

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

**Thèse de Doctorat LMD**

Présentée par :

**Mme BOUARAB Fatma Zohra**

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT LMD** en :

**Filière** : Science et Génie des Matériaux

**Option** : Sciences et Techniques du Bois et Eco-Matériaux

**Optimisation des paramètres de coupe et de la  
géométrie de l'outil sur la qualité des produits  
déroulés des chênes algériennes**

**Devant le jury composé de :**

Mr. ZERIZER	Abdelatif	Professeur	UMBB	Président
Mr. AKNOUCHE	Hamid	Professeur	UMBB	Directeur
Mr. BILEK	Ali	Professeur	UMMTO	Examineur
Mr. TAZEROUT	Mansour	Maitre de Conférences A	UMBB	Examineur
Mr. CHELLIL	Ahmed	Maitre de Conférences A	UMBB	Examineur

## REMERCIEMENTS

Dans cet avant-propos, je voudrais montrer toute ma reconnaissance aux personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail, qui m'ont côtoyé et supporté durant ces années de recherche, qui m'ont soutenu et encouragé.

Ce travail n'aurait pas pu aboutir sans le soutien, l'aide et la contribution de nombreuses personnes que je tiens à remercier.

Je tiens à remercier sincèrement et tout particulièrement, mon directeur de thèse, Boumerdes. Pr. **Hamid AKNOUCHE**, pour son soutien, sa patience, ses enseignements et ses conseils dans les moments les plus difficiles et tout au long de cette thèse. Je garderais toute ma vie un très bon souvenir de cette expérience.

J'adresse mes plus vifs remerciements aux honorables membres du Jury qui ont accepté de juger ce travail.

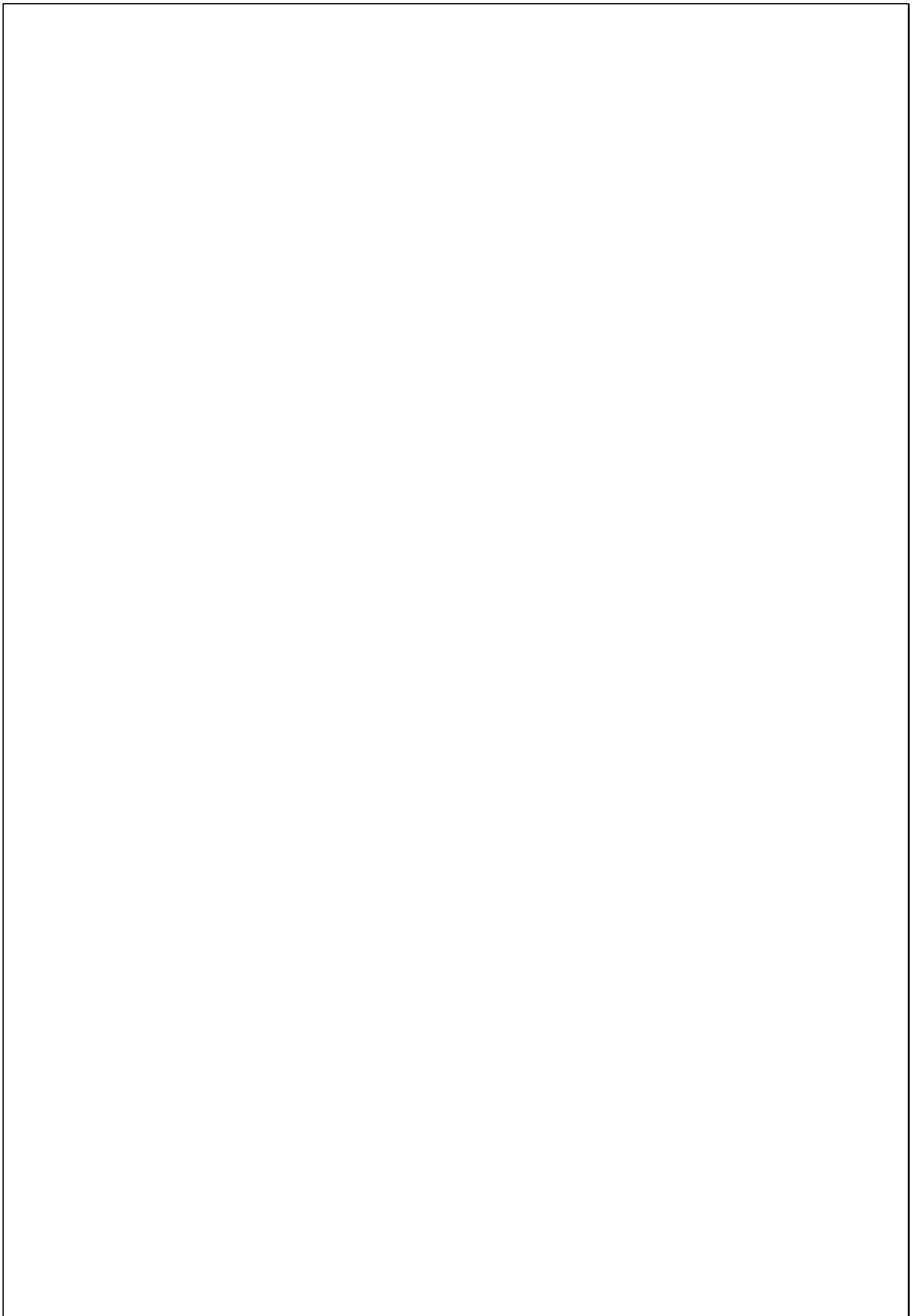
Je remercie Pr. **Abdellatif ZERIZER**, responsable de cette formation Doctorale pour ses encouragements durant mes démarches pour la réalisation de ce travail.

Je remercie vivement Dr. **Abderrachid HAMRANI**, et Dr. **Samia BOUARAB** pour ses conseils, son aide, ses encouragements pour la réalisation de ce travail.

Un très grand merci également à Pr. **Abdelmadjid HAMRANI**, qui m'a aidé dans la rédaction de ce manuscrit.

Je remercie tous les membres de l'entreprise « **TRANSBOIS** » et ainsi que les membres et responsables de l'unité de recherche **URMPE** qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, je tiens à remercier ma famille (la petite et la grande) mes parents qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de mes études.



*Je dédie très spécialement ce travail à la  
Grande dame qui a tant sacrifié pour nous, ma  
très chère mère.*

*A mon très cher père ALI qui m'a toujours  
poussé et motivé dans mes études.*

*A ma petite famille, mon très cher mari  
HAKIM et mes petites peluches Lamis  
et Sarah et mon petit poupon Idris*

*A mes frères et mes sœurs .*

## Annotations et abréviations

$\alpha$	Angle de dépouille.
$\beta$	Angle de bec
$\gamma$	Angle d'attaque
$\delta$	Angle de coupe
$\delta'$	L'angle de coupe et de dépouille (angle oblique).
$\beta_1$	Micro angle de bec arrière.
$R$	Rayon.
$N$	Force normale.
$\mu$	Coefficient de frottement à l'interface outil-coupeau.
$P_h, P_v$	Forces de coupe horizontales et verticales respectivement
$\sigma_{\alpha}$	Répartition des contraintes devant l'arête de coupe
$k$	Module de déformation du bois.
$y$	La déformation dans la direction radiale.
$p$	Pression.
$d$	Diamètre du pénétrateur.
$E$	Module d'élasticité.
$\nu$	Coefficient de Poisson.
$I$	Moment d'inertie de coupeau.
$l$	distance du point d'attaque.
$x_0$	Pré-fissuration géométrique
$NDVI$	L'indice de végétation
$R(NIR)$	La réflectance dans le canal proche infrarouge 0.8 $\mu\text{m}$
$R(VIS)$	La réflectance dans le canal visible 0.6 $\mu\text{m}$
$H$	Le taux d'humidité
$\varepsilon$	Vecteur déformation

$\sigma$	Vecteur contraint
$S$	Matrice souplesse
$E_L,$	Trois modules d'élasticité ou modules d'Young
$E_R,$	
$E_T$	
$G_{RT},$	Trois modules de cisaillement
$G_{TL},$	
$G_{LR}$	
$\nu_{RT}, \nu_{TR}$	Six coefficients de Poisson
$, \nu_{TL}, \nu_{LT}$	
$, \nu_{RL}$	
$x_{i,j}^{t+1}, x_{i,j}^t$	Vecteur position.
$v_{i,j}^{t+1}, v_{i,j}^t$	Vecteur vitesse.
$pbest_{i,j}^t$	La meilleure position par laquelle la particule d'essaim est déjà passée.
$G_{best}^t$	La meilleure position atteinte par les particules de l'essaim.
$w$	Coefficient d'énergie.
$c_1, c_2$	Coefficient d'accélération.
$r_{1,j}^t, r_{2,j}^t$	Nombres aléatoires tirés uniformément dans [0,1], à chaque itération $t$ et pour chaque dimension $j$ .
$D$	Dimensions du problème d'optimisation.

# Liste des figures

## Chapitre I : matériau bois (spécificités des essences Algériens)

---

Figure I.1. Carte synthèse des zones de couverts végétaux (2000-2005)	4
Figure I.2. Cartographie de l'indice de végétation en 2004	5
Figure I.3. Structure de l'arbre (observé en coupe transversale)	8
Figure I.4. Plans de référence du bois	9
Figure I.5. Structure cellulaire du bois : (a) léger, (b) lourd (grossissement :50 fois)	10
Figure I.6. Structure du bois - observations multi échelles	10
Figure I.7. Distribution des composés chimiques dans la paroi cellulaire (en	12
Figure I.8. Différents types de comportement du bois	16

## Chapitre II : Usinage du bois par le procédé de déroulage

---

Figure II.1. Modes de coupes fondamentales, en coupe orthogonale du bois	20
Figure II.2. Angles de coupe	21
Figure II.3. Force et contrainte	22
Figure II.4. Position de la force agissant sur le bec de l'outil	26
Figure II.5. Géométrie du déroulage	28
Figure II.6. Géométries de contact pour des barres de pression	29
Figure II.7. Distribution de pression sous une barre de pression	30
Figure II.8. Principaux mécanismes impliqués durant le déroulage	33
Figure II.9. Ouverture et cheminement d'une fissure de déroulage	34
Figure II.10. Vérification des écarts géométriques d'une surface selon la norme	36

## Chapitre III : Approche numérique du procédé de déroulage

---

Figure III.1. Exemple de types d'extremums	42
Figure III.2. Classification des méthodes d'optimisation	46
Figure III.3. Exemple d'essaims d'oiseaux	47
Figure III.4. Calcul de la nouvelle position et vitesse d'une particule d'algorithme PSO	50
Figure III.5. Représentation graphique de la fonction de Rosenbrock.	51
Figure III.6. Représentation graphique de la fonction la fonction de Schwefel	52
Figure III.7. Organigramme de l'algorithme principal	55

Figure III.8. Organigramme de l'algorithme PSO	56
Figure III.9. Valeurs du fitness à travers les itérations du code PSO.	57
Figure III.10. Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux	58
Figure III.11. Rapport $\frac{h}{R}$ en fonction de l'angle de coupe $\delta$ pour différentes valeurs du coefficient de frottement.	58
Figure III.12. Valeurs du fitness global en fonction de l'épaisseur $h$ , pour différentes valeurs de $\mu$ .	60
Figure III.13. Evolution de $\sigma_{zr\max}$ en fonction de $h$ pour différentes valeurs de $\mu$ .	61
Figure III.14. Variation de la force de coupe tangentielle $p_{h_{edge}}$ (horizontale) en fonction de l'épaisseur du placage $h$ pour différentes valeurs de $\mu$ .	62
Figure III.15. Variation de la force de coupe radiale $p_{v_{edge}}$ (verticale) en fonction de l'épaisseur du placage $h$ pour différentes valeurs de $\mu$ .	62

## Annexe : Partie expérimentale

---

Figure A.1. Régions de recueil de nos essences de bois.	76
Figure A.2. Grumes du bois découpées de : Chêne Zéen, chêne Afares, Chêne liège.	75
Figure A.3. Préparation des éprouvettes : a) découpage par scie à chaîne, b) coupe et rabotage)	80
Figure A.4. Découpage des éprouvettes aux dimensions exigées par les normes adoptées.	81
Figure A.5. Essai de flexion 4 points réalisé au laboratoire.	82
Figure A.6. Sollicitation en fonction de l'allongement pour chaque type de bois.	82
Figure A.7. Rupture des éprouvettes soumises à la flexion.	83
Figure A.8. Essais de traction.	84
Figure A.9. Résultats des essais de traction longitudinal sur le chêne zeen (Bejaia).	84



Figure A.10. Résultats des essais de traction longitudinal sur le Chêne Affères (Bouira).	85
Figure A.11. Résultats des essais de traction longitudinal sur le chêne liège (Jijel).	85
Figure A.12. Essais de compression.	86
Figure A.13. Résultat des essais de compression sur le Chêne Zeen (Bejaia).	87
Figure A.14. Résultat des essais de compression sur le Chêne Affères (Bouira).	87
Figure A.15. Résultat des essais de compression sur le Chêne Liège (Jijel).	88
Figure A.16. Cartographie de l'entreprise TRANSBOIS Bejaia (Google map).	89
Figure A.17. Dérouleuse type : DNH27 de TRANS BOIS EPE/SPA Bejaia.	90
Figure A.18. Bobine de la matière déroulée.	91
Figure A.19. Fissure apparaissant dans la feuille de placage	92
Figure A.20. Irrégularité d'épaisseur dans la feuille de placage.	92
Figure A.21. Fissures apparaissant dans la feuille de placage.	93

## Liste des tableaux

Tableau III-1. Principales essences forestières et leurs superficies (ha).	7
Tableau III-1. Paramètres caractéristique utilisée dans l’algorithme PSO	50
Tableau III-2. Résultats obtenus pour le test d’optimisation par PSO de la fonction de Rosenbrock	51
Tableau III-3. Résultats obtenus pour le test d’optimisation par PSO de la fonction de Schwefel	52
Tableau III.4. Paramètres adoptés dans la résolution du problème d’optimisation.	54
Tableau III.5. Angles de coupe $\delta$ calculés par PSO pour différentes valeurs de $\mu$ et $h$ .	59
Tableau A.1. Données techniques de la dérouleuse type : DNH27(documents <i>TRANS BOIS EPE/SPA Bejaia</i> ).	90

# Sommaire

---

## Introduction générale

### Chapitre I : matériau bois (spécificités des essences Algériens)

---

Introduction .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.1. Cartographie des principales essences endémiques en Algérie	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.1.1. Superficie forestière .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.1.2. Superficie des principales essences forestières .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.2. Propriétés générales du bois.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.2.1. Structure et composition du bois .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3. Propriétés physiques et mécanique du bois .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.1. Propriétés physiques.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.3.2. Propriétés mécaniques.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.4.	
Conclusion.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

### Chapitre II : Usinage du bois par le procédé de déroulage

---

Introduction .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.1. Mécanique de la coupe du bois.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.1.1. Définitions et notations .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.1.2. Forces de coupe.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.1.3. Déformation du copeau .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.2. Procédé de déroulage du bois .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.2.1. Caractéristiques techniques du déroulage .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.2.2. Outil de déroulage.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.2.3. L'état du bois lors du déroulage.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.3. Génération du copeau lors du déroulage .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.3.1. Phénomènes physiques agissant dans la zone de coupe ...	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.3.2. Fissuration et effet Horner .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.4. Formation du placage .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.5. Défauts des placages déroulés .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.5.1. Courbure résiduelle du placage.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.5.2. Variations d'épaisseur.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.5.3. Fissuration.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.5.4. Etat de surface.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.6. Conclusion .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## Chapitre III : Approche numérique du procédé de déroulage

---

Introduction .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.1. Optimisation .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2. Classification.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2.1. Méthodes déterministes (méthodes analytiques).....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2.2. Méthodes stochastiques .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.3. Optimisation par essaim particulaire (PSO).....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.3.1. Principe de base de la PSO .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.3.2. Algorithme PSO .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.3.3. Validation de la méthode PSO.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.4. Stratégies d'optimisation dans le procédé de déroulage .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.4.1. Fonction objective .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.4.2. Développement algorithmique .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.4.3. Résultats et discussions .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.5.	
Conclusion.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

### Conclusion générale

### Référence Bibliographique

#### Annexe : Partie expérimentale

---

A.1. Caractérisation expérimentale du bois .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
A.1.1. Prélèvement des échantillons.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
A.1.2. Préparation des éprouvettes .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
A.1.3. Campagnes d'essais mécaniques .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
A.1.3.1. Essais de flexion quatre points.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
A.1.3.2. Essais de traction.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
A.1.3.3. Essais de compression.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
A.2. Usinage par déroulage industrielle du bois .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
A.2.1. Lieu des travaux.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
A.2.2. Essais de déroulage.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
A.2.3. Defaults de placage.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

### Bilan des communications et Article

## Résumé

Cette étude a résumé sur le procédé de déroulage ; ce type d'usinage est une opération de coupe orthogonale du bois vert dont l'arête de coupe est parallèle à la fibre. Les copeaux (produits) auront comme caractéristiques recherchées d'être continus, sans fissurations, avec une épaisseur régulière et un état de surface correct. Une modélisation pour une simulation de ce procédé est donc nécessaire afin d'identifier les différents facteurs influant sur la qualité des produits déroulés, cette modélisation sera orientée suivant les paramètres de coupe choisis et la géométrie de l'outil préconisée, L'objectif principale est d'étudier la géométrie optimale de l'outil à l'aide de l'algorithme d'optimisation d'essaims de particules (PSO), afin d'obtenir l'épaisseur de placage souhaitée. Le défi consiste à maintenir la meilleure qualité de produit de placage avec le contrôle des conditions de coupe et des variations d'épaisseur. Les résultats numériques obtenus à partir de l'algorithme PSO sont comparés et vérifiés avec ceux expérimentaux. Le modèle proposé nous permet de prédire les angles d'outil caractéristiques pour différentes épaisseurs de copeaux et coefficients de frottement. Pour une plage d'épaisseur de copeaux supérieure à 2 mm, la condition de pré-splitting n'est plus satisfaite, car dans le cas du déroulage, la nécessité d'utiliser une barre de pression devient primordiale.

