C. Pascoal Neto, and A. Gandini, "Cork suberin as a new source of chemicals. 1. Isolation and chemical characterization of its composition," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 22, no. 2, pp. 71–80, 1998, doi: 10.1016/S0141-8130(97)00090-1.

[23] J. Graça and S. Santos, "Glycerol-derived ester oligomers from cork suberin," *Chem. Phys. Lipids*, vol. 144, no. 1, pp. 96–107, 2006, doi:

10.1016/j.chemphyslip.2006.08.001.

[24] A. V Marques, H. Pereira, D. Meier, and O. Faix, “Structural characterization of cork lignin by thioacidolysis and permanganate oxidation,” 1999.

[25] P. B. Nicolai, P. Chalier, and M. Valade, “Discipline : Sciences de l ’ alimentation Propriétés mécaniques , structure interne et mécanismes de transfert de l ’ oxygène dans le liège,” 2015.

[26] A. Asensio, “Polysaccharides from the Cork of Quercus suber, II. Hemicellulose,” *J. Nat. Prod.*, vol. 51, no. 3, pp. 488–491, 1988.

[27] N. Pedrol *et al.*, “Soil fertility and spontaneous revegetation in lignite spoil banks under different amendments,” *Soil Tillage Res.*, vol. 110, no. 1, pp. 134–142, 2010.

[28] A. Peña-Neira, B. Fernández de Simón, M. C. García-Vallejo, T. Hernández, E. Cadahía, and J. A. Suarez, “Presence of cork-taint responsible compounds in wines and their cork stoppers,” *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 211, pp. 257–261, 2000.

[29] E. Conde, E. Cadahía, M. C. García-Vallejo, B. Fernández De Simón, and J. R. González Adrados, “Low Molecular Weight Polyphenols in Cork of Quercus suber,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 45, no. 7, pp. 2695–2700, 1997, doi: 10.1021/jf960486w.

[30] S. Insa, V. Salvadó, and E. Anticó, “Assays on the simultaneous determination and elimination of chloroanisoles and chlorophenols from contaminated cork samples,” *J. Chromatogr. A*, vol. 1122, no. 1–2, pp. 215–221, 2006.

[31] A. S. Mestre *et al.*, “Activated carbons prepared from industrial pre-treated cork: Sustainable adsorbents for pharmaceutical compounds removal,” *Chem. Eng. J.*, vol. 253, no. 106637, pp. 408–417, 2014, doi: 10.1016/j.cej.2014.05.051.

[32] J. Jesus, R. Nunes da Silva, and A. Pintor, “Advances in Cork Use in Adsorption Applications: An Overview of the Last Decade of Research,” *Separations*, vol. 10, no. 7, pp. 1–18, 2023, doi: 10.3390/separations10070390.

[33] WoodEMA, *CURRENT TRENDS AND CHALLENGES FOR FOREST-BASED SECTOR: CARBON NEUTRALITY AND BIOECONOMY Proceedings of Scientific Papers*. 2023. [Online]. Available: http://www.woodema.org/proceedings/WoodEMA_2023_Proceedings.pdf#page=107

[34] M. Çolak *et al.*, *Environmentally- Benign Energy Solutions-BOOK*. 2020. doi: 10.1007/978-3-030-20637-6.

[35] O. Wilton and M. B. Howland, “Cork Construction Kit,” *J. Archit.*, vol. 25, no. 2, pp. 138–165, 2020, doi: 10.1080/13602365.2020.1733812.

[36] S. Spiegel, “Recent advances in applied polymer science,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol.

135, no. 24, 2018, doi: 10.1002/app.46279.

[37] L. Gil, "New cork-based materials and applications," *Materials (Basel).*, vol. 8, no. 2, pp. 625–637, 2015, doi: 10.3390/ma8020625.

[38] Dari, L., & Paché, G. (2017). Conditions of success of a collective dynamic: the case of the cork industry in France. *Systèmes alimentaires*, *2016*(1), 43-67.