**Mot clé :** l'algorithme d'optimisation d'essaims de particules (PSO) ; épaisseur ; géométrie de l'outil ; déroulage du bois

## ملخص

هذه الدراسة تلخص عملية تفكيك الخشب الذي تتم عملية القطع على شكل متعامد مع قطعة الخشب المراد تفكيكها حيث حافة القطع للألة تكون متوازنة مع الألياف الخشبية بعد عملية القطع سيكون للرقائق الخشبية الناتجة خصائص محددة ومرغوب فيها مثلًا استمرارية الرقائق الخشبية دون تكسير، بسمك منتظم وحالة سطح صحيحة من الضروري بناء نموذج لمحاكاة هذه العملية من أجل تحديد العوامل المختلفة التي تؤثر على جودة المنتجات غير المناسبة، وسيتم توجيه هذا النموذج وفقًا لمعايير القطع المختارة وهندسة الأداة الموصى بها، الهدف الرئيسي هو دراسة الشكل الأمثل للأداة باستخدام خوارزمية تحسين سرب الجسيمات، من أجل الحصول على سمك استمرارية الرقائق الخشبية المطلوب يكمن التحدي في الحفاظ على أفضل جودة لمنتج الرقائق الخشبية مع التحكم في ظروف القطع والاختلافات في السمك تتم مقارنة النتائج العددية التي تم الحصول عليها من الخوارزمية والتحقق منها مع النتائج التجريبية يسمح لنا النموذج المقترح بالتنبؤ بزوايا الأدوات المميزة لمساقات الرقائق الخشبية المختلفة ومعاملات الاحتكاك بالنسبة لمدى سمك الرقائق الخشبية الذي يزيد عن

2 مم، لم تعد حالة التقسيم المسبق راضية، لأنه في حالة فك الارتباط، تصبح الحاجة إلى استخدام شريط الضغط أمرًا بالغ الأهمية

**الكلمات المفتاحية:** خوارزمية تحسين سرب الجسيمات؛ سمك. هندسة الأداة؛ الخشب التمرير

## **Abstract**

This study summarized the rotary peeling veneer process; this type of machining is an orthogonal cutting operation of the green wood whose cutting edge is parallel to the fiber. The chips (products) will have the desired characteristics of being continuous, without cracking, with a regular thickness and a correct surface condition. Modeling for a simulation of this process is therefore necessary in order to identify the various factors influencing the quality of the products that are unwound, this modeling will be oriented according to the chosen cutting parameters and the geometry of the tool recommended. The main objective is to study the optimal geometry of the tool using the particle swarm optimization algorithm (PSO), in order to obtain the desired plating thickness. The challenge is to maintain the best quality of plating product with control of cutting conditions and thickness variations. The numerical results obtained from the PSO algorithm are compared and verified with the experimental ones. The proposed model allows us to predict characteristic tool angles for different chip thicknesses and coefficients of friction. For a chip thickness range greater than 2 mm, the pre-splitting condition is no longer satisfied because in the case of unwinding, the need to use a pressure bar becomes paramount

**.Keyword:** particle swarm optimization algorithm (PSO); thickness; geometry of the tool; peeling veneer.

## Introduction générale

Le bois est un matériau organique vivant, son utilisation est millénaire, car il est présent dans les toutes premières constructions de l'homme. Il existerait environ 40000 espèces de bois, mais moins d'une centaine d'espèces sont en fait utilisées dans la construction. L'industrie du bois, tout comme l'industrie agroalimentaire, prend ses racines dans l'activité agricole, de la plantation d'arbres jusqu'à l'exploitation forestière. On abat des arbres pour divers usages dans la plupart des pays. Les produits de l'industrie du bois sont divers i.e. le bois d'œuvre, le bois de placage, le contreplaqué, les panneaux d'agglomérés, les pastilles de bois densifiées, et les bois composites. Ces produits de bois sont fabriqués à l'aide de procédés mécaniques tels que le sciage, le tranchage et le déroulage. Dans notre étude on s'intéressera particulièrement à l'industrie du placage du bois par déroulage. Une dérouleuse est une machine semblable à un tour que l'on utilise pour produire des placages, c'est à dire de minces feuilles de bois. Les billons utilisées à cet effet peuvent être trempées dans de l'eau bouillante ou réchauffées à la vapeur pour les ramollir en vue du déroulage. Le bois de placage est produit en fixant un billon sur un tour puis en le faisant tourner contre un couteau (outil de coupe). Le ruban continu de placage qui en résulte est massicoté à la largeur désirée ou pour en éliminer les défauts. Après le séchage, les feuilles de placage sont classées en groupes. Chaque ensemble formera un panneau de contreplaqué de la dimension et de l'épaisseur voulues. Les feuilles sont enduites d'une colle qui va former un lien imperméable lors de l'exposition à la température et à la pression élevée de la presse à chaud. Les panneaux de contreplaqué encore grossiers sont ensuite rognés et éventuellement poncés. Pour une meilleure qualité du placage lors du procédé de déroulage, il faut savoir choisir les paramètres de coupe optimaux tels que : les vitesses de coupe, vitesse d'avance, forme géométrique et matériau de l'outil couteau, etc. Les premiers modèles décrivant les efforts de coupe pendant le processus d'usinage dans l'industrie des métaux ont été proposés par M.E. Merchant [Mer-1945], adapté par la suite dans la coupe du bois par E. Kivimaa [Kim-1950] et McKenzie [Mck-1960]. De nombreux modèles concernant l'usinage du bois ont été développés avec différents objectifs : a) analyser le comportement mécanique et l'usinabilité de matériaux bois [Emy-2004], [Mck-2001], [Sch-2005], b) optimiser les différents paramètres d'usinage tel que : profondeur de coupe [Por-2011], taux d'alimentation [Isk-2005], vitesse de coupe [Cos-2004], [Sin-2005] et la géométrie de l'outil, [Bou-2007],[Kmo-1976], [Kul-2013], [Mck-1975], [Ste-1988], [Woo-1970], c) prévoir et

contrôler l'usure des outils [Fag-2006],[Hua-1994], la géométrie des coupeaux[Fran-1958] et la qualité de surface de la pièce usinée [Agui-2007], [Her-2016], d) étude et comparaison de la nature de différents matériaux constituant l'outil de coupe [Akn-2009], [Dar-2008], [Stew-1991]. e) l'utilisation de la barre de pression dans le cas du placage rotatif [Bus-2012]. Au cours de ces dernières années, et dans l'ère de l'intelligence artificielle (IA), l'usage des méthodes de calcul modernes tels que : la logique floue, les réseaux de neurones artificiels ainsi que les méthodes d'optimisation avancées, commence à se développer de plus en plus rapidement et dans divers domaines, en particulier dans l'industrie d'usinage. Cependant, dans le contexte de l'usinage du bois, très peu de travaux ont été trouvés dans la littérature.

Dans [Tir-2014], les auteurs ont utilisé un algorithme de réseaux de neurones afin de prédire les effets du type d'essence de bois et des conditions de coupe (profondeur de coupe, nombre d'arrêtes de coupe, avance de l'outil) sur l'état de surface final produite par le procédé de fraisage. Un algorithme d'optimisation multi-objectif se basant sur des approches par algorithme génétique (AG) a été développé dans [Gaw-2013] afin d'optimiser les conditions de coupe (profondeur de coupe et avance de l'outil) dans le procédé de tournage à commande numérique (CN) du bois.

Dans notre étude, l'objectif est de trouver la géométrie optimale de l'outil de coupe (appelé aussi couteau) dans le procédé de déroulage du bois en utilisant l'algorithme d'optimisation méta-heuristique : essaim de particules (particle swarm optimization (PSO)). Pour ce faire, le plan adopté dans ce manuscrit est le suivant : Nous débutons dans le premier chapitre par une brève présentation des différentes essences de bois endémiques en Algérie, avec une description de leurs caractéristiques structurales et physico-mécaniques.

Nous donnons dans le deuxième chapitre quelques éléments de base sur la théorie de la coupe orthogonale du bois et ainsi du procédé de déroulage.

Le troisième chapitre aura pour but d'identifier la géométrie optimale de l'outil de coupe de façon intelligente à partir d'une approche d'optimisation numérique se basant sur la méthode d'optimisation méta-heuristique par essaim particulaires (Particle Swarm Optimisation « PSO »), et cela dans le contexte du déroulage du bois.

Une annexe est consacrée à la présentation de la campagne d'essais expérimentaux menées au sein du laboratoire de l'unité de recherche matériaux procédés et environnements (URMPE) de l'UMBB et au sein de l'entreprise TRANSBOIS Bejaia.



# Chapitre I : matériau bois (spécificités des essences Algériens)

---

## Sommaire

Introduction .....	4
I.1. Cartographie des principales essences endémiques en Algérie .....	4
I.1.1. Superficie forestière .....	6
I.1.2. Superficie des principales essences forestières .....	6
I.2. Propriétés générales du bois.....	7
I.2.1. Structure et composition du bois .....	7
I.3. Propriétés physiques et mécanique du bois .....	12
I.3.1. Propriétés physiques.....	12
I.3.2. Propriétés mécaniques .....	14
I.4. Conclusion .....	17

## Introduction

En général, le « bois » est défini comme étant un matériau : hygroscopique, orthotropique, biologique ayant une composition chimique et physique extrêmement complexe [Dav2011]. Ce matériau naturel possède une structuration multi-échelle variée : échelle macroscopique (tronc d'arbre), microscopique (cellulaire) et celle de la paroi de la cellule.

On commencera ce chapitre par une présentation succincte de la cartographie des forêts Algériennes en exposant les principales essences endémiques ainsi que leurs caractéristiques générales. Par la suite, une étude détaillée des propriétés générales du matériau bois sera menée, de la structure et la composition multi-échelle jusqu'aux propriétés physiques et mécaniques. On terminera par une conclusion pour clore ce chapitre.

### I.1. Cartographie des principales essences endémiques en Algérie

La faune et la flore varient en fonction du climat et des précipitations. Comme c'est visible sur la carte de l'Algérie (figure I.1), l'Atlas saharien divise grossièrement le pays en deux zones agricoles. Au nord des montagnes, la culture sans irrigation est possible, la région est boisée et riche en végétation. Des chênes-lièges, du raisin, des olives, des agrumes, des céréales, du coton y poussent ainsi que des pins d'Alep, des chênes verts et des thuyas. L'alfa et l'armoise poussent au sud, là où la végétation est steppique, arbustes rabougris, acacias, jujubiers et autres plantes survivent en dépit des faibles précipitations.

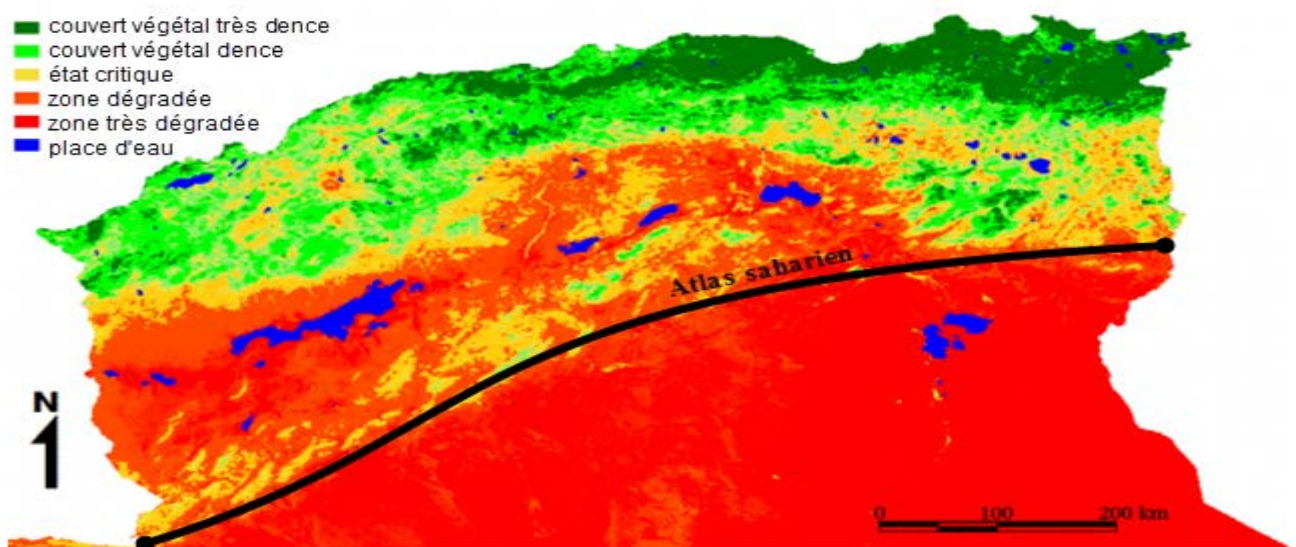
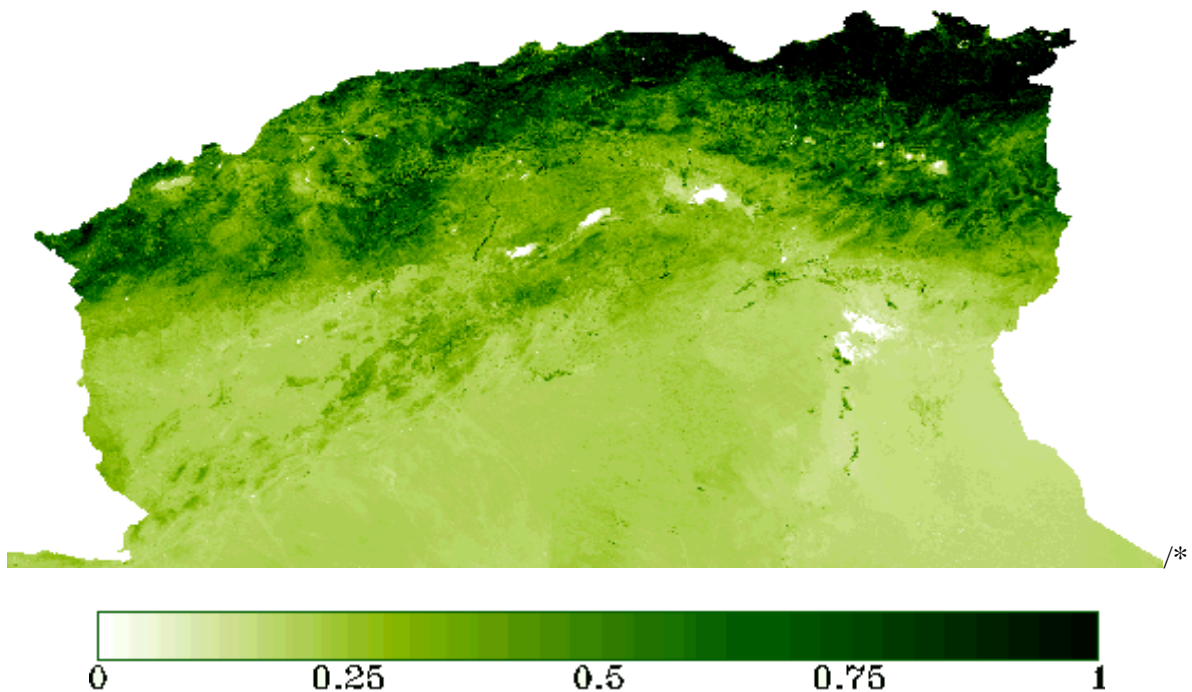


Figure I.1. Carte synthèse des zones de couverts végétaux (2000-2005) [Ben-2008].

Sous l'effet conjugué de la sécheresse et les activités humaines irréfléchies, la forêt algérienne se trouve aujourd'hui dans un état critique, elle connaît une régression quasi exceptionnelle. Un des indicateurs le plus utilisé pour décrire l'activité chlorophyllienne de la végétation est l'indice de végétation (NDVI). Il varie entre 0 (pour surface désertique) et 1 (pour les forêts denses). Sa formule est donnée par l'expression suivante comme étant la différence entre les réflectances dans le visible et le proche infrarouge (imageries satellitaires) :

$$NDVI = \frac{R(NIR) - R(VIS)}{R(NIR) + R(VIS)} \quad I.1$$

Où  $R(VIS)$ , est la réflectance dans le canal visible  $0.6 \mu m$  et  $R(NIR)$  est la réflectance dans le canal proche infrarouge  $0.8 \mu m$ . A titre indicatif, nous représentons les résultats des images NDVI pour l'année 2004 (figure I.2).



**Figure I.2.**Cartographie de l'indice de végétation en 2004 [Ben-2008].

Sur l'ensemble des deux images précédentes, on observe :

- Des fortes valeurs de NDVI pour des sols à recouvrement végétal élevé correspondant aux forêts qui se localisent au Nord Est (El Kala, Kabylie, Aurès-Némamcha, etc.).
- Des valeurs de NDVI moyennes pour des sols à recouvrement végétal moyen correspondent aux terrains irrigués.

- Des valeurs de NDVI faibles pour des zones dénudées à comportement désertique qui se trouvent généralement en région steppique.

### **I.1.1. Superficie forestière**

D'après [Mez-2003], la superficie forestière en Algérie se compte à l'heure actuelle à environ 2 millions d'hectares soit 7% de la couverture nationale.

D'autre part, selon la **DGF-2007** ; si l'on associe les forêts et maquis ensemble, dans la catégorie des formations forestières, nous trouvons qu'elles couvrent une superficie de 4,1 millions d'hectares, cette dernière est répartie comme suit :

- ✓ 1481000 d'hectares de forêts,
- ✓ 1662000 d'hectares de maquis et broussailles,
- ✓ 717000 d'hectares constituent les reboisements réalisés depuis l'indépendance.

En comparant ces chiffres aux données existantes avant la colonisation française en 1830, où les forêts couvraient 5000000 ha, nous constatons la réduction de plus de la moitié du patrimoine forestier existant durant cette période.

Le taux de boisement actuel reste très insuffisant, d'une part, pour assurer l'équilibre physique et biologique, et d'autre part, pour couvrir les besoins en matière de produits forestiers et d'assurer par conséquent des recettes économiques pour le pays [Ike-2000].

### **I.1.2. Superficie des principales essences forestières**

Sur la base des différents travaux de [Sei-1985] et de la **DGF-2007**, les superficies des principaux essences forestières sont récapitulées dans le tableau I-1.

Ce tableau donne une comparaison des données de la **DGF-2007** avec celles de [Bou-1955], [Sei-1985] et [Gha-1997] met en évidence la stabilité et la progression des surfaces de pin d'Alep. Cependant, les superficies des formations de chêne liège, de chêne vert, de chêne zeen et afarés ont considérablement diminué. Les eucalyptus introduits dans le Nord et surtout à l'Est du pays constituent le premier groupe des forêts « économiques », totalisant une superficie de 43000ha (**DGF-2007**) à travers toute l'Algérie.

Les formations de maquis et de broussailles résultants de la dégradation des forêts ont pris de l'extension, ils occupent une superficie de 1662000ha. S'ajoutent à ces superficies forestières les nappes d'alfa qui totalisent 2,7 millions d'hectares (**DGF-2007**).

**Tableau I-1** : Principales essences forestières et leurs superficies (ha).

<b>Références</b>	<b>[Bou-1955]</b>	<b>[Sei-1985]</b>	<b>[Gha-1997]</b>	<b>DGF-2007</b>
<b>Essences forestières</b>				
Pin d'Alep	852000	855000	800000	881000
Chêne liège	426000	440000	463000	229000
Chêne vert	679000	680000	354000	108000
Chêne zeen et afarés	-	67000	65000	48000
Genévriers	279000	-	217000	-
Thuya de Berbérie	157000	160000	143000	-
Cèdre de l'Atlas	45000	30000	12000	16000
Pin maritime	-	12000	38000	31000
Sapin de Numidie	-	300	-	-
Maquis	780000	-	-	1662000

Dans cette partie, les principales essences endémiques des bois Algériens ont été présentées avec les données statistiques de leur superficie. Dans ce qui suit, une étude sur les propriétés générales du bois sera menée.

## **I.2. Propriétés générales du bois**

### **I.2.1. Structure et composition du bois**

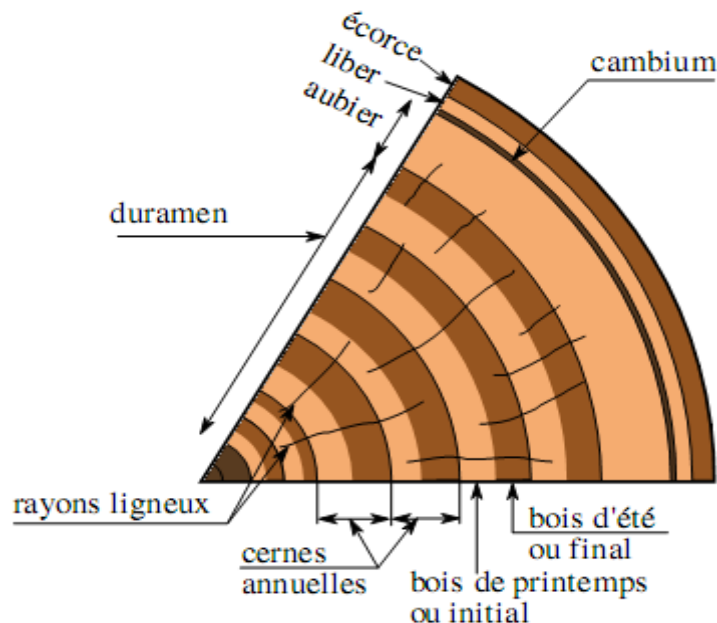
L'arbre est un ensemble de tissus biologiquement actifs d'un point de vue physiologique (circulation de fluide et d'information) et aussi physique (équilibre statique et dynamique de la structure complète). C'est ce couplage fonctionnel entre la résistance mécanique et le rôle physiologique du bois qui est à l'origine de sa complexité structurale [**Lu-1987**]. Dans cette partie en commencera tout d'abord par une description multi-échelle de la structure du bois.

#### **a. Echelle macroscopique**

A cette échelle ; sur une coupe transversale de la tige, le bois est un cylindre à section généralement circulaire composé d'une succession de couches. En partant de la périphérie du

billon, et en se rapprochant de sa moelle (noyau), on distingue à l'œil nu les niveaux suivants (Figure I.3) [Haz-2006] :

- **L'écorce** : sa principale fonction consiste à protéger la partie vivante de l'arbre des agressions extérieures. On distingue deux types : l'écorce externe (suber), et l'écorce interne (liber).
- **L'aubier** : composé essentiellement de matière ligneuse non duraminisée. Il est considéré comme étant l'élément fondamental dans la vie et la croissance de l'arbre, la sève brute y circule et les éléments nutritifs s'y accumulent.
- **Le duramen** : dans cette zone de l'arbre, les cellules de bois sont mortes et n'assurent plus de circulation de sève et présentent donc une meilleure durabilité. Cette transformation de l'aubier en duramen (processus de duraminisations) confère au bois d'œuvre ses caractéristiques chimiques.



**Figure I.3.** Structure de l'arbre (observé en coupe transversale) [Haz-2006].

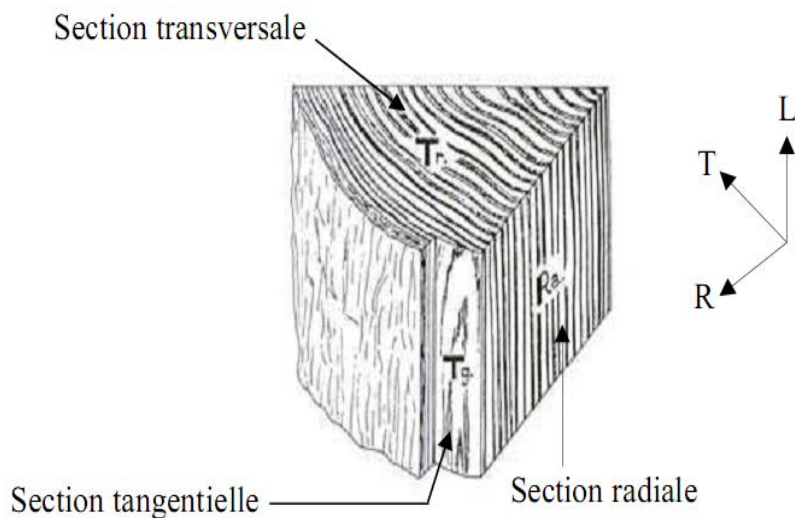
### b. Echelle microscopique

Le bois à cette échelle est assimilé à un squelette polymérique composé de cellules constituant des fibres. Les cellules longitudinales « trachéides », constituent 90% de la structure cellulaire, l'épaisseur de leurs parois cellulaires change en fonction de la période de croissance, mais le rapport longueur-épaisseur reste assez important ; de l'ordre de 1/100[Kul-2013].

D'autres types de cellules appelées « parenchymes » (rayons ligneux) sont disposées de façon transversale, l'arrangement de ces cellules ménage une grande portion de vides plus ou moins remplis d'eau, ce qui explique la porosité élevée du bois, cet aspect se traduit par la densité du matériau [Thi-2001].

Le bois possède une structure cellulaire orientée principalement selon la direction de l'axe de l'arbre. La croissance de l'arbre par la formation de cellules allongées reflète la nature anisotrope du bois, on distingue trois directions privilégiées (Figure I.4) :

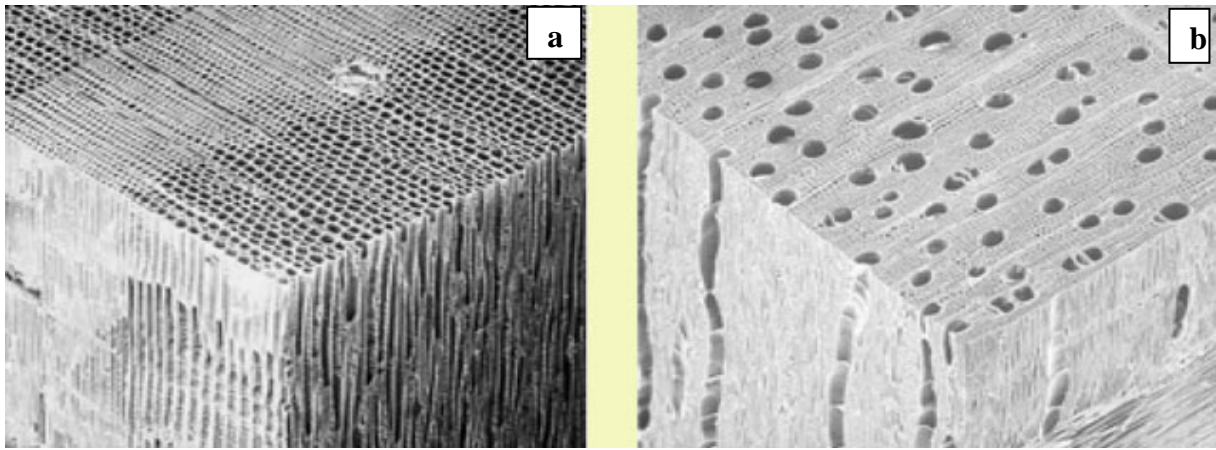
- Longitudinale **L**, suivant l'axe de l'arbre.
- Radial **R**, perpendiculaire aux cernes de croissance,
- Tangentielle **T**, perpendiculaire aux deux directions précédentes (**L** et **R**).



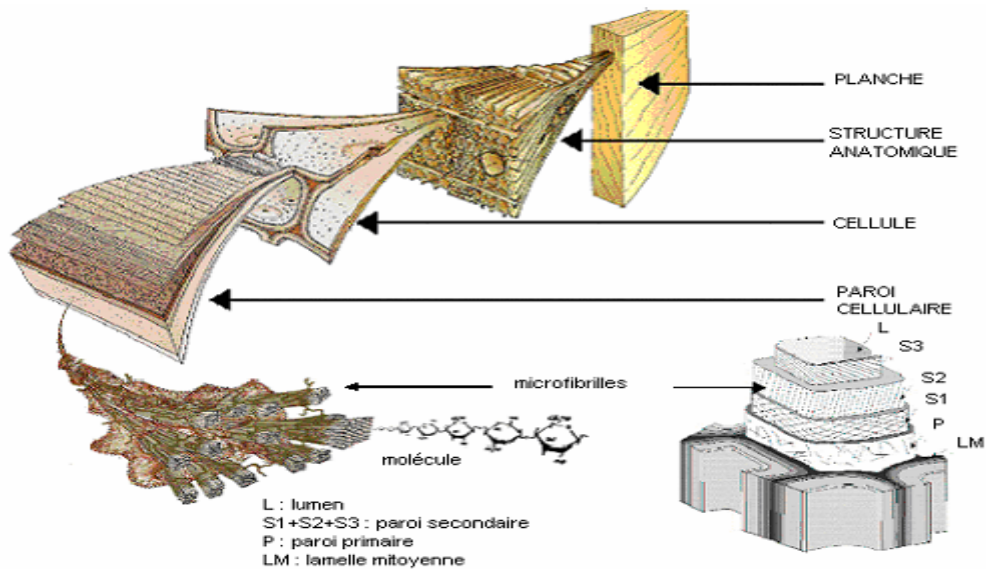
**Figure I.4.** Plans de référence du bois [Tab-2000].

### c. Echelle au niveau de la paroi cellulaire

Le bois est constitué d'Holo cellulose (cellulose plus hémicelluloses) et de lignines, sa composition varie selon les genres et les espèces feuillues ou résineuses [Hol-1998]. Les différentes cellules (trachéides, parenchymes, vaisseaux et fibres) sont liées entre elles par une matrice appelée couche intercellulaire (Figure 1.5). Cette dernière, est composée principalement de lignine, d'hémicellulose et de polymères amorphes. Son épaisseur est de l'ordre de 0,1  $\mu\text{m}$  [Hol-1998]



**Figure I.5.** Structure cellulaire du bois : (a) léger, (b) lourd (grossissement :50 fois) [Dav-2011].



**Figure I.6.** Structure du bois - observations multi échelles [Har-1998].

Dans la structure de la paroi cellulaire nous pouvons distinguer trois couches ; la couche intercellulaire (lamelle mitoyenne), la paroi primaire et la paroi secondaire (figure I.6).

#### ❖ Couche intercellulaire

La couche intercellulaire apparaît après la division de la cellule mère. Son épaisseur varie entre 0,5 et 1,5µm. Cette couche permet de lier les cellules les unes aux autres, elle possède une importante quantité de lignine (environ de 80%). Si certaines microfibrilles isolées traversent cette couche, son pourcentage en cellulose peut cependant être considéré comme étant négligeable [Pav-1987].



### ❖ **Paroi primaire**

Cette paroi très mince mesure environ  $0,1\mu\text{m}$  d'épaisseur, elle contient une grande quantité de lignine. Elle contient également des microfibrilles de cellulose enchevêtrée formant un réseau poreux. Il est souvent difficile de différencier la paroi primaire de la couche intercellulaire [Kol-1984].

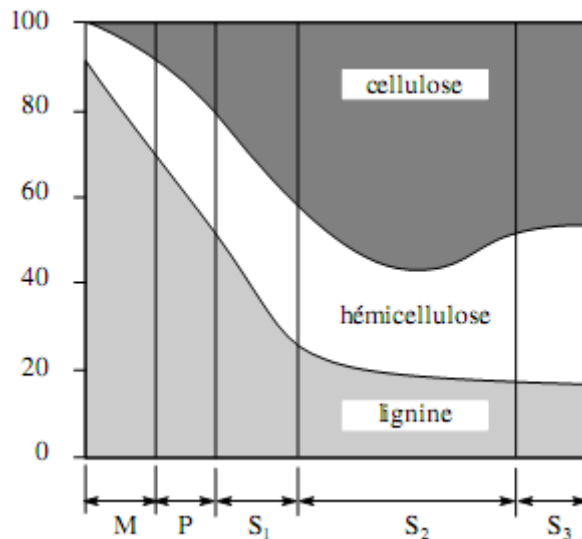
### ❖ **Paroi secondaire**

Cette paroi est essentiellement constituée de microfibrilles de cellulose alignée parallèlement entre elles et disposées en hélice. Elle est formée exclusivement par la cellulose bien qu'elle puisse contenir de petites quantités d'hémicelluloses et de lignines.

Trois sous-couches ; selon l'orientation des micros fibrilles, peuvent être énumérées [Pav-1987] :

- **Couche S1** : elle est constituée de micro fibrilles croisées, avec un angle compris entre  $60^\circ$  et  $80^\circ$  par rapport à l'axe de la cellule. Sa structure peut être considérée comme étant lamellaire (3 à 6 lamelles) et son épaisseur varie entre  $0,1$  et  $0,35\mu\text{m}$  ;
- **Couche S2** : elle constitue la partie la plus volumineuse de la paroi, et elle est composée de microfibrilles en hélice formant un angle de  $5^\circ$  à  $50^\circ$  par rapport à l'axe de la cellule. Cet angle dans les cellules du bois de printemps varie entre  $30^\circ$  et  $50^\circ$  et dans les cellules du bois d'été entre  $5^\circ$  et  $30^\circ$ . L'épaisseur de la couche S2 varie entre  $1$  et  $10\mu\text{m}$  ; elle représente 15 à 85 % de l'épaisseur totale de la couche ;
- **Couche S3** : relativement mince, son épaisseur varie entre  $0,5$  et  $1,1\mu\text{m}$ , elle est constituée de micro fibrilles dont l'orientation varie entre  $60$  et  $90^\circ$  par rapport à l'axe de la cellule.

On retient donc que la composition chimique principale du matériau bois (biopolymères) est : la cellulose (45 à 50 %), les hémicelluloses (20 à 25 %) et la lignine (20 à 30%). La proportion de ces composants varie dans chacune des couches citées précédemment (figure I.7).



**Figure I.7.** Distribution des composés chimiques dans la paroi cellulaire (en %) [Nav-2005].

### I.3. Propriétés physiques et mécanique du bois

#### I.3.1. Propriétés physiques

Les propriétés physiques du bois sont les caractéristiques quantitatives du bois et son comportement face à des influences extérieures autres que les forces appliquées (aspect mécanique). Les propriétés physiques du bois dépendent largement de sa structure, c'est à dire de la disposition et de la nature des éléments qui le composent. Nous parlerons ici des propriétés directionnelles (anisotropie), du contenu en humidité (hygroscopie), de la densité, des propriétés dimensionnelles (rétractabilité/gonflement), de la conductivité (thermique, électrique ou sonore), de la durabilité et de l'apparence (grain, texture, couleur, odeur). Le comportement mécanique du matériau bois est très largement conditionné par l'état physique du matériau, pour un bois de densité (ou masse volumique) donnée, l'indication d'une rigidité, d'une contrainte limite d'élasticité ou d'une charge de rupture, n'aura de sens que si l'on précise le taux d'humidité et la température des conditions d'utilisation. Dans cette partie, on s'intéressera principalement aux propriétés physiques suivantes : l'anisotropie et l'hygroscopie.

##### a. Anisotropie

Le bois est un matériau anisotrope, c'est-à-dire que sa structure et ses propriétés varient dans les différentes directions du plan ligneux : directions longitudinale (parallèles aux fibres, le fil du bois), radiale (perpendiculaire aux fibres et normales aux cernes) et

tangentielle (perpendiculaire aux fibres et tangent aux cernes). Cette anisotropie est due à la disposition et la forme particulière des différents éléments du bois, dont la plupart (vaisseaux, fibres et trachéides) sont allongés dans la direction longitudinale. Pour cette raison, bien que la plupart des propriétés du bois diffèrent dans ces trois directions, les différences de propriétés entre l'axe radial et tangentiel sont en général mineures, les différences principales étant observées pour l'axe longitudinal, d'où l'hypothèse du matériau bois orthotrope [Bon-2007].

### b. Hygroscopie

Le matériau bois présente un comportement hygroscopique qui influence de façon importante ses propriétés mécaniques. L'eau est présente sous trois formes dans le bois [Ska-1988] :

- ✓ Au cours de la vie de l'arbre, la sève et l'eau sont transportées dans les vaisseaux et les trachéides par capillarité. Cette eau est appelée eau libre. La portion de lumen remplie par l'eau libre dépend des conditions de pression et de température.
- ✓ Les parois cellulaires, composées de molécules d'hémicellulose et de cellulose, absorbent une partie des molécules d'eau se situant dans le lumen. Cette eau est appelée l'eau liée.
- ✓ Les polymères constituant le matériau bois sont composés de molécules d'eau. On appelle cette eau l'eau de composition car elle ne peut être extraite qu'en dégradant le matériau bois (création de charbon de bois par exemple).

Le taux d'humidité  $H$ , exprimé en pourcent, dans le bois est défini par l'équation I-2 selon la norme **NF B51-004 85**. Il est calculé par différence de masse entre celle du bois en l'état humide  $Masse_{bois-humide}$  et celle du bois à l'état anhydre  $Masse_{bois-anhydre}$ . L'état anhydre est obtenu après séchage à 103°C pendant plusieurs heures pour retirer l'eau libre et l'eau liée.

$$H = \frac{(Masse_{bois-humide} - Masse_{bois-anhydre})}{(Masse_{bois-anhydre})} * 100 \quad \text{I.2}$$

Le taux d'humidité peut varier de 25 à 250 % pour le bois saturé (bois vert), de 10 à 20 % pour le bois séché à l'air et 10 % et moins pour le bois séché artificiellement (par air chaud

climatisé, pompe à chaleur ou à vide principalement). Dans la plupart des espèces, le taux d'humidité est plus important dans l'aubier que dans le bois de cœur [Ska-1988]

La rétractabilité et le gonflement traduisent la capacité des dimensions du bois à changer en fonction de son taux d'humidité. Les dimensions du bois sont stables lorsque son taux d'humidité est au-dessus du point de saturation des fibres [Ska-1988]. Les dimensions du bois varient lorsque le taux d'humidité change en dessous du point de saturation des fibres : le bois se rétracte lorsque les parois cellulaires perdent de l'eau, il gonfle lorsque les parois cellulaires gagnent de l'eau. Ces retraits et gonflements peuvent entraîner la déformation, le fendage ou l'éclatement des morceaux de bois.

### I.3.2. Propriétés mécaniques

#### ✓ Modèle élastique

D'un point de vue mécanique, le bois possède un comportement anisotrope marqué, son comportement et son niveau de résistance dans une direction donnée ne sont pas les mêmes selon que le bois soit sollicité en traction ou en compression.

Les données essentielles du modèle de comportement élastique linéaire du bois idéal sont présentées dans cette partie. Le bois y est considéré comme un milieu continu, élastique, homogène admettant une symétrie matérielle orthotrope cylindrique [Lu-2002].

En notation tensorielle, la loi de comportement élastique s'écrit comme suit :

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad \text{avec } i, j, k \in (1, 2, 3), \quad \text{I.3}$$

la loi de comportement (équation (I-3)) s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}, \quad \text{I.4}$$

avec (1 = L ; 2 = T ; 3 = R ; 4 = 23 = TR ; 5 = 13 = LR ; 6 = 12 = LT)

$\{\varepsilon\}$  : vecteur déformation.

et  $\{\sigma\}$  : vecteur contraintes.