[39] O. Castro, J. M. Silva, T. Devezas, A. Silva, and L. Gil, "Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 425–432, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.05.039.

[40] I. D. S. G. do Rosário, "Viability Study for a Carbon-Cork Sandwich Composite," no. December, 2019.

[41] S. Merabti, S. Kenai, R. Belarbi, and J. Khatib, "Thermo-mechanical and physical properties of waste granular cork composite with slag cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, p. 121923, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121923.

[42] H. Lopes, S. P. Silva, and J. Machado, "Application of artificial neural networks to predict mechanical behaviour of cork-rubber composites," *Neural Comput. Appl.*, vol. 33, no. 20, pp. 14069–14078, 2021, doi: 10.1007/s00521-021-06048-w.

[43] M. S. Cha, S. J. Yoon, J. H. Kwon, H. S. Byeon, and H. M. Park, "Mechanical Properties of Cork Composite Boards Reinforced with Metal, Glass Fiber, and Carbon Fiber," *J. Korean Wood Sci. Technol.*, vol. 50, no. 6, pp. 427–435, 2022, doi: 10.5658/WOOD.2022.50.6.427.

[44] R. A. de Sousa, R. Coelho, F. Teixeira-Dias, and D. Gonçalves, "Assessing the effectiveness of a natural cellular material used as safety padding material in motorcycle helmets," *Simulation*, vol. 88, no. 5, pp. 580–591, 2012, doi: 10.1177/0037549711414735.

[45] V. Oliveira and H. Pereira, "Cork and cork stoppers: Quality and performance," *Chem. Biochem. Winemak. Wine Stab. Aging*, 2020.

[46] S. Tahar, G. Salah, A. Youssef, K. Ali, S. Ramon, and R. Miguel Elena, "Estimation of the cork quality by the IPROCOR method : Application to a sampling of Tunisian cork," no. 1, pp. 51–68, 2011.

[47] A. Zemirline, T. Kermezli, M. Announ, and M. Douani, "Investigation of the Effect of Cutting Directions on the Improvement of Mechanical Parameters of Treated Cork by THT: Experimental Measurement, Modelling and Optimization of Mass Transfer," *Mechanika*, vol. 28, no. 3, pp. 204–210, 2022, doi: 10.5755/J02.MECH.26956.

[48] M. Chopra, "United States Patent : 5861366 United States Patent : 5861366," *New*

York, vol. 1, no. 19, pp. 1–29, 2010, [Online]. Available: https://patentimages.storage.googleapis.com/30/f4/62/e9b75605352fb0/US10679987.pdf

[49] V. Gumanová, L. Sobotová, T. Dzuro, M. Badida, and M. Moravec, "Experimental Survey of the Sound Absorption Performance of Natural Fibres in Comparison with Conventional Insulating Materials," *Sustain.*, vol. 14, no. 7, 2022, doi: 10.3390/su14074258.

[50] M. Urbaniak, R. Goluch-Goreczna, and A. K. Bledzki, "Natural cork agglomerate as an ecological alternative in constructional sandwich composites," *BioResources*, vol. 12, no. 3, pp. 5512–5524, 2017, doi: 10.15376/biores.12.3.5512-5524.

[51] A. Tsakiris, P. Kandylis, A. Bekatorou, Y. Kourkoutas, and A. A. Koutinas, "Dry red wine making using yeast immobilized on cork pieces," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 162, no. 5, pp. 1316–1326, 2010, doi: 10.1007/s12010-009-8905-4.

[52] H. Boulahia, C. Aribi, A. Zerizer, and B. Bezzazi, "L ' Influence Des Charges Organiques Sur Les Proprietes Physico-Mecanique De La Resine Epoxy (Cas La Poudre De Liege)," pp. 147–152, 2012.

[53] J. Chanut *et al.*, "Surface properties of cork: Is cork a hydrophobic material?," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 608, pp. 416–423, 2022, doi: 10.1016/j.jcis.2021.09.140.

[54] O. Anjos, C. Rodrigues, J. Morais, and H. Pereira, "Effect of density on the compression behaviour of cork," vol. 53, pp. 1089–1096, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.07.038.

[55] G. R. Pess, D. R. Montgomery, E. A. Steel, R. E. Bilby, B. E. Feist, and H. M. Greenberg, "Landscape characteristics, land use, and coho salmon (Oncorhynchus kisutch) abundance, Snohomish River, Wash., U.S.A.," *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 59, no. 4, pp. 613–623, 2002, doi: 10.1139/f02-035.

[56] "The Structure and Mechanics of Cork Author (s): L . J . Gibson , K . E . Easterling and M . F . Ashby Source : Proceedings of the Royal Society of London . Series A , Mathematical and Published by : Royal Society Stable URL : https://www.jstor.org/stabl," vol. 377, no. 1769, pp. 99–117, 1981.

[57] C. Prades, I. Gómez-Sánchez, J. García-Olmo, F. González-Hernández, and J. R. González-Adrados, "Application of VIS/NIR spectroscopy for estimating chemical, physical and mechanical properties of cork stoppers," *Wood Sci. Technol.*, vol. 48, no. 4, pp. 811–830, 2014, doi: 10.1007/s00226-014-0642-3.

[58] S. Lequin, "Etude de l ' adsorption et de la diffusion en phase gazeuse , de petites

molécules actives du vin dans le liège To cite this version : HAL Id : tel-00674045 par," 2012.

[59] X. D. Crystallography, "Dynamics of Fluids in Porous Media," *Dyn. Fluids Porous Media*, no. LIVRE, pp. 1–23, 2016.

[60] E. Guyon, J.-P. Hulin, L. Petit, and P. G. de Gennes, *Hydrodynamique physique*. EDP sciences Les Ulis, 2001.

[61] J. Chanut *et al.*, "Fast manometric method for determining the effective oxygen diffusion coefficient through wine stopper," *Polym. Test.*, vol. 93, no. October 2020, 2021, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106924.

[62] S. Lequin, D. Chassagne, T. Karbowiak, J. M. Simon, C. Paulin, and J. P. Bellat, "Diffusion of oxygen in cork," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 60, no. 13, pp. 3348–3356, 2012, doi: 10.1021/jf204655c.

[63] A. Lagorce-Tachon, T. Karbowiak, J. M. Simon, R. Gougeon, and J. P. Bellat, "Diffusion of oxygen through cork stopper: Is it a knudsen or a fickian mechanism?," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 62, no. 37, pp. 9180–9185, 2014, doi: 10.1021/jf501918n.

[64] G. Liger-Belair and S. Villaume, "Losses of dissolved CO2 through the cork stopper during champagne aging: toward a multiparameter modeling," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 59, no. 8, pp. 4051–4056, 2011.

[65] R. E. Hernández and M. Pontin, "Shrinkage of three tropical hardwoods below and above the fiber saturation point," *Wood Fiber Sci.*, vol. 38, no. 3, pp. 474–483, 2006.

[66] P. Hoffmeyer, E. T. Engelund, and L. G. Thygesen, "Equilibrium moisture content (EMC) in Norway spruce during the first and second desorptions," *Holzforschung*, vol. 65, no. 6, pp. 875–882, 2011, doi: 10.1515/HF.2011.112.

[67] S. Brunauer, P. H. Emmett, and E. Teller, "in Multimolecular," *J. Am.Chem.Soc.*, vol. 60, no. 2, pp. 309–319, 1938.

[68] R. W. DentView all authors and affiliations, "A Multilayer Theory for Gas Sorption: Part I: Sorption of a Single Gas," *Text. Res. J.*, vol. Volume 47, no. Issue 2, p. 47, 1977.

[69] A. J. Hailwood and S. Horrobin, "Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model," *Trans. Faraday Soc.*, vol. 42, no. 0, pp. B084–B092, 1946, doi: 10.1039/TF946420B084.