$\{S\}$  : matrice des souplesses.

On définit le comportement élastique orthotrope, dans la base  $(R, L, T)$  à partir des trois modules d'élasticité ou modules d'Young  $(E_L, E_R, E_T)$ , des six coefficients de Poisson

$(\nu_{RT}, \nu_{TR}, \nu_{TL}, \nu_{LT}, \nu_{RL})$  et des trois modules de cisaillement  $(G_{RT}, G_{TL}, G_{LR})$ .

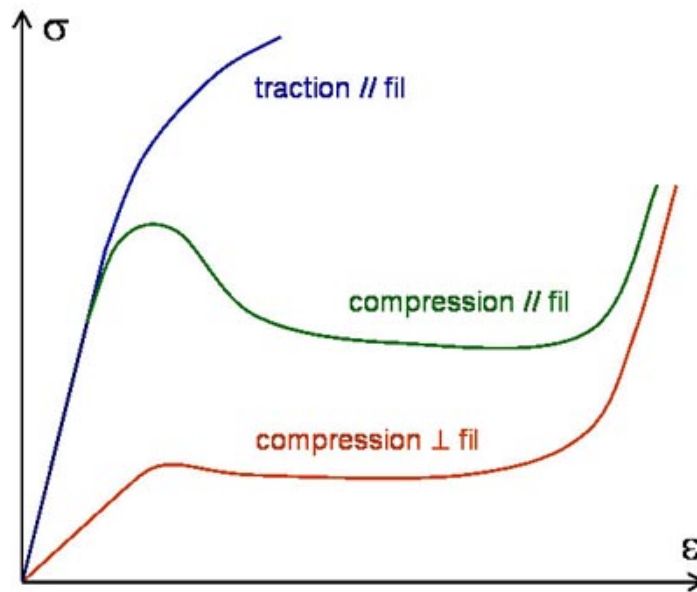
La loi de comportement, équation (I-4), exprimée en termes de souplesses élastiques est transposée directement en termes de grandeurs techniques exprimées dans la base  $(R, L, T)$  conformément à la relation suivante [Lu-2002] :

$$\frac{-\nu_{RL}}{E_R} = \frac{-\nu_{LR}}{E_L}, \frac{-\nu_{TL}}{E_T} = \frac{-\nu_{LT}}{E_L} \text{ et } \frac{-\nu_{RT}}{E_R} = \frac{-\nu_{TR}}{E_T} \quad \text{I.5}$$

Ainsi, les propriétés élastiques de chaque essence du bois sont totalement définies par neuf paramètres  $E_L, E_T, E_R, G_{TL}, G_{LR}, G_{RT}, -\nu_{TR}, -\nu_{LT}, -\nu_{LR}$ .

D'après la figure I.8 (contrainte-déformation) on distinguera 4 modes de rupture :

- Rupture fragile en traction parallèle au fil, caractérisée à la fois par la rupture des fibres et la fissuration par séparation entre fibres. Ceci s'explique par le fait qu'une fissure perpendiculaire à la fibre change de direction pour continuer à se propager à l'interface entre fibres dans la direction du fil.
- Rupture fragile en traction perpendiculaire au fil (direction radiale ou tangentielle), par fissuration entre fibres. La résistance du bois dans ce mode de sollicitation est particulièrement faible.
- Ductilité en compression parallèle au fil, caractérisée par une contrainte pic suivie d'un adoucissement, puis d'un plateau. Dans ce mode de rupture, les fibres du bois subissent un micro flambement qui se traduit par l'apparition de bandes de cisaillement
- Ductilité en compression perpendiculaire au fil (direction radiale ou tangentielle), caractérisée aussi par un plateau en contrainte, suivi d'une remontée de celle-ci. Dans ce mode de rupture, les fibres subissent un effondrement de leurs parois avec, pour conséquence, une réduction de la porosité. On parle de densification du bois.



**Figure I.8** Différents types de comportement du bois [Lu-2002].

Il est à noter que ces caractéristiques mécaniques sont fonction : de la teneur en eau, et de la densité du bois [Lu-2002].

#### ✓ **Modèle élasto-plastique**

Ce modèle permet de considérer le renversement des contraintes et la variation de la rigidité et la viscosité du bois en fonction de la teneur en humidité et de la température pendant le séchage. La rigidité du bois est déterminée d'après la température et la teneur en humidité

La difficulté essentielle soulevée par ce modèle est la détermination de la fonction seuil  $F$  et du seuil plastique  $\sigma_p$ , car ces derniers dépendent de la température et de l'humidité. Les informations à ce sujet, aussi bien expérimentales que théoriques sont difficiles à définir.

#### ✓ **Modèle viscoélastique**

Le modèle viscoélastique est de loin le modèle le plus utilisé pour la modélisation du comportement mécanique du bois. Le modèle de comportement viscoélastique est basé généralement soit sur le modèle de Maxwell, le modèle de Kelvin–Voigt ou le modèle de Burger.

### ✓ **Modèle élasto-viscoplastique**

La théorie de la viscoplasticité doit être utilisée dans les cas où les matériaux visqueux subissent des sollicitations très élevées, tel que le bois au cours d'un séchage intensif. On pourrait profiter de ce modèle de type élasto-plastique que s'il est capable de simuler le comportement rhéologique d'un matériau et également le comportement plastique. Cependant, comme c'est le cas pour l'élasto-plasticité, on doit disposer d'un critère pour une fonction seuil du bois ce qui est difficile à déterminer. La complexité est multipliée par le caractère anisotrope du bois et par le fait que la viscoplasticité est au moins une fonction de la température et la teneur en humidité.

## **I.4. Conclusion**

Après un premier volet de présentation des différentes essences de bois endémiques en Algérie, on peut retenir le constat suivant : un état de dégradation critique des forêts avec une grave perte de la diversité forestière, ce qui nécessite des plans d'intervention et d'aménagement pour la lutte contre cette dégradation. Dans un deuxième volet, une description des caractéristiques structurales et physico-mécaniques du bois a été présentée, l'orthotropie et l'hygroscopie sont les paramètres les plus prépondérants qui déterminent le comportement de ce dernier.

Dans le chapitre qui suit, une étude sur la coupe du bois dans le procédé de déroulage sera menée.

# Chapitre II : Usinage du bois par le procédé de déroulage

---

## Sommaire

Introduction .....	19
II.1. Mécanique de la coupe du bois.....	19
II.1.1. Définitions et notations .....	20
II.1.2. Forces de coupe.....	21
II.1.3. Déformation du copeau.....	26
II.2. Procédé de déroulage du bois .....	28
II.2.1. Caractéristiques techniques du déroulage.....	28
II.2.2. Outil de déroulage.....	30
II.2.3. L'état du bois lors du déroulage.....	31
II.3. Génération du copeau lors du déroulage .....	32
II.3.1. Phénomènes physiques agissant dans la zone de coupe .....	32
II.3.2. Fissuration et effet Horner .....	33
II.4. Formation du placage .....	34
II.5. Défauts des placages déroulés .....	35
II.5.1. Courbure résiduelle du placage.....	36
II.5.2. Variations d'épaisseur.....	37
II.5.3. Fissuration.....	37
II.5.4. Etat de surface.....	37
II.6. Conclusion .....	38



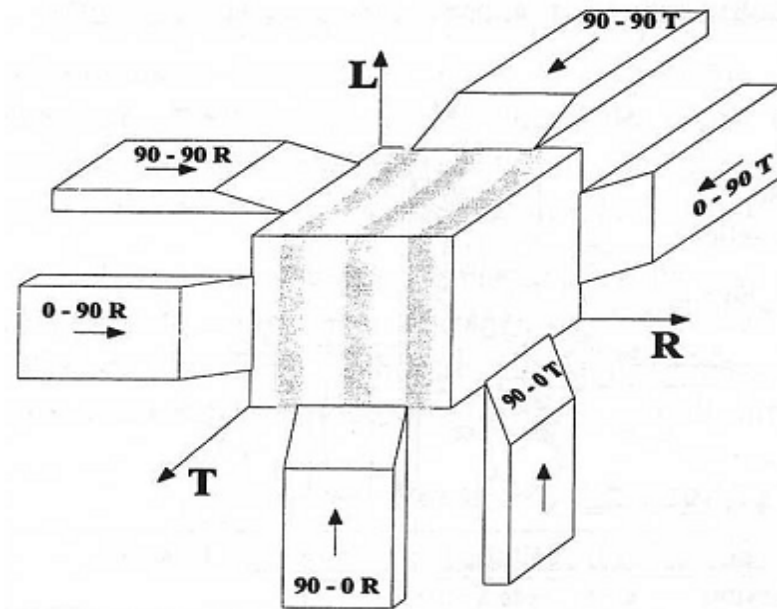
## Introduction

Dans l'industrie du bois, l'usinage a acquis une grande importance ces dernières années. Les diverses propriétés des fibres de bois et de leurs orientations jouent un rôle significatif dans le processus d'usinage [Hoc-2012]. L'étude du processus d'usinage du bois comporte plusieurs aspects : la formation du copeau, la durée de vie de l'outil, la rugosité de la surface usinée et la propagation de fissure dans le bois. Il faut également prendre en compte plusieurs facteurs tels que l'humidité, l'anisotropie, la température et les vibrations. Le tranchage et le déroulage du bois sont les seuls procédés dont la valeur ajoutée est apportée au copeau et non pas à la pièce (billon). Les copeaux auront comme caractéristiques recherchées : d'être continus, sans fissuration avec une épaisseur régulière et un bon état de surface.

### II.1. Mécanique de la coupe du bois

Durant la coupe du bois, on s'intéresse généralement à définir les interactions entre l'arête de coupe et le copeau, en prenant en considération les propriétés physiques et mécaniques du matériau [Tim-1951]. On distingue trois modes principaux de coupe du matériau bois (figure II.1) :

- **90-90** : où le plan de coupe et l'arête sont perpendiculaires à la direction des fibres.
- **90-0** : où le plan de coupe est parallèle aux fibres tandis que l'arête de coupe est perpendiculaire à celles-ci.
- **0-90** : où le plan de coupe est perpendiculaire aux fibres tandis que l'arête de coupe est parallèle à ces dernières. C'est le mode de coupe utilisé dans le procédé de déroulage [Thi-1988, Cyr-1996].



**Figure II.1.** Modes de coupes fondamentales, en coupe orthogonale du bois [Mck-1961]

### II.1.1. Définitions et notations

L'interaction entre les propriétés physiques et mécaniques ainsi que la géométrie de l'outil lors de l'usinage du bois, est l'un des facteurs les plus influents sur la qualité du produit final.

La désignation des angles de l'outil est donnée par [Sit-1983] :

- $\alpha$  - angle de dépouille, variant en générale entre  $1^\circ - 15^\circ$ , et autour de  $1^\circ$  dans le cas du déroulage.
- B - angle de bec, compris entre  $19^\circ - 23^\circ$  dans le cas du déroulage.
- $\gamma$  - angle d'attaque, variant autour de  $70^\circ$  dans le cas du déroulage.
- $\delta$  - angle de coupe, obtenu par l'équation (figure II.2) :

$$\delta = \alpha + \beta \quad \text{II.1}$$

- $\delta'$  - angle oblique, déduit à partir de l'angle de coupe et de dépouille

$$\tan \delta' = \tan \delta \cdot \cos \alpha \quad \text{II.2}$$

- $\beta_1$  - angle micro biseau

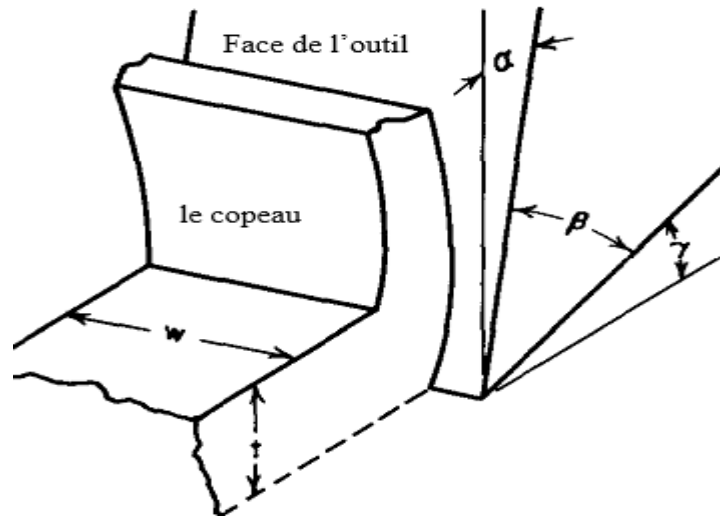


Figure II.2. Angles de coupe [Woo et Koch-1970]

### II.1.2. Forces de coupe

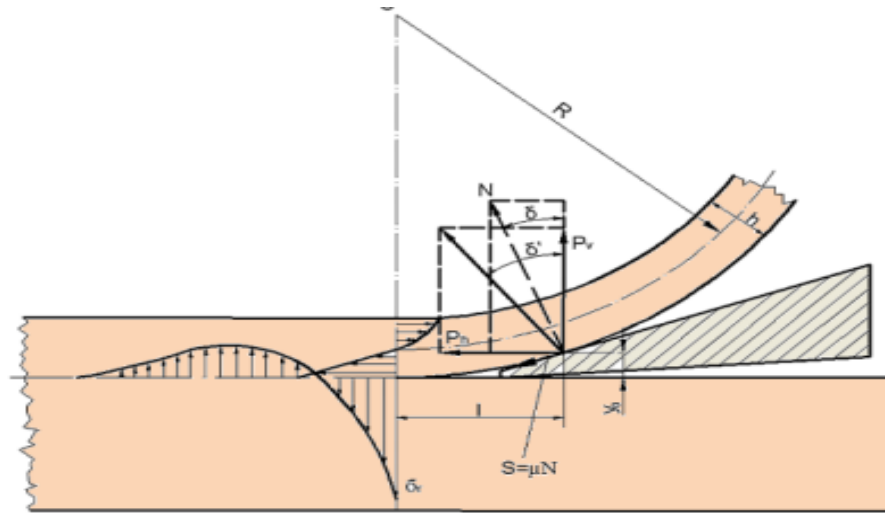
Les mesures expérimentales des forces de coupe agissant lors de l'usinage du bois permettent la modélisation des phénomènes observés durant ce processus. Les modèles développés contribuent à la conception et l'optimisation des machines-outils et des procédés de fabrication [Mar-2009]. Dans la littérature, plusieurs travaux concernant l'étude de l'évolution des forces de coupe pendant l'usinage du bois peuvent être énumérés, on citera [Pet-1964], [Flo-2004], [Flo-2005], [Fis-2003], [Fis-2004], [Pal-2005] et [Akn-2008].

Dans ce qui suit, la procédure de résolution pour le calcul des forces de coupe est présentée. On supposera que le copeau se déforme localement dans la zone du bec de l'outil suivant un rayon  $R$  (figure II.3).  $N$  est la force normale orthogonale, construite à partir des deux composantes : horizontale et verticale. Une force de frottement apparaît au niveau de l'interface outil/copeau, sa valeur est donnée par :

$$S = \mu.N$$

II.3

Où  $\mu$  coefficient de frottement.


**Figure II.3.** Force et contrainte [Mit-1990]

Les deux composantes de la force de coupe sont données par [Ete-2013]:

$$P_h = N \sin \delta + \mu N \cos \delta \quad \text{II.4}$$

$$P_v = N \cos \delta - \mu N \sin \delta \quad \text{II.5}$$

Ainsi, on a :

$$\tan \delta' = \frac{P_h}{P_v} = \frac{\tan \delta + \mu}{1 - \mu \cdot \tan \delta} \quad \text{II.6}$$

Où  $P_h$  et  $P_v$  sont les forces de coupes horizontales et verticales respectivement.

La déformation du copeau engendre un champ de contraintes dans le plan horizontal de l'arrête de coupe de l'outil. Ce champ de contraintes cause un éclatement du bois dans la zone en contact direct avec l'arrête de coupe, ce phénomène est appelé dans la littérature "pré-fissuration" (pre-splitting) [Ete-2013] [Mck-1961]. La distribution du champ de contraintes au niveau de l'arrête de coupe est donné par :

$$\sigma_{zr} = k \cdot y \quad \text{II.7}$$

où :  $k (N/mm^3)$  est appelé module de déformation du bois (déterminé par l'essai de dureté).

$y$  la déformation dans la direction radiale. La corrélation suivante est donnée par [Tim-1951]

$$F = U_i - U_e \quad \text{II.8}$$

où :  $p$  pression,  $d$  diamètre du pénétrateur (essai de dureté),  $E$  module d'élasticité dans la direction radial,  $\nu$  coefficient du poisson. Pour plus de détails sur cette formulation, le lecteur peut se référer à [Ian-1965], [Ros-1964], [Gia-1997].

La déformation  $y$  peut être calculé en fonction de la distance  $x$  au niveau de l'arrête de coupe, comme suit :

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad \text{II.9}$$

où:

$$y = -\frac{P_v \cdot e^{-\beta \cdot x}}{2\beta E \cdot I} \left[ \cos \beta x + \beta \cdot l (\cos \beta x - \sin \beta x) \right] \quad \text{II.10}$$

Avec  $P_v$  composante vertical,  $I$  moment d'inertie du copeau,  $l$  distance du point d'attaque de la force  $P_v$ . D'après l'équation (9) et (10) on trouve l'expression de la résistance maximale à la traction :

$$\sigma_{zr \max} = \frac{kP_v (1 + \beta \cdot l)}{2\beta^3 \cdot E \cdot I} \quad \text{II.11}$$

Les conditions qui provoquent le phénomène de pré-découpage (pré-fissuration) sont :

- La valeur de la résistance maximale à la traction  $\sigma_{zr \max}$  doit être plus grande que celle du bois.
- Pour que le copeau soit continu (bon placage), il faudrait que l'effort exercé sur la face du copeau soumise à la traction soit plus petite que la résistance à la traction du bois [Ete-2013].

Afin de déterminer les composantes de la force de coupe, on utilisera la loi d'équilibre des moments. Dans le cas où l'axe neutre se trouve au milieu du copeau, l'expression de l'élongation et du moment d'inertie sont données par :

$$\varepsilon = \frac{r-R}{R} = \frac{h}{2R} \quad \text{II.12}$$

et

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad \text{II.13}$$

Si l'axe neutre est déplacé de tel sorte que :

$$\varepsilon \cong \frac{h}{5R} \quad \text{II.14}$$

et

$$W \cong \frac{bh^2}{10} \quad \text{II.15}$$

En utilisant les équations précédentes, l'expression d'équilibre des moments sera comme suit :

$$M = P_v \cdot l + P_h \cdot y_0 = \sigma_h \cdot W = E \frac{h}{5R} \cdot \frac{b \cdot h^2}{10} \quad \text{II.16}$$

Où  $b$  est la largeur du copeau.

Les valeurs des coordonnées  $l$  et  $y_0$  dans l'équation ci-dessus sont :

$$l \cong R \sin \delta \quad \text{II.17}$$

et

$$y_0 \cong R(1 - \cos \delta) \quad \text{II.18}$$

En insérant ces derniers dans l'équation d'équilibre, nous obtenons :

$$P_v = \frac{1}{f(\mu, \delta)} \cdot \frac{E \cdot b}{50} \cdot \left(\frac{h}{R}\right)^2 \cdot h \quad \text{II.19}$$

où

$$f(\mu, \delta) = \sin \delta (1 - \mu \cdot \tan \delta) + (\sin \delta + x_0/R) \cdot \tan \delta \cdot (\tan \delta + \mu) \quad \text{II.20}$$

$x_0$  Longueur de pré-fissuration.

D'après l'équation (7) on peut déduire l'expression de la force de coupe horizontale :

$$P_h = \frac{\tan \delta'}{f(\mu, \delta)} \cdot \frac{E}{50} \cdot \left(\frac{h}{R}\right)^2 \cdot h \quad \text{II.21}$$

Il est à noter que la face ronde du bec de l'outil est affectée par une force qui doit dépasser la résistance à la compression du bois figure II.3. Cette force est proportionnelle à la section du bec de l'outil et la résistance à la compression du bois :

$$P_e = s \cdot b \cdot \sigma_c \quad \text{II.22}$$

où

$s \cong 2\rho$  L'épaisseur du bec,  $b$  Rayon du bec,  $\sigma_c$  la résistance à la compression du bois.

L'expression finale qui exprime la valeur de la force horizontale par unité de longueur :

$$\frac{P_h}{b} = 2\rho\sigma_c + \frac{\tan \delta'}{f(\mu, \delta)} \cdot \frac{E}{50} \cdot \left(\frac{h}{R}\right)^2 \cdot h \quad \text{II.23}$$

D'après l'équation (23), les deux composantes de la force au niveau du bec de l'outil sont données par :

$$P_{eh} = P_e \cos\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right) \quad \text{II.24}$$

$$P_{ev} = P_e \sin\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right) \quad \text{II.25}$$

La force globale de la composante verticale agissant sur l'outil est :

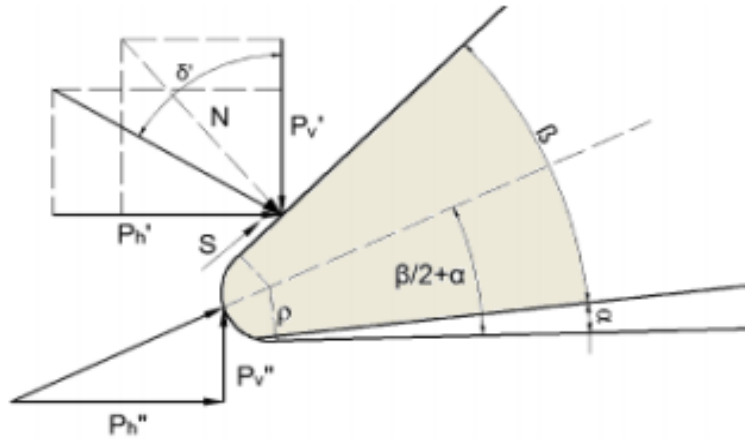
$$P_{vt} = P_{ev} - \frac{B \cdot h}{\tan \delta'} \quad \text{II.26}$$

De la même façon, la force globale de la composante horizontale agissant sur l'outil est :

$$P_{ht} = P_{eh} + \mu \cdot \sin(\beta/2 + \alpha) + B \cdot h \quad \text{II.27}$$

où :

$$B = \frac{\tan \delta'}{f(\mu, \delta)} \cdot \frac{E}{50} \cdot \left(\frac{h}{R}\right)^2 \quad \text{II.28}$$



**Figure II.4.** Position de la force agissant sur le bec de l'outil [Sit-1990], [Sit-1983].

### II.1.3. Déformation du copeau

Dans la section précédente, on a supposé que le point de référence de la force de coupe ainsi que le ratio  $h/R$  sont connus, mais la réalité est bien différente, la déformation du copeau n'est pas régulière et se comporte de façon plus complexe où la formulation du problème par les équations d'équilibre statique ne suffit pas. Le copeau se déforme de différentes manières, selon l'action combinée des forces intérieures et extérieures. Afin de déterminer le ratio  $h/R$ , il sera plus judicieux d'appliquer un principe variationnel. L'idée de base est de minimiser le travail des forces agissant sur le système pour en déduire la déformation du copeau correspondante. Dans ce qui suit on décrit le travail de forces intérieures et extérieures agissant sur le système comme suit :

$$\Delta(U_i + U_e) = 0 \text{ et } U_e = -\sum F_j \delta_{yj} \quad \text{II.29}$$

où :  $U_i$ ,  $U_e$  sont les travaux des forces intérieures et extérieures respectivement,  $\Delta$  symbole de variation,  $F_j$  Forces intérieures,  $\Delta y_j$  déplacements virtuels.



Les forces intérieures sont données par l'équation suivante (méthode de Ritz):

$$U_i = \frac{1}{2} \int E.I.y''^2 dz = \frac{1}{4} \left( \frac{\pi}{2l} \right)^4 . E.I.y^2.l \quad \text{II.30}$$

où :  $y''$  représente la courbure de l'axe neutre.

Les forces extérieures sont exprimées par :

$$U_e = \frac{P_h \cdot \Delta l}{2} + \frac{P_v \cdot y_0}{2} \quad \text{II.31}$$

La déformation longitudinale du copeau est donnée :

$$\Delta l = \frac{P_h \cdot l}{E.b.h} \quad \text{II.32}$$

Prenant la fonction  $F = (U_i - U_e)$  nulle, après dérivation sur  $y$ , on trouve :

$$\frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad \text{II.33}$$

Après résolution de l'équation (34) et on supposant  $l \cong R \sin \delta$  ; on obtient le ratio  $h/R$  par l'équation:

$$\frac{h}{R} = \frac{2 \sin \delta}{(\tan \delta + \mu)} \sqrt{\mu \tan \delta} \quad \text{II.34}$$

On peut observer que dans notre développement, on n'a pris en compte que la plage de déformation élastique sans ajouter la déformation plastique, ce qui est relativement insuffisant.

Une expression plus correcte est donnée dans [Ete-2013] :

$$\frac{h}{R} = \frac{2 \sin \delta}{\sqrt{3}(\tan \delta + \mu)} \sqrt{(\mu \tan \delta)} \quad \text{II.35}$$

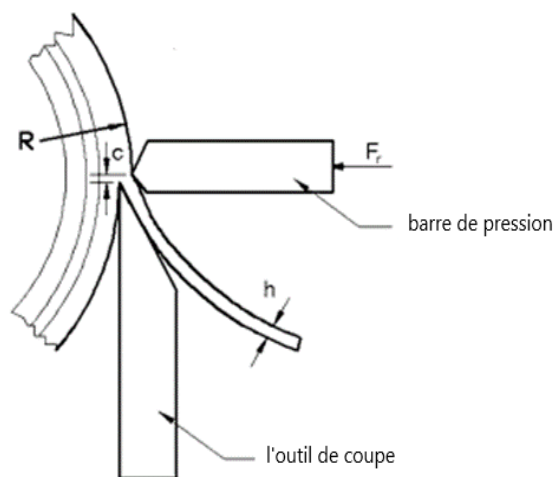
Dans cette équation on remarque que le ratio  $\frac{h}{R}$  dépend seulement de  $\delta$  et  $\mu$ , qui sont des constantes fixes pour un outil de géométrie donnée.

## II.2. Procédé de déroulage du bois

Le déroulage est l'une des techniques permettant la première transformation des bois, naturellement "cylindriques", en produits industriels. La différence majeure qui existe entre les procédés d'usinage conventionnels et le déroulage réside dans l'utilisation postérieure du copeau. En effet, dans les procédés de mise en forme conventionnels, nous éliminons un copeau pour obtenir une forme déterminée qui sera le produit. Nous recherchons alors à évacuer ce copeau. Dans le cas du déroulage, le copeau constitue le produit appelé placage. A ce titre, nous recherchons à obtenir un placage le plus continu possible. Ainsi, la forme des outils est bien distincte de celles couramment employée dans le travail des métaux et même du bois. L'outil servant à couper le bois est appelé couteau.

### II.2.1. Caractéristiques techniques du déroulage

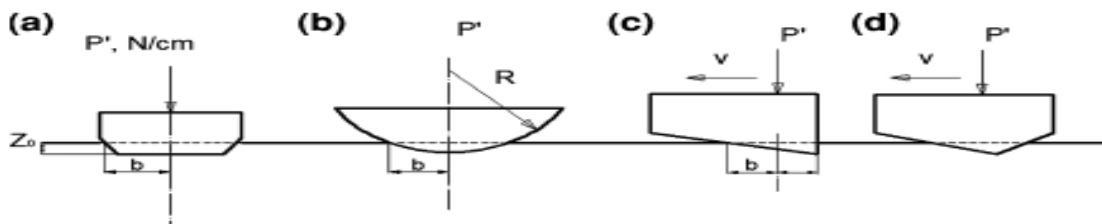
Dans le procédé de déroulage, le couteau est animé d'un mouvement de translation proportionnel à la rotation du bois. Ces mouvements combinés produisent un ruban continu de placage. Le mécanisme de coupe approprié au déroulage est le mode ( $0^\circ$ - $90^\circ$  T).



**Figure II.5.** Géométrie du déroulage [Ete-2013].

A partir de 1840, les dérouleuses se sont équipées d'un outil appelé barre de pression pour le déroulage de certaines essences de bois avec certaines épaisseurs de placage. Le rôle de cette barre est de limiter la fissuration cyclique qui apparaît dans le déroulage en fortes épaisseurs. De nombreuses études ont été menées afin d'optimiser l'efficacité de cette barre de pression

[Kol-1975] [Ete-2013] [Mck-1961] [Thi-1988]. Dans l'industrie, on peut trouver des barres de pression de différentes géométries, rotatives ou rotatives motorisées comme indiquée la figure II.6.

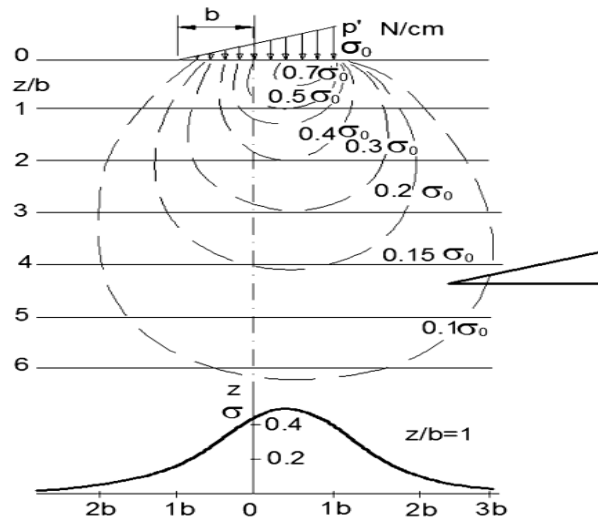


**Figure II.6.** Géométries de contact pour des barres de pression [Ete-2013].

La barre de pression sert à exercer localement un effort de compression qui s'oppose aux contraintes de traction responsables de la fissuration du placage. Les réglages de la barre de pression sont délicats (les contraintes locales mises en jeu dans le processus de coupe dépendent à la fois de la passe d'usinage et du matériau). La position de la barre de pression est décrite par deux paramètres :

- La cote horizontale, qui définit l'écrasement que subit le bois avant de passer devant l'arête,
- La cote verticale, qui définit l'avance dans le sens inverse de la coupe entre cette zone de compression et l'arête de l'outil.

Pour une épaisseur de placage donnée, une avance trop forte rend la compression inefficace, une avance trop faible ou négative comprime inutilement le copeau entre la barre et l'outil, favorise à nouveau la fissuration et provoque de fortes variations d'épaisseur. Une compression trop forte semble aggraver à nouveau la fissuration du côté de l'outil alors qu'elle provoque l'apparition de fissurations et d'arrachements du côté de la barre. Pour une épaisseur de placage donné, et une qualité du bois donnée, il y a donc un optimum de réglage des cotes verticale et horizontale [Thi-1988]. Dans la zone de contact de la barre de pression et le billon on obtiendra une distribution asymétrique du champ de contrainte (figure II.7.)



**Figure II.7.** Distribution de pression sous une barre de pression [Ete-2013].

Si on considère un profil de barre de pression comme indiqué dans la figure II.6.c, avec une inclination d'angle de  $15^\circ$ , on peut définir la distribution de pression sous la barre comme suit :

$$P' = 4b\sigma_0 \quad \text{II.36}$$

où

$$P' \cong 0,4665 \frac{E z_0}{(1-\nu^2)} \quad \text{II.37}$$

$$\sigma_0 \cong 0,1166 \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{z_0}{b} \quad \text{II.38}$$

La barre de pression glisse sur la surface de bois selon le coefficient de frottement, l'effort de cisaillement, Ceci produit une force composante dans la direction du mouvement

$$P'_h = \mu P' \quad \text{II.39}$$

Donc la force totale sera la somme de la force de coupe et la force de frottement.

## II.2.2. Outil de déroulage

Les couteaux des dérouleuses industrielles mesurent de 90 cm à 5 m de longueur suivant les machines, ils présentent une grande acuité d'arête, ce qui confère au biseau une bonne

flexibilité [Thi-1992, Cyr-1996]. Cette géométrie permet de produire un copeau continu en mode II pratiquement sans endommagement mais elle s'accompagne aussi de l'apparition cyclique de fissures typiques du déroulage (pré-fissuration). Un couteau de déroulage doit être parfaitement bien affûté sur toute la longueur utilisée. Le rayon de bec de l'outil ne dépasse pas 5 $\mu$ m pour conserver des conditions optimales. Cela permet de diminuer les efforts de coupe et d'obtenir un placage de bonne qualité.

Les matériaux des outils de coupes utilisées en usinage du bois sont :

- Les aciers,
- Les alliages chrome-cobalt,
- Les carbures de tungstènes,
- Le diamant poly cristallin,
- Les céramiques, etc.

Afin d'éviter les retournements d'arête mais surtout les ébréchures dues aux variations structurelles du bois. Des recherches ont été menées sur des revêtements anti-abrasifs de surfaces permettant d'augmenter la durée de vie des outils [Akn-2009]. L'avance de l'outil et la vitesse de rotation du billon sont les deux grandeurs cinématiques du procédé de déroulage. L'avance de l'outil est déduite de la vitesse de rotation du billon car il faut garder une épaisseur théorique de copeau constante. De plus, afin de garder les mêmes conditions de création de copeau à l'échelle méso scopique, la vitesse de rotation du billon est déduite d'une vitesse de coupe via le rayon de coupe. Ainsi la seule grandeur cinématique indépendante est la vitesse de coupe (vitesse de défilement du matériau bois par rapport à l'arête de coupe) qui peut aller jusqu'à 4m/s [Thi-1992].

### **II.2.3. L'état du bois lors du déroulage**

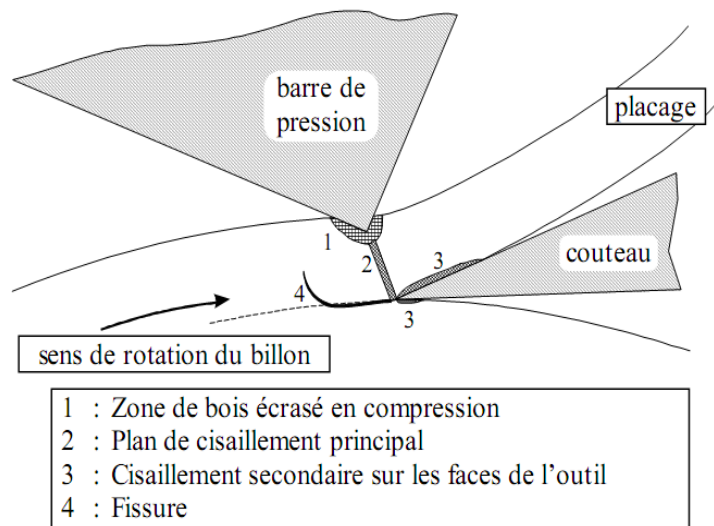
Le bois se déroule à l'état vert avec ou sans étuvage suivant l'épaisseur du copeau voulu et l'essence déroulée. La teneur en eau du bois déroulé est donc toujours largement supérieure au point de saturation des fibres. Cependant, l'état de surface est amélioré par l'étuvage pour les épaisseurs considérées et indispensable pour les épaisseurs supérieures à 2 mm [CTB-1979].

## II.3. Génération du copeau lors du déroulage

### II.3.1. Phénomènes physiques agissant dans la zone de coupe

On observe dans la figure II.8, les phénomènes physiques agissant dans la zone de coupe lors du déroulage du bois [Thi-1989] :

- **Cisaillement principal RT** : concentré dans une zone très étroite proche à un plan qui rejoint l'arête de la barre à celle de l'outil.
- **Frottement outil-bois** : entre le copeau et la face d'attaque de l'outil, sur une longueur voisine de l'épaisseur du placage ; et entre la face de dépouille et le billon sur une facette dont la longueur dépend de l'angle de dépouille ou de la pré-fissuration (pre-seplitting) éventuelle après la coupe.
- **Poinçonnement de la barre de pression** : qui pénètre sur une petite zone de plusieurs dixièmes de millimètres dans le bois. Le lumen des cellules ainsi comprimé s'effondre, la contrainte de compression imposée par le nez de la barre est supérieure ou égale à la contrainte limite élastique en compression transverse. Dans le cas du bois humide, cette déformation est presque entièrement réversible.
- **Rupture en traction** en mode I devant l'arête de l'outil, la déformation imposée par la géométrie du couteau au copeau lors du déroulage, crée une zone de contrainte en traction juste devant l'arête. Lorsque le facteur d'intensité de contrainte dépasse un seuil critique  $K_{Ic}$ , une fissure s'amorce en mode I dans une direction quasiment tangentielle à la direction de déroulage. Après la libération brutale des contraintes de traction, la fissure se propage alors vers la surface supérieure du copeau sous l'action combinée des contraintes de traction et de cisaillement induites par la flexion du copeau.
- **Déformation élastique** globale du rondin (Se) sous l'action de l'ensemble (outil + barre). Cette déformation peut être une expansion ou une compression ; après le passage devant l'arête, le rondin reprend sa forme initiale, la surface ainsi créée n'a donc pas la bonne côte.



**Figure II.8.** Principaux mécanismes impliqués durant le déroulage [Thi-1992].

### II.3.2. Fissuration et effet Horner

On observe dans le processus de coupe par déroulage l'apparition de micro et macro fissures [Thi-1988]. Les microfissures sont des phénomènes locaux qui se produisent systématiquement au voisinage de l'arête, et qui n'affectent qu'une à trois rangées de cellules [Thi-1988]. Les macro-fissures en revanche, affectent un pourcentage non négligeable du placage, elles apparaissent à partir d'une certaine épaisseur de placage. Le processus de coupe devient quasiment périodique avec des variations importantes des efforts de coupe.