[70] R. Popper, P. Niemz, and S. Croptier, "Adsorption and desorption measurements on selected exotic wood species. Analysis with the hailwood-horrobin model to describe the sorption hysteresis," *Wood Res.*, vol. 54, no. 4, pp. 43–56, 2009.

[71] J. Sanchez and J. M. Aracil, “Perméabilité gazeuse de différents obturateurs,” *Bull. l’OIV*, vol. 71, no. 805–06, pp. 279–283, 1998.

[72] T. Kermezli, B. Aicha, and T. H. Boumediene, “Experimental and ANN Estimation of the Mechanical Behavior for Cork under Experimental and ANN Estimation of the Mechanical Behavior for Cork under the Influence of Heat Treatment in Isothermal Conditions,” vol. 5, no. September, pp. 447–453, 2012.

[73] H. M. Zimmermann, K. Hartmann, L. Schreiber, and E. Steudle, “Chemical composition of apoplastic transport barriers in relation to radial hydraulic conductivity of corn roots (Zea mays L.),” *Planta*, vol. 210, no. 2, pp. 302–311, 2000, doi: 10.1007/PL00008138.

[74] P. Lopes, C. Saucier, and Y. Glories, “Nondestructive colorimetric method to determine the oxygen diffusion rate through closures used in winemaking,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 53, no. 18, pp. 6967–6973, 2005, doi: 10.1021/jf0404849.

[75] L. Brotto, F. Battistutta, L. Tat, P. Comuzzo, and R. Zironi, “Modified nondestructive colorimetric method to evaluate the variability of oxygen diffusion rate through wine bottle closures,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 58, no. 6, pp. 3567–3572, 2010.

[76] S. Lequin, “Etude de l’adsorption et de la diffusion en phase gazeuse, de petites molécules actives du vin dans le liège.” Université de Bourgogne, 2010.

[77] R. B. Boulton *et al.*, “The role of sulfur dioxide in wine,” *Princ. Pract. Winemak.*, pp. 448–473, 1999.

[78] J.-C. Vidal, B. Guillemat, and C. Chayvialle, “Oxygen transmission rate of screwcaps by chemoluminescence and air/capsule/headspace/acidified water system,” *Bull. l’OIV*, vol. 84, no. 962–964, pp. 189–198, 2011.

[79] A. L. Fonseca, C. Brazinha, H. Pereira, J. G. Crespo, and O. M. N. D. Teodoro, “Permeability of cork for water and ethanol,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 61, no. 40, pp. 9672–9679, 2013, doi: 10.1021/jf4015729.

[80] A. Mouchot, N. ; Wehrer, A. ; Bucur, V. ; Zoulalian, “Détermination indirecte des coefficients de diffusion de la vapeur d’eau dans les directions tangentielle et radiale du bois de hêtre.No Title,” *Ann. For. Sci. 2000 Vol.57 No.8 pp.793-801 ref.13*.

[81] H. A. L. Id, “Mass diffusity of wood determined by inverse method from electrical resistance measurement in unsteady state . Adéyèmi Clément Kouchade To cite this version : HAL Id : pastel-00000888 Détermination en routine de la diffusivité massique dans le bois par mé,” 2004.

[82] W. S. McCulloch and W. H. Pitts, “A logical calculus of the ideas immanent in nervous

activity," *Syst. Res. Behav. Sci. A Sourceb.*, vol. 5, pp. 93–96, 2017, doi: 10.7551/mitpress/12274.003.0011.

[83] B. G. M. Vandeginste, D. L. Massart, L. M. C. Buydens, S. De Jong, P. J. Lewi, and J. Smeyers-Verbeke, "Artificial neural networks," in *Data Handling in Science and Technology*, vol. 20, Elsevier, 1998, pp. 649–699.

[84] R. Seising, "The Emergence of Fuzzy Sets in the Decade of the Perceptron—Lotfi A. Zadeh's and Frank Rosenblatt's Research Work on Pattern Classification," *Mathematics*, vol. 6, no. 7, p. 110, 2018.