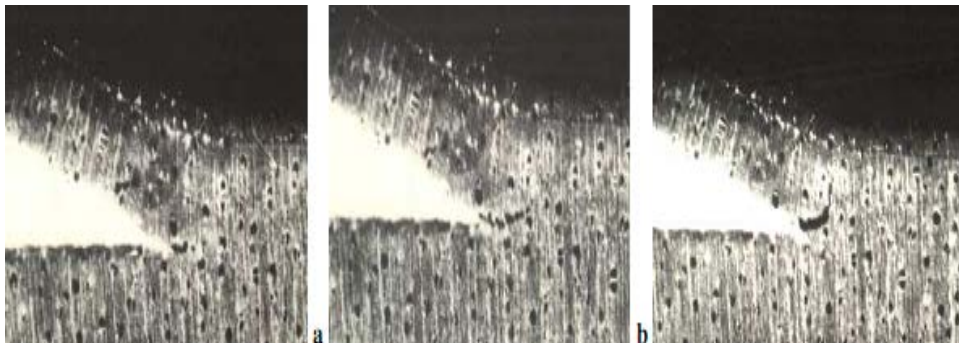
#### a. Propagation des fissures :

La déformation imposée par la géométrie du couteau au copeau lors du déroulage, crée une zone de contrainte en traction juste devant l'arête. Lorsque le facteur d'intensité de contrainte dépasse un seuil critique  $K_{Ic}$ , une fissure s'amorce en mode I dans une direction quasiment tangentielle à la direction de déroulage. Après la libération brutale des contraintes de traction, la fissure se propage alors vers la surface supérieure du copeau sous l'action combinée des contraintes de traction et de cisaillement induites par la flexion du copeau.

#### b. Arrachements ou effet Horner :

Lors du déroulage de bois tendre à de faibles épaisseurs de coupe, il arrive fréquemment que le copeau formé ait un très mauvais état de surface : placage pelucheux, forte variation d'épaisseur, on parle alors de flambement du copeau ou effet Horner [Mot-1988]. La coupe

d'un bois de faible densité, est comparable à la coupe d'une mousse ou d'une éponge humide. Elle est discontinue : dans un premier temps, le bois est fortement comprimé devant l'outil sans être coupé, puis il rompt brutalement libérant les contraintes accumulées. Lors de l'élaboration du copeau, même en l'absence de barre de pression, le mécanisme dominant dans la formation de ce copeau est un cisaillement plan dans une direction proche de la normale. Tout au long de ce plan de cisaillement se distribuent des efforts surfaciques normaux de compression dans le sens du déroulage. Il existe une passe critique où le niveau des contraintes normales de compression sur le plan de glissement est partout supérieur à la contrainte au premier coude de la courbe de compression transversale du bois humide. Cette passe est d'autant plus petite que le coefficient de frottement bois-métal est plus faible, que le bois est plus dense et que le rapport entre la « résistance à la compression » et la « résistance au cisaillement » est plus élevé [Thi-1988b]. Notons aussi qu'en augmentant la vitesse de coupe, il est possible de diminuer cette passe critique, l'eau contenue dans le lumen des cellules, qui n'a pas le temps d'en sortir provoque une légère densification locale du bois. Il existe donc une plage d'épaisseur, où l'écoulement du copeau est continu, il n'est ni trop fissuré ni trop déformé. Cette plage d'épaisseur est limitée par une passe minimum et une passe maximum au-dessous et en dessus de laquelle, le copeau est endommagé [Thi-1988].



**Figure II.9.** Ouverture et cheminement d'une fissure de déroulage [Thi-1988].

#### II.4. Formation du placage

Le placage est défini comme étant une feuille de bois mince obtenue à partir d'une bille de bois, d'épaisseur variant de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres, obtenu à partir de méthodes industrielles spécifiques : sciage, tranchage, déroulage. L'objectif dans toutes ces techniques est de réussir à produire un « copeau » qui soit, le moins possible déformé ou endommagé. Pour cela, il faudrait utiliser un outil performant qui soit rigide, ayant une grande précision de coupe. Les trois principales étapes de fabrication des placages sont [Bal-1995] :



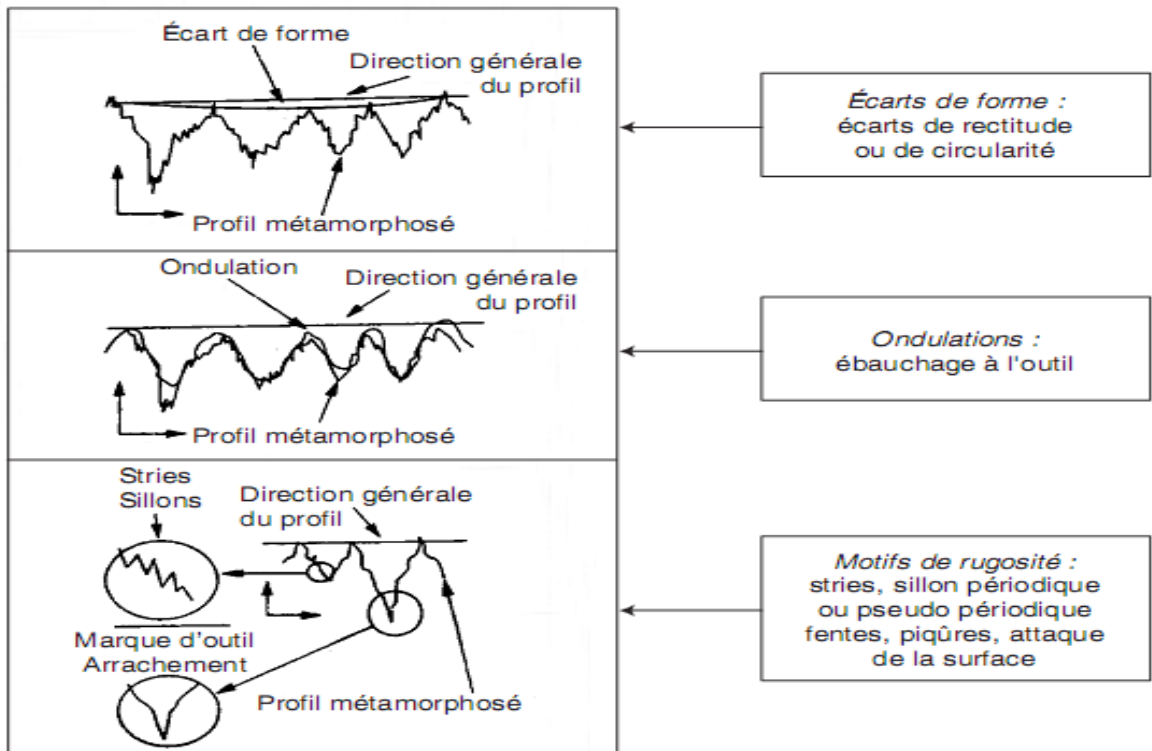
- L'étuvage : c'est l'action de poser le bois vert dans un milieu chaud afin de diminuer l'endommagement éventuel du placage ou de l'outil et de réduire les efforts de coupe pour les bois les plus denses. Cette température dépend généralement de la densité du bois [Lut-1974]
- L'usinage (tranchage, déroulage, sciage) : ce sont les actions d'usinage proprement dites à l'exception que dans ces procédés le copeau est le produit final.
- Séchage : c'est l'étape où les placages de bois sont séchés afin de relaxer les contraintes résiduelles de post-usinage, et ainsi éviter la fissuration du placage.

## II.5. Défauts des placages déroulés

On peut distinguer deux grandes familles : les défauts d'aspects et les défauts dimensionnels. Les défauts d'aspects : concernent l'apparence générale du placage ; sa couleur, l'homogénéité, la présence de nœuds adhérents ou non, ils sont directement liés à la nature du bois déroulé ou au traitement hygrothermique subi par la grume.

Les défauts dimensionnels : apparaissent lors de la production du placage. Le dérouleur peut donc agir en modifiant les paramètres de sa machine afin de limiter leur formation. Il n'existe pas de norme permettant de graduer explicitement la qualité d'un placage à partir de paramètres et de leurs limites. Une approche classique du contrôle de qualité d'une pièce mécanique consiste à progresser par étapes successives des défauts les plus importants vers les plus infimes. La norme **NF E 05-015** propose une hiérarchisation descendante des défauts d'une pièce de l'ordre 1 à 6

- Ordre 1 : macro-géométrie : Défaut de forme.
- Ordre 2 : méso-géométrie : Défaut d'ondulation.
- Ordre 3 et 4 : micro-géométrie : Défaut de rugosité.
- Ordre 5 et 6 : Les défauts de structure cristalline et du réseau cristallin.



**Figure.II.10.** Vérification des écarts géométriques d'une surface selon la norme  
**NF E 05015-1986**

La plupart des auteurs se limitent aux quatre premiers ordres dont la somme des écarts constitue le profil total de la surface mesurée. La mesure de surface de bois est très délicate à effectuer, en particulier le bois sec qui a eu des spécificités biologiques structurelles. Dans notre cas on prend en considération un placage obtenu par déroulage se révélant encore moins bien adapté avant tout parce qu'il s'agit d'un copeau. En première approche on distinguera les défauts suivants : le tuilage, les variations d'épaisseur, la fissuration cyclique, l'effet Horner et enfin l'état de surface du placage.

### II.5.1. Courbure résiduelle du placage

Pour des grands rayons de déroulage, le placage présente une courbure parfois prononcée, de signes opposés à sa courbure initiale, qui s'inverse en fin d'opération (petits rayons). Au niveau de la zone de coupe et en l'absence de la barre de pression, les fortes contraintes en compression appliquées au passage du sommet du plan de cisaillement provoquent un raccourcissement de la face supérieure du placage. Bien qu'une grande partie de ces déformations soient récupérées au bout de quelques temps, il subsiste un léger décalage entre les deux faces qui se traduit par une courbure résiduelle du copeau en sens inverse. L'utilisation de la barre de pression ne change pas fondamentalement ces observations, Il ne semble pas possible de limiter ce tuilage

en agissant sur les réglages de la machine excepté en diminuant l'épaisseur de coupe mais cela revient à modifier la nature du produit fini.

### **II.5.2. Variations d'épaisseur**

Critères d'aspects mis à part, les variations d'épaisseur restent le premier facteur de rebuts dans la production industrielle de placages déroulés. Cependant, comme nous l'avons déjà précisé, aucune norme ne définit explicitement de limites acceptables certainement de par la grande variabilité des essences, des applications ou des exigences des clients. Afin de faciliter la compréhension des mécanismes mis en jeu, on peut discriminer les variations d'épaisseur dans le sens du fil du bois et dans le sens perpendiculaire.

### **II.5.3. Fissuration**

On peut ajouter toutefois que dans la pratique, elle peut se révéler néfaste aussi bien pour la manutention des placages devenus très fragiles qu'en terme de quantité de colle utilisée pour réaliser des panneaux. Dans un même temps, une légère fissuration est parfois utile notamment en assouplissant le placage rendant sa manutention plus aisée (risque de rupture brutale du placage moindre). La barre de pression permet de limiter la formation des fissures et leur croissance mais engendre des variations de l'épaisseur déroulée et peut même dégrader l'état de surface du placage.

### **II.5.4. Etat de surface**

La plupart du temps, la surface du placage est générée par délamination intercellulaire. Elle oscille entre deux plans grossièrement distants d'une centaine de microns. Cette description bien sommaire ne tient pas compte des spécificités structurelles du matériau telles que les variations de fil, la présence de limites de cernes de rayons ligneux ou encore de vaisseaux, dont l'influence sur l'état de surface est avérée. En choisissant de dissocier variations d'épaisseur et état de surface, on se limite au suivi des arrachements locaux identifiables sur le placage par des pics, des creux ou des paquets de cellules plus ou moins libres (peluche) [Mov-1985].

## II.6. Conclusion

A travers ce chapitre, on peut retenir que le procédé de déroulage est un procédé de coupe orthogonale du bois vert dont l'arête de coupe est parallèle à la fibre et dont la valeur ajoutée est apportée au copeau (placage). La génération du placage dans ce procédé met en jeu plusieurs phénomènes physico-mécaniques tels que : la compression, le cisaillement, le frottement contre la surface de l'outil et aussi la fissuration. L'enjeu industriel actuel est d'augmenter la « déroulabilité » des essences de bois ainsi que la qualité des produits issus du déroulage. La modélisation de ce procédé s'avère plus que nécessaire afin d'éviter de lourdes opérations d'expérimentation.

Le chapitre suivant sera dédié à l'optimisation des angles de l'outil de coupe utilisé dans l'opération de déroulage.

# Chapitre III : Approche numérique du procédé de déroulage

---

## Sommaire

Introduction .....	40
III.1. Optimisation .....	40
III.2. Classification.....	43
III.2.1. Méthodes déterministes (méthodes analytiques) .....	43
III.2.2. Méthodes stochastiques .....	44
III.3. Optimisation par essaim particulaire (PSO).....	46
III.3.1. Principe de base de la PSO .....	48
III.3.2. Algorithme PSO .....	48
III.3.3. Validation de la méthode PSO.....	50
III.4. Stratégies d'optimisation dans le procédé de déroulage .....	53
III.4.1. Fonction objective .....	53
III.4.2. Développement algorithmique .....	54
III.4.3 Résultats et discussions .....	57
III.5. Conclusion.....	63

## Introduction

Dans le contexte industriel actuel, l'optimisation de la productivité et des moyens de production est une des préoccupations permanente des scientifiques et ingénieurs. Un des aspects les plus importants pour atteindre une productivité optimale est l'optimisation des conditions et paramètres de coupe en usinage, en particulier, la géométrie de l'outil. Habituellement, des méthodes empiriques basées sur l'expérience des fabricants et des machinistes sont utilisées pour identifier la géométrie optimale de l'outil de coupe. Ces méthodes demande toutefois un très grand nombre d'expériences a menées et manquent cruellement d'efficacité en termes de précision.

Les techniques d'optimisation sont aujourd'hui utilisées dans de très nombreux domaines dont la logistique, la gestion de production, la finance, etc. Et bien sûr, ces outils sont utilisés dans les bureaux d'études en génie mécanique et en génie civil, construction navale, aéronautique, automobile, etc. Dans le contexte de l'industrie du bois, l'application des méthodes d'optimisation est en croissante expansion, on citera à titre d'exemple les travaux suivants : [Tir-2014], [Elt-2013], [Ide-2015], [Agu-2003], [Tir-2014], [Sup-2006], [Gaw-2013], [Kri-2016].

Le but de ce chapitre est de choisir la géométrie optimale de l'outil de coupe de façon intelligente à partir d'une approche d'optimisation numérique se basant sur la méthode d'optimisation méta-heuristique par essaim particulaire (Particle Swarm Optimisation « PSO »), et cela dans le contexte du déroulage du bois. Dans ce qui suit, nous allons présenter le problème d'optimisation, les notions et les concepts relatifs à l'optimisation, la classification des problèmes d'optimisation. Nous présentons ensuite quelques méthodes d'optimisation où nous décrivons leur principe de base et algorithmes. Finalement, l'application de la méthode PSO pour l'optimisation de la géométrie de l'outil dans le procédé de déroulage est présentée.

### III.1. Optimisation

Rendre optimal, c'est donner à quelque chose les meilleures conditions d'utilisation, de fonctionnement, de rendement. L'optimisation est une branche des mathématiques cherchant à

modéliser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à minimiser ou maximiser (figure IV.1) une fonction sur un ensemble. Généralement, un problème d'optimisation peut être défini comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser/Maximiser } f(x) \\ \text{Sous les contraintes} \\ g(x) \leq 0 \text{ (n contraintes d'inégalité)} \\ h(x) = 0 \text{ (m contraintes d'égalité)} \\ x_i \leq x \leq x_s \end{array} \right. \quad \text{IV.1}$$

Où :  $x = (x_1, \dots, x_d)$  représente le vecteur des variables de décision ou variables indépendantes,  $g(x)$  et  $h(x)$  représentent respectivement les contraintes d'inégalité et d'égalité,  $x_i$  et  $x_s$  sont respectivement les bornes inférieure et supérieure du domaine de recherche des variables,  $f : D \subset R^d \rightarrow R$  est la fonction objectif et  $D$  est le domaine réalisable.

- **Voisinage**

Le voisinage de  $x$ , noté  $V(x)$  est un sous ensemble de solutions réalisables de  $X$  atteignables à partir d'une transformation donnée de  $x$ .

$x^* \in V(x)$  Est dite voisine de  $x$ .

- **Optimum**

L'optimum est le point où la fonction objective atteint son minimum ou son maximum

- **Optimum local**

On dit qu'une solution  $x^*$  est un optimum local de la fonction objectif  $f$  sur  $D \subset R^d$  si on a :

$$\forall x \in V(x^*), \begin{cases} f(x^*) \leq f(x) \text{ dans le cas de minimisation} \\ f(x^*) \geq f(x) \text{ dans le cas maximisation} \end{cases} \quad \text{III.2}$$

Avec  $x^* \neq x$  et  $V(x^*)$  représente l'ensemble des solutions voisines de  $x^*$

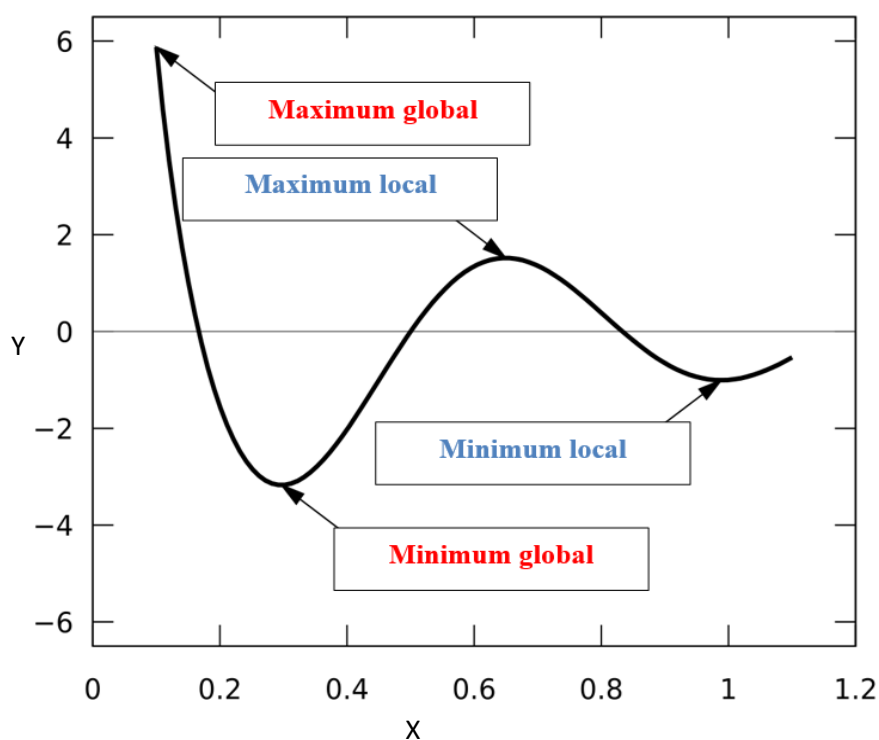
- **Optimum global**

On dit qu'une solution  $x^*$  est un optimum global de la fonction objectif  $f$  sur  $D \subset \mathbb{R}^d$  si on a :

$$\forall x \in D, \begin{cases} f(x^*) \leq f(x) \text{ dans le cas de minimisation} \\ f(x^*) \geq f(x) \text{ dans le cas de maximisation} \end{cases} \quad \text{III.3}$$

Avec  $x^* \neq x$

La notion d'optimum local et optimum global est illustrée dans la figure en dessous.



**Figure III.1.** Exemple de types d'extremums.

- **Fonction objective**

La fonction objective représente le but à réaliser ou à atteindre (minimisation ou maximisation de la fonction). Elle définit un espace de solutions potentielles au problème.

$$\min_{x \in D} f(x) \Rightarrow \text{la fonction objectif } f(x) \text{ est appelée fonction cout.} \quad \text{III.4}$$

$$\max_{x \in D} f(x) \Rightarrow \text{la fonction objectif } f(x) \text{ est appelée fitness}$$



- **Espace d'état**

Appelé aussi domaine de recherche, c'est l'ensemble des domaines de définition des différentes variables du problème d'optimisation.

- **Contraintes**

Elles représentent les conditions sur l'espace d'état que les variables doivent satisfaire. Ces contraintes sont souvent des contraintes d'inégalité ou d'égalité utilisées généralement pour limiter l'espace de recherche.

## **III.2. Classification**

Les méthodes d'optimisation peuvent être classées selon plusieurs critères :

### **III.2.1. Méthodes déterministes (méthodes analytiques)**

Les méthodes analytiques ou déterministes sont basées sur une algorithmique procédurale rigoureuse, où les chemins des variables de décision et les fonctions sont reproductibles, c.-à-d. ; le même point de départ suivra toujours le même chemin d'évaluation. Parmi les méthodes les plus connues, on trouve : le calcul différentiel (DF) et la méthode de Lagrange, ces méthodes se localisaient à la résolution de problème mono-objectif, mais ces dernières sont insuffisantes pour être dérivables, continus et monovariabiles [All-2005]. Cela a stimulé l'apparition des méthodes dites itératives, tels que la programmation non-linéaire (NLP), la programmation quadratique séquentielle (SQP), la programmation dynamique (DP), l'algorithme du gradient réduit généralisé (GRG), la programmation géométrique (GP) et la programmation de But (LP) [Bon-1997].

Avec ces méthodes analytiques itératives, il est souhaitable que ces méthodes soient continuées et dérivables et que leurs formes, à savoir, linéaire, non linéaire, concave ou convexe, soient définies et préalablement connues. A cet effet, l'utilisation de ces méthodes reste très limitée surtout dans le domaine de l'optimisation des conditions d'usinage [San-2006].

## III.2.2. Méthodes stochastiques

Les méthodes d'optimisation stochastiques s'appuient sur des mécanismes probabilistes et aléatoires. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents pour une même configuration initiale d'un problème d'optimisation. Ces méthodes peuvent être classées selon deux grandes catégories : les méthodes heuristiques et les méthodes méta-heuristiques [Chan-2009].

### III.2.2.1 Méthodes heuristiques

Les heuristiques, ou méthodes approximatives, sont des méthodes dépendantes qui fournissent des solutions réalisables, pas nécessairement optimales, pour des problèmes d'optimisation. Elles sont conçues généralement pour résoudre un problème particulier, en s'appuyant sur sa structure propre. Les heuristiques s'opposent donc aux méthodes exactes, qui trouvent toujours des solutions optimales si on leur laisse le temps. Les méthodes d'optimisation exactes étant de complexité exponentielle, il est généralement plus approprié de faire appel aux heuristiques pour des problèmes difficiles [Mat-2013].

### III.2.2.2 Méthodes méta-heuristiques

Ces méthodes sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global, c.-à-d. l'extremum global d'une fonction, par échantillonnage d'une fonction objectif. Elles se comportent comme des algorithmes de recherche, tentant d'apprendre les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution [Mat-2013].

Ces méthodes méta-heuristiques sont réparties selon la nature du type d'inspiration en deux groupes principaux : algorithmes socio-inspirés et bio-inspirés.

Dans la première catégorie « socio-inspirée » on trouve :

#### a) L'algorithme d'optimisation par enseignement-apprentissage

L'algorithme « Teaching-learning-based optimization » (TLBO) est basé sur les stratégies d'enseignement et d'apprentissage. Cette méthode utilise une population de solutions pour aboutir à la solution globale. Cet algorithme proposé par [Rao et al], basé sur l'influence d'un

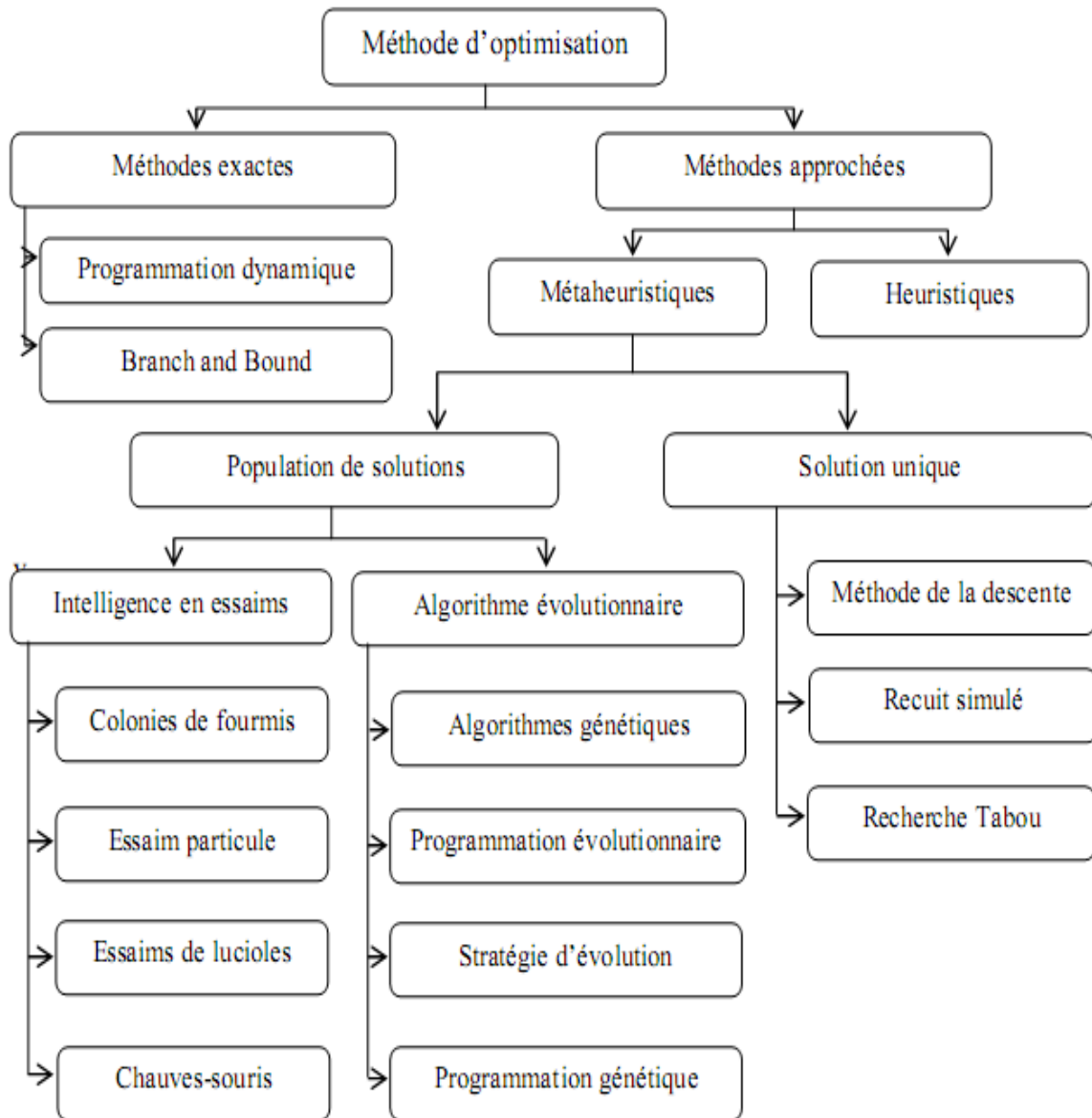
enseignant sur les notes des élèves dans une classe. Dans TLBO, la population est considérée comme un groupe ou une catégorie d'élèves. Dans les autres algorithmes d'optimisation, la population se compose de différentes variables de conception. Dans l'algorithme TLBO, les différentes variables de conception sont analogues à différents sujets offerts aux élèves et les notes des élèves sont analogues aux valeurs du fitness, comme dans les autres techniques d'optimisation basées sur la population. Un enseignant de haute qualité est généralement considéré comme une personne très instruite qui forme des élèves afin qu'ils puissent avoir de meilleurs résultats, basés sur leurs notes. Alors l'enseignant est considéré comme la meilleure solution obtenue jusqu'ici. Le processus de recherche de l'algorithme TLBO est divisé en deux parties. La première partie est la phase-enseignant et la seconde partie est la phase-élève. La phase-enseignant signifie : apprendre de l'enseignant et la phase-élève signifie apprendre par interaction entre les élèves. De plus amples informations sur le fonctionnement de TLBO sont fournies par Rao et al [Tor-1989].

Dans la deuxième catégorie « bio-inspirée » on trouve :

#### **b) Algorithme génétique (GA)**

L'algorithme génétique (AG) est un algorithme de recherche basée sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Il combine une stratégie de survie des plus forts avec un échange d'information aléatoire mais structurée. Pour un problème pour lequel une solution est inconnue, un ensemble de solutions possibles est créé aléatoirement. On appelle cet ensemble la population. Les caractéristiques (ou variables à déterminer) sont alors utilisées dans des séquences de gènes qui seront combinées avec d'autres gènes pour former des chromosomes et par après des individus. Chaque solution est associée à un individu, et cet individu est évalué et classifié selon sa ressemblance avec la meilleure, mais encore inconnue, solution au problème. Il peut être démontré qu'en utilisant un processus de sélection naturelle inspirée de Darwin, cette méthode convergera graduellement à une solution. Sont représentés dans des opérateurs mathématiques pour résoudre les problèmes d'optimisation [Val-2004]. Autres techniques bio-inspirées, comme la recherche de coucou inspirée par le parasitisme de certain type d'oiseau coucou, les colonies d'abeilles s'inspirent de comportement des abeilles mellifères lors de la recherche de leur nourriture. L'algorithme de colonies de fourmis tout comme l'algorithme de colonies d'abeilles [Hao-1999].

Dans la figure ci-dessous, un organigramme regroupant les méthodes d'optimisation les plus connues est présenté.



**FigureIII.2.** Classification des méthodes d'optimisation [Val-2004].

### III.3. Optimisation par essaim particulaire (PSO)

Initialement développé par Kennedy et Eberhart [Ebe-1995], cet algorithme a été inspiré du comportement des essaims d'oiseaux (figure. IV.2), de poissons ou d'autres animaux dans leur habitat naturel. Sur un espace de recherche la méthode PSO construit un essaim de particules se déplaçant sur cet espace afin de trouver l'optimum d'une fonction objectif.

Chacune de ces particules est caractérisée par [Set-2005] :

- Sa position, c.-à-d. ses coordonnées dans l'ensemble de définition.

- Sa vitesse qui permet à la particule de se déplacer. De cette façon, au cours des itérations, chaque particule change de position. Elle évolue en fonction de son meilleur voisin, de sa meilleure position, et de sa position précédente.
- Son voisinage, c.-à-d. l'ensemble de particules qui interagissent directement sur la particule en question, spécifiquement celle qui a le meilleur critère.

A tout instant, chaque particule connaît [Bom-2011] :

- Sa meilleure position visitée durant son parcours. On retient essentiellement la valeur du critère calculée ainsi que ses coordonnées.
- La position du meilleur voisin de l'essaim qui correspond à l'ordonnancement optimal.
- La valeur qu'elle donne à la fonction objective car à chaque itération il faut effectuer une comparaison entre la valeur du critère donnée par la particule courante et la valeur optimale.

On voit alors que la bio-inspiration à l'origine de l'optimisation par essaim particulaire ressort dans l'algorithme sous la forme d'une intelligence collective : coordination du groupe, instinct individuel et interaction locale entre les individus [Cle-2004].



**FigureIII.3.** Exemple d'essaims d'oiseaux.

### III.3.1. Principe de base de la PSO

Dans l'algorithme PSO, une population est appelée essaim particulaire de solutions possibles. Ces particules sont placées aléatoirement dans l'espace de recherche de la fonction objectif. A chaque itération, les particules se déplacent en prenant en compte leur meilleure position mais aussi la meilleure position de son voisinage (figure III.3). On calcule la nouvelle vitesse à partir de la formule suivante [Set-2005] :

$$v_{i,j}^{t+1} = wv_{i,j}^t + c_1r_{1,i,j}^t [pbest_{i,j}^t - x_{i,j}^t] + c_2r_{2,i,j}^t [gbest_j^t - x_{i,j}^t], j \in \{1, 2, \dots, D\} \quad \text{III.5}$$

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + v_{i,j}^{t+1}, j \in \{1, 2, \dots, D\} \quad \text{III.6}$$

Où :

$x_{i,j}^{t+1}, x_{i,j}^t$  Vecteur position.

$v_{i,j}^{t+1}, v_{i,j}^t$  Vecteur vitesse.

$pbest_{i,j}^t$  La meilleure position par laquelle la particule d'essaim est déjà passée.

$Gbest^t$  La meilleure position atteinte par les particules de l'essaim.

$w$  Coefficient d'énergie.

$c_1, c_2$  Coefficient d'accélération.

$r_{1,i,j}^t, r_{2,i,j}^t$  Nombres aléatoires tirés uniformément dans [0,1], à chaque itération  $t$  et pour chaque dimension  $j$ .

$D$  Dimensions du problème d'optimisation.

### III.3.2. Algorithme PSO

Comme dans la majorité des méthodes méta-heuristiques, l'algorithme PSO commence par une initialisation aléatoire de l'essaim dans l'espace de recherche. À chaque itération de l'algorithme, chacune des particules se déplace suivant les équations III.2 et III.3. Après le déplacement des particules, les nouvelles positions sont évaluées. Les  $pbest_{i,j}^t$  ainsi que  $gbest_j^t$  sont alors mises à jour. Cette procédure est résumée dans le pseudo code [Dor-2012].

***Pseudo code de l'algorithme PSO***

**Entrées :** Initialisation aléatoire des positions et vitesses de chaque particule

Pour chaque particule  $i$ ,  $pbest_i = x_i$

**Tant que** (le critère d'arrêt n'est pas atteint) **faire**

**Pour** ( $i = 1$  à  $E$  (nombre de particules de l'essaim)) **faire**

Calculer la nouvelle vitesse à l'aide de l'équation III.5 ;

Trouver la nouvelle position à l'aide de l'équation III.6 ;

Calculer  $f(x_i)$  de chaque particule ;

Mise à jour de  $pbest_i$

**Si**  $f(x_i) < f(pbest_i)$  **alors**

$pbest_i = x_i$

**Fin Si**

Mise à jour de  $gbest_j^t$

**Si**  $f(pbest_i) < f(gbest_j^t)$  **alors**

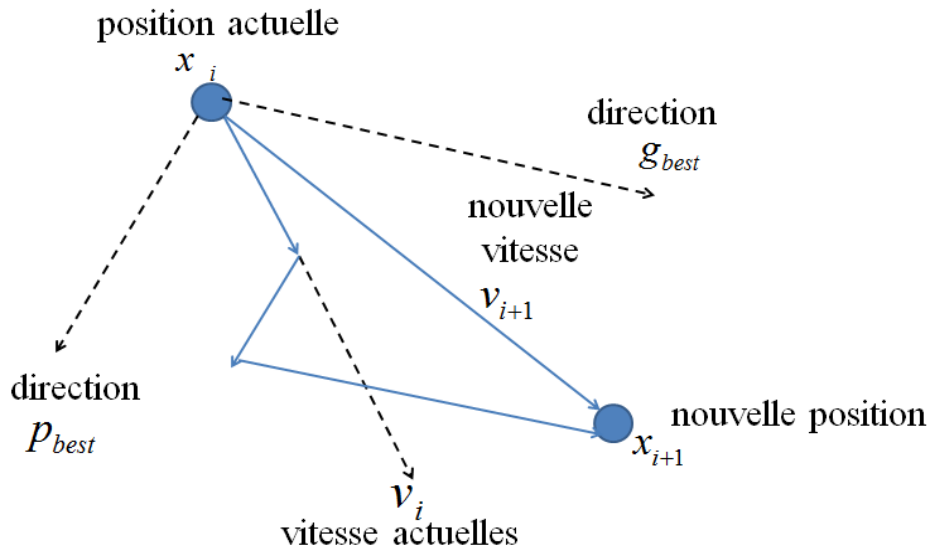
$gbest_j^t = pbest_i$

**Fin Si**

**Fin Pour**

**Fin Tant que**

**Fin**



**Figure III.4.** Calcul de la nouvelle position et vitesse d'une particule d'algorithme PSO [Khe-2013].

### III.3.3. Validation de la méthode PSO

Dans cette section, l'efficacité de la méthode PSO est testée à travers deux fonctions ; Rosenbrock et Schwefel, bien connues pour la validation des méthodes d'optimisation dans le cas des problèmes mono objective, qui s'articule bien à notre problème d'étude. Le tableau III-1 regroupe les paramètres adoptés dans la méthode PSO. Le code développé est implémenté sous environnement Matlab.

**Tableau III-1 :** paramètres caractéristique utilisée dans l'algorithme PSO

Nombre d'itérations	$c_1$	$c_2$	$w$
100	2	2	0.5

- **Fonction de Rosenbrock**

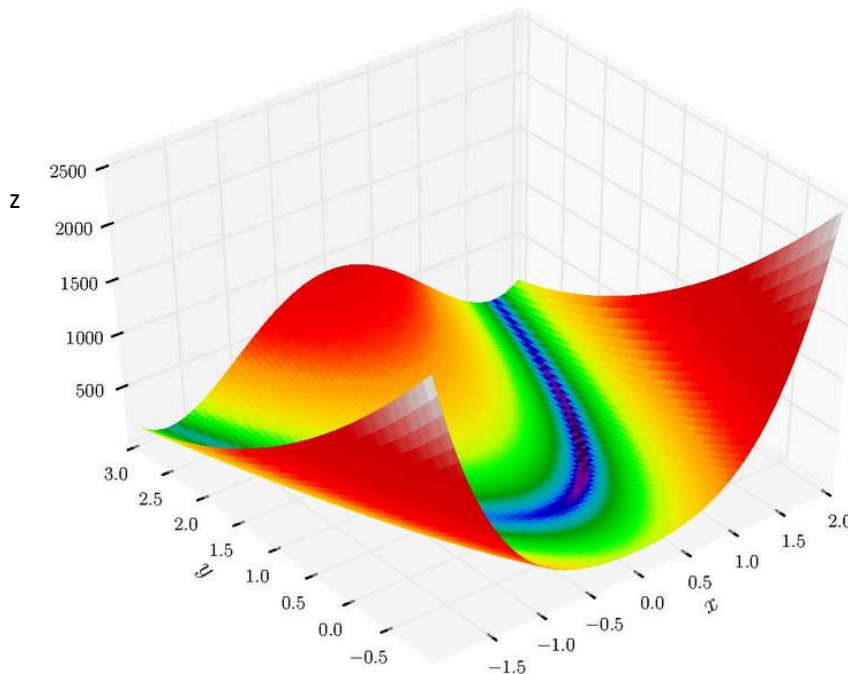
La fonction de Rosenbrock est une fonction non convexe, introduite par Howard H. Rosenbrock [Sha-2006], Il est également connu sous le nom de vallée de Rosenbrock ou fonction banane (figure. III.5). Le minimum global de cette fonction se situe dans une longue et étroite vallée de forme parabolique.

$$f(x, y) = (a - x)^2 + b(y - x^2)^2 \tag{III.7}$$



Habituellement, les paramètres de cette équation sont définis de telle sorte que  $a = 1$  et  $b = 100$ , donc les coordonnées du minimum global sont  $(x, y) = (a, a^2) = (1, 1)$ , et sa valeur est égale à  $f(x, y) = 0$ .