[85] C. Sammut and G. I. Webb, *Encyclopedia of machine learning*. Springer Science & Business Media, 2011.

[86] J. Adamowski, H. Fung Chan, S. O. Prasher, B. Ozga-Zielinski, and A. Sliusarieva, "Comparison of multiple linear and nonlinear regression, autoregressive integrated moving average, artificial neural network, and wavelet artificial neural network methods for urban water demand forecasting in Montreal, Canada," *Water Resour. Res.*, vol. 48, no. 1, pp. 1–14, 2012, doi: 10.1029/2010WR009945.

[87] S.-C. Wang and S.-C. Wang, "Artificial neural network," *Interdiscip. Comput. java Program.*, pp. 81–100, 2003.

[88] G. A. Anastassiou, *Intelligent Systems: Approximation by Artificial Neural Networks*, vol. 19. 2011. doi: 10.1007/978-3-642-21431-8.

[89] S. Kirchhofer, "Conception d ' une prothèse bio-inspirée commandée par réseaux de neurones exploitant les signaux électromyographiques To cite this version : HAL Id : tel-03209565 Simon Kirchhofer ese bio-inspir ´ ee command ´ ee par r ´ eseaux de neurones exploitant les," 2021.

[90] S. Jiang *et al.*, "A novel miR-155/miR-143 cascade controls glycolysis by regulating hexokinase 2 in breast cancer cells," *EMBO J.*, vol. 31, no. 8, pp. 1985–1998, 2012, doi: 10.1038/emboj.2012.45.

[91] E. Gauthier and E. Gauthier, "eseaux de neurones artificiels pour la commande d ' un v ´ To cite this version : Utilisation des R eseaux de Neurones Arti ciels pour la Commande d ' un V ehicule Autonome Jean-Luc Schwartz Fr eric Alexandre Ren e Zapata Bernard Amy Philippe Jorrand SEAU," 2004.

[92] H. N. Nguyen, J. Zhou, and H. J. Kang, "A calibration method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and an artificial neural network," *Neurocomputing*, vol. 151, no. P3, pp. 996–1005, 2015, doi: 10.1016/j.neucom.2014.03.085.

[93] A. A. Zhilenkov and I. R. Epifantsev, “Problems of a trajectory planning in autonomous navigation systems based on technical vision and AI,” *Proc. 2018 IEEE Conf. Russ. Young Res. Electr. Electron. Eng. ElConRus 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 1032–1035, 2018, doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317265.

[94] S. U. Baek, W. T. Lee, M. S. Kim, M. H. Lim, J. H. Yoon, and J. U. Won, “Self-Esteem Trajectories After Occupational Injuries and Diseases and Their Relation to Changes in Subjective Health: Result From the Panel Study of Workers’ Compensation Insurance (PSWCI),” *J. Korean Med. Sci.*, vol. 38, no. 37, pp. 1–14, 2023, doi: 10.3346/jkms.2023.38.e284.

[95] G. Gelly, “Réseaux de neurones récurrents pour le traitement automatique de la parole.” Université Paris Saclay (COmUE), 2017.

[96] B. Arsovic and N. Stefanovic, “E-learning based on the adaptive learning model: case study in Serbia,” *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.*, vol. 45, no. 1, pp. 1–13, 2020, doi: 10.1007/s12046-020-01499-8.

[97] A. Lendasse, *Analyse et prédiction de séries temporelles par méthodes non linéaires: Application à des données industrielles et financières*. Presses univ. de Louvain, 2003.

[98] A. E. Dunn-Vaturi and U. Schädler, “Nouvelles perspectives sur les jeux a la lumiere de plateaux du Kerman,” *Iran. Antiq.*, vol. 41, no. July, pp. 1–29, 2006, doi: 10.2143/IA.41.0.2004758.

[99] G. Bebis and M. Georgiopoulos, “Feed-forward neural networks,” *Ieee Potentials*, vol. 13, no. 4, pp. 27–31, 1994.

[100] R. Hecht-Nielsen, *Neurocomputing*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.

[101] G. Cybenko, “Approximation by superpositions of a sigmoidal function,” *Math. Control. signals Syst.*, vol. 2, no. 4, pp. 303–314, 1989.

[102] R. Raj and A. Kos, “Artificial Intelligence: Evolution, Developments, Applications, and Future Scope.,” *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 99, no. 2, 2023.

[103] X. Li, M. Moussa, and S. Areibi, “Arithmetic formats for implementing artificial neural networks on FPGAs Formats arithmetiques pour l’implementation des reseaux de neurones artificiels sur FPGA,” *Can. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 31, no. 1, p. 31, 2006.

[104] R. Idoui, A. Himeur, and S. E. Bouatmane, “Reconnaissance d’images par les réseaux de neurones convolutionnels (CNN).” Université de Jijel, 2020.

[105] F. Duvernay, A. Valenter, and D. Vicente Alvarez, “Codebraking: l’apprentissage non

supervisé de chiffrages de texte avec des réseaux de neurones," 2022.

[106] T. Stérin, "Réseaux de neurones récurrents et mémoire: application à la musique," *Licence d'informatique. Univ. Claude Bernard Lyon*, 2016.

[107] K. Janod, M. Morchid, R. Dufour, G. Linarès, and R. De Mori, "Auto-encodeurs pour la compréhension de documents parlés (Auto-encoders for Spoken Document Understanding)," in *Actes de la conférence conjointe JEP-TALN-RECITAL 2016. volume 1: JEP*, 2016, pp. 73–81.

[108] R. C. Daudt, B. Le Saux, A. Boulch, and Y. Gousseau, "Détection dense de changements par réseaux de neurones siamois," 2018.

[109] G. Hermann, P. Wira, and J.-L. Buessler, "Organisation de réseaux de neurones pour l'apprentissage de fonctions robotiques complexes," *Journée du Cent. Rech. d'Enseignements en Sci. Pour l'Ingénieur*, pp. 97–102.

[110] C. A. S. De Farias, F. M. Alves, C. A. G. Santos, and K. Suzuki, "An ANN-based approach to modelling sediment yield: A case study in a semi-arid area of Brazil," *IAHS-AISH Publ.*, vol. 337, no. June 2010, pp. 316–321, 2010.

[111] F. Burden and D. Winkler, "Bayesian regularization of neural networks," *Artif. neural networks methods Appl.*, pp. 23–42, 2009.

[112] V. Singh, I. Gupta, and H. O. Gupta, "ANN-based estimator for distillation using Levenberg–Marquardt approach," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 20, no. 2, pp. 249–259, 2007.

[113] Z. Garkani-Nejad and B. Ahmadi-Roudi, "Investigating the role of weight update functions in developing artificial neural network modeling of retention times of furan and phenol derivatives," *Can. J. Chem.*, vol. 91, no. 4, pp. 255–262, 2013.

[114] J. Antony, *Design of experiments for engineers and scientists*. Elsevier, 2023.

[115] M. A. Goodrich, T. W. McLain, J. D. Anderson, J. Sun, and J. W. Crandall, "Managing autonomy in robot teams: observations from four experiments," in *Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, 2007, pp. 25–32.

[116] Y.-F. Li, S. H. Ng, M. Xie, and T. N. Goh, "A systematic comparison of metamodeling techniques for simulation optimization in decision support systems," *Appl. Soft Comput.*, vol. 10, no. 4, pp. 1257–1273, 2010.

[117] P. G. Sullivan, A. G. Rabchevsky, R. R. Hicks, T. R. Gibson, A. Fletcher-Turner, and S. W. Scheff, "Dose-response curve and optimal dosing regimen of cyclosporin A after traumatic brain injury in rats," *Neuroscience*, vol. 101, no. 2, pp. 289–295, 2000.

[118] A. H. Delgado, P. Mukhopadhyaya, and N. N. R. M. Paroli, "Caractéristiques des

membranes d'étanchéite et des matériaux isolants utilisés dans les toitures à faible pente NRCC-48180f," 2005.

[119] M. Jouili, "Caractérisations mécaniques et microstructurales des films de zircone obtenus par MOCVD et Sol-Gel." Université Paris Sud-Paris XI, 2011.

[120] J. Li and S. D. Kocaefe, "Mechanical behaviour of Qu ´ ebec wood species heat-treated using ThermoWood process," pp. 255–259, 2007, doi: 10.1007/s00107-007-0173-9.

[121] J. L. Figueiredo, "A simpli ® ed method for determination of lignocellulosic materials pyrolysis kinetics from isothermal thermogravimetric experiments," vol. 380, 2001.

[122] J. J. M. Órfão and J. L. Figueiredo, "A simplified method for determination of lignocellulosic materials pyrolysis kinetics from isothermal thermogravimetric experiments," *Thermochim. Acta*, vol. 380, no. 1, pp. 67–78, 2001.

[123] G. Varhegyi, M. J. Antal Jr, T. Szekely, and P. Szabo, "Kinetics of the thermal decomposition of cellulose, hemicellulose, and sugarcane bagasse," *Energy & fuels*, vol. 3, no. 3, pp. 329–335, 1989.

[124] Varhegyi, G., Antal Jr, M. J., Szekely, T., & Szabo, P. (1989). Kinetics of the thermal decomposition of cellulose, hemicellulose, and sugarcane bagasse. *Energy & fuels*, *3*(3), 329-335.

[125] Orfão, J. J., Antunes, F. J., & Figueiredo, J. L. (1999). Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials—three independent reactions model. Fuel, 78(3), 349-358.

[126] C. A. A. Ssor, V. I. P. Lacet, B. R. C. Habbert, and A. N. H. Abrant, "Concomitant Changes in Viscoelastic Properties and Amorphous Polymers during the Hydrothermal Treatment of Hardwood and Softwood," pp. 6830–6837, 2009, doi: 10.1021/jf901373s.

[127] F. Kifani-sahban, L. Belkbir, and A. Zoulalian, "thermochimica acta Etude de la pyrolyse lente de l ' Eucalyptus marocain par analyse thermique Study of the slow pyrolysis of Moroccan eucalyptus by thermal analysis," vol. 284, pp. 341–349, 1996.

[128] W. Shangguan and Z. Chen, "Thermogravimetric analysis of cork and cork components from Quercus variabilis," *Wood Sci. Technol.*, vol. 52, no. 1, pp. 181–192, 2018, doi: 10.1007/s00226-017-0959-9.

[129] T. Kermezli, M. Announ, and A. Bensmaili, "The effect of the heat treatment level HT on the mechanical behavior of cork," vol. 22, no. 1, pp. 73–77, 2016.

[130] A. Kumar and P. Lingfa, "Sodium bentonite and kaolin clays: Comparative study on their FT-IR, XRF, and XRD," *Mater. Today Proc.*, vol. 22, pp. 737–742, 2020.

[131] J. Dréo, A. Pétrowski, P. Siarry, and E. Taillard, *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*. Eyrolles, 2003.

[132] M. Mitchell, *An introduction to genetic algorithms*. MIT press, 1998.

[133] X. Yang and A. Hossein Gandomi, "Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization," *Eng. Comput.*, vol. 29, no. 5, pp. 464–483, 2012.

[134] K. Deb, *Optimization for engineering design: Algorithms and examples*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.

[135] X.-S. Yang, "A new metaheuristic bat-inspired algorithm," in *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)*, Springer, 2010, pp. 65–74.

[136] A. H. Alavi and A. H. Gandomi, "A robust data mining approach for formulation of geotechnical engineering systems," *Eng. Comput.*, vol. 28, no. 3, pp. 242–274, 2011.