- **Fonction de Rosenbrock**



**Figure III.5.** Représentation graphique de la fonction de Rosenbrock.

**Tableau III-2 :** Résultats obtenus pour le test d'optimisation par PSO de la fonction de Rosenbrock

Population	Coordonnées atteintes par PSO	Valeur de l'optimum par PSO	Valeur de l'optimum global
10	(-1.21, 1.48)	5.1813	0
20	(1.00, 1.00)	2.7972e-09	0
40	(1.00, 1.00)	2.6314e-14	0
100	(1.00, 1.00)	1.6909e-16	0

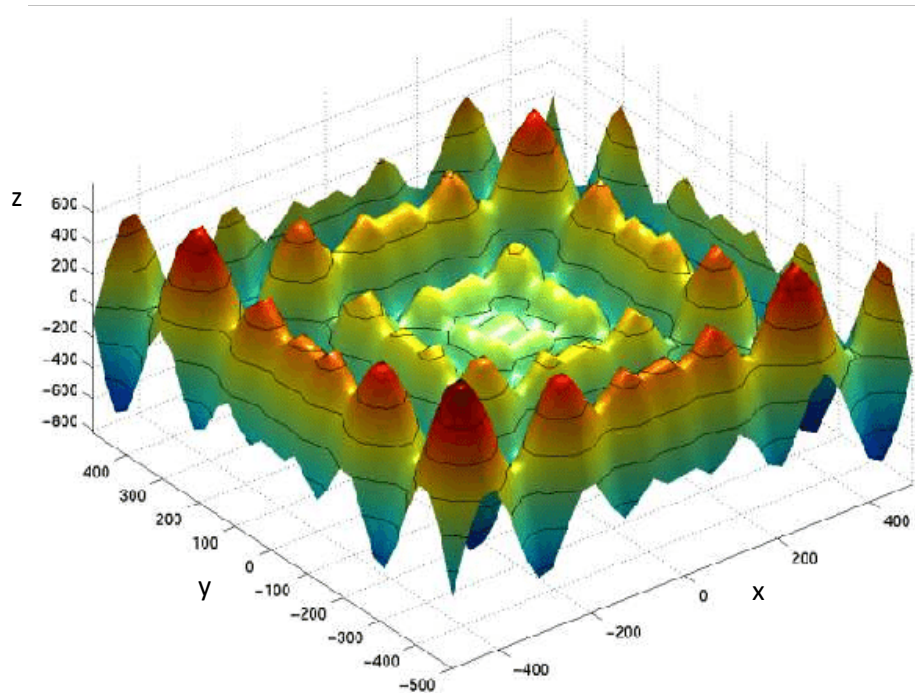
- **Fonction de Schwefel**

La fonction de Schwefel est une fonction mathématique complexe, avec de nombreux minima locaux et un optimum global [Sch-1995]. Dans une plage de valeurs comprises dans un intervalle  $[-500, 500]$ , la surface de la fonction de Schwefel est composée d'une grande

quantité de pics et de vallées (figure.IV.6). C'est une fonction qui possède deux minimums globaux très proches mais le deuxième meilleur minimum s'éloigne de peu du minimum global. La fonction de Schwefel est définie par :

$$f(x) = 418.9829d - \sum_{i=1}^d x_i \sin(\sqrt{|x_i|}) \quad \text{III.8}$$

De plus, le minimum global est proche des limites du domaine, ce qui est toujours difficile à trouver. La fonction a une valeur minimale de  $f(x,y) = 0$  aux coordonnées suivantes  $(x, y) = (420.9687, 420.9687)$ .



**FigureIII.6.** Représentation graphique de la fonction la fonction de Schwefel.

**Tableau III-3 :** Résultats obtenus pour le test d'optimisation par PSO de la fonction de Schwefel.

Population	Coordonnées atteintes par PSO	Valeur de l'optimum par PSO	Valeur de l'optimum global
10	(420.9687, 420.9687)	3.8085e-09	0
20	(-302.5249, 420.9687)	118.4383	0
40	(420.9687, 420.9687)	3.8085e-09	0
100	(420.9687, 420.9687)	3.8084e-09	0

On peut confirmer d'après les tests effectués sur les deux fonctions de Rosenbrock et Schwefel, que le code développé de la méthode PSO est valide et efficace pour localiser l'optimum global dans un temps de calcul moindre.

### III.4. Stratégies d'optimisation dans le procédé de déroulage

Dans cette section, on abordera le problème d'optimisation par la méthode PSO de la géométrie de l'outil pour le procédé de déroulage du bois.

#### III.4.1. Fonction objective

Cette fonction doit contenir les informations propres à la géométrie de l'outil, et à la qualité de l'usinage en même temps. Pour cela, on reprendra l'équation (II.35) mentionnée dans le chapitre II, concernant le développement théorique sur l'usinage du bois. La fonction mono-objective proposée sera exprimée comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \left( R \frac{2 \sin \delta}{\sqrt{3} (\tan \delta + \mu)} \sqrt{(\mu \tan \delta)} \right) - h \\ \text{sous la contrainte géométrique : pré-fissuration } x_0 = 0 \end{array} \right. \quad \text{III.9}$$

Dans notre étude, l'objectif est d'optimiser l'angle de coupe de l'outil ou lame de déroulage en garantissant une épaisseur constante du placage (copeau). A travers l'équation (III.9), on s'aperçoit qu'un des paramètres traduisant le couple outil-matière (COM) ; qui est le coefficient de frottement dans l'interface outil-matière, doit être défini. Les paramètres adoptés dans l'espace de recherche de notre problème d'optimisation sont résumés dans le (Tableau III-4).

**Tableau III-4** : Paramètres adoptés dans la résolution du problème d'optimisation.

Espace de recherche			
Angle de coupe $\delta$	Epaisseur de copeau $h$	Coefficient du frottement $\mu$	Rayon $R$
$0^\circ \leq \delta \leq 80^\circ$	$0.5mm \leq h \leq 3mm$	$0.20 \leq \mu \leq 0.45$	$5mm \leq R \leq 200mm$

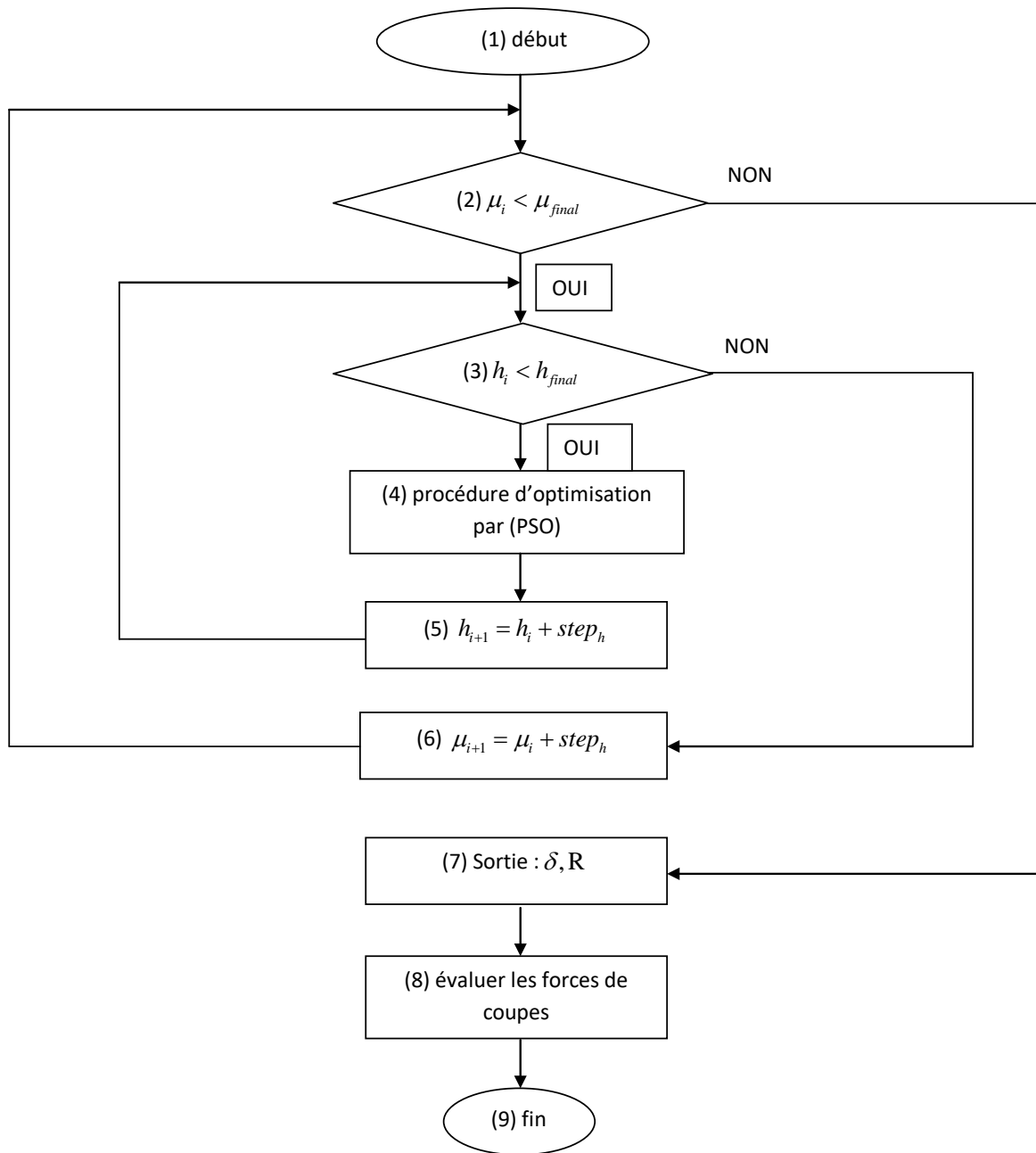
Paramètres de l'algorithme PSO					
Nombre d'itérations	Taille d'essaim de particule	$C_1$	$C_2$	W	
1000	200	2	2	0.5	
Paramètres du matériau bois [Han-2010]					
Type	Humidité	Module Young	Module de déformation	Résistance à la compression	Résistance à la traction
Chêne rouge	12%	$E=11,900MPa$	$K=58000MPa/mm$	$\sigma_c = 47000kPa$	$\sigma_t = 7200kPa$

### III.4.2. Développement algorithmique

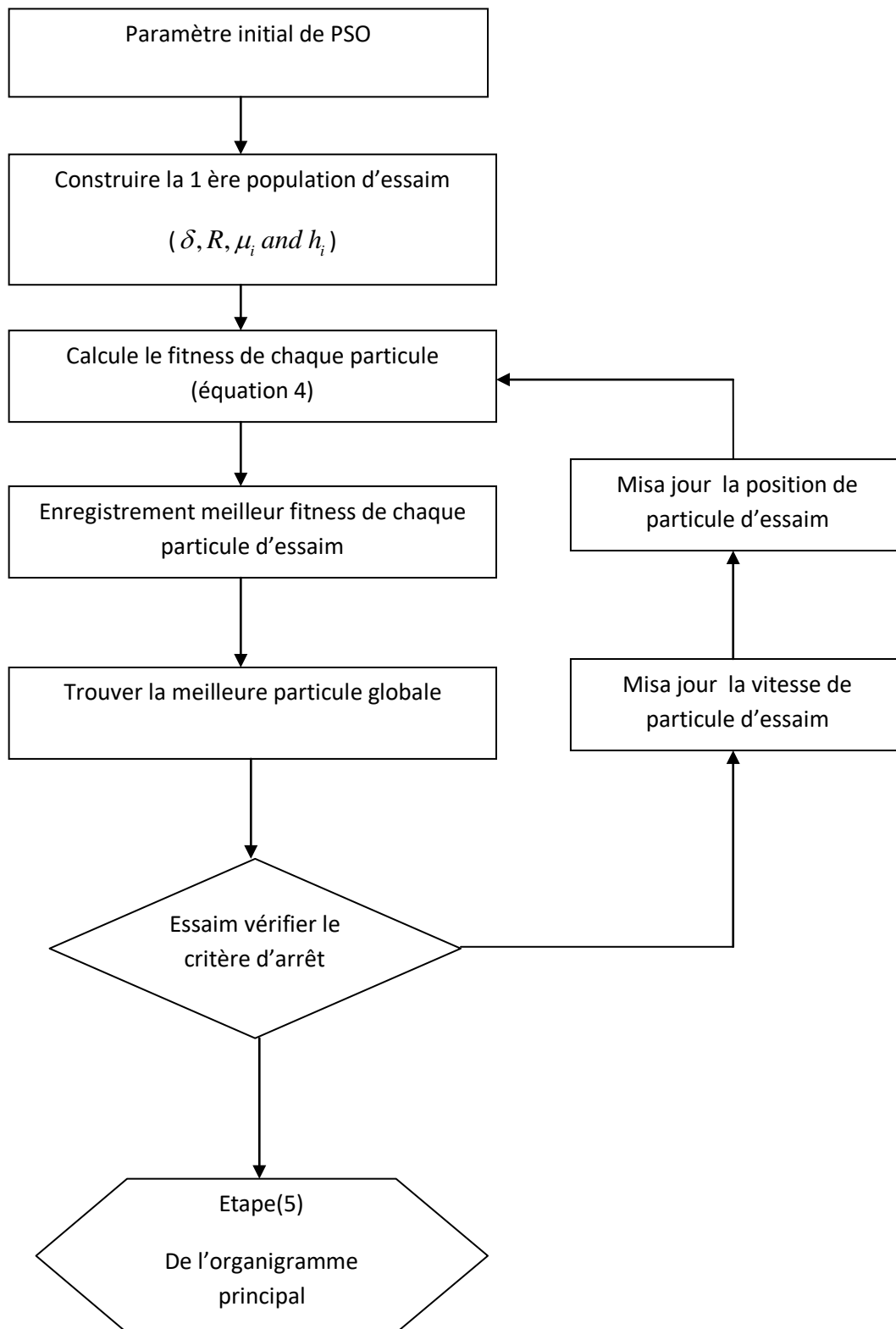
La procédure de calcul algorithmique pour la résolution du problème d'optimisation de l'angle de coupe de l'outil, développé sous Matlab, est décrite par les étapes suivantes :

- a) A l'état initial :
  - Définition des particules d'essaim (avec position et vitesse aléatoire),
  - Attribution des valeurs aux : coefficient de frottement  $\mu$ , épaisseur du placage  $h$ .
- b) Evaluation de la fonction objective pour chaque particule (équation. III.9).
- c) Calcul de la valeur de l'angle de coupe  $\delta$ , rayon du copeau  $R$  pour chaque position des particules ; si une meilleure position est obtenue par une particule donnée, la valeur  $p_{best}$  est remplacée par la valeur trouvée.
- d) Tester si une des particules a trouvé le minimum de la fonction objectif dans la population donnée. Si la nouvelle valeur de  $g_{best}$  est mieux que la valeur  $g_{best}$  précédente, donc cette dernière sera remplacée et stockée.
- e) Calcul de la nouvelle vitesse des particules (équation. III. 5).
- f) Mettre à jour la position de la particule se déplaçant vers  $p_{best}$ .
- g) Répétition des étapes a) et b) jusqu'à atteindre le critère d'arrêt défini.

Ces étapes sont résumées dans l'organigramme principal. Dans le second organigramme, les étapes de la méthode PSO sont détaillées.



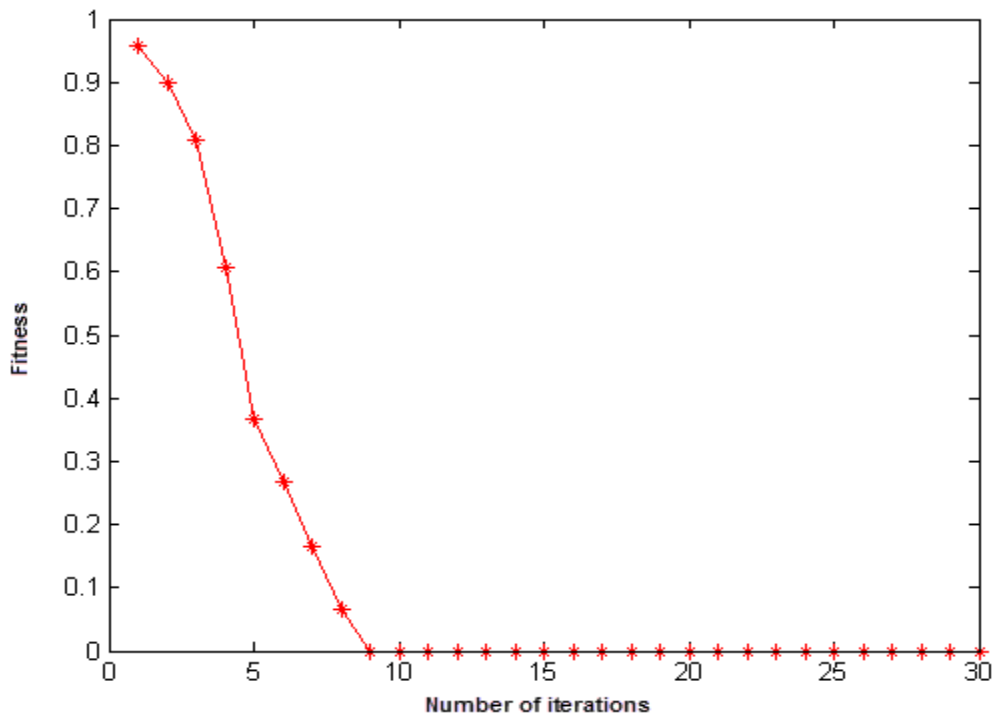
**Figure III.7.** Organigramme de l’algorithme principal



**Figure III.8.** Organigramme de l’algorithme PSO

### III.4.3 Résultats et discussions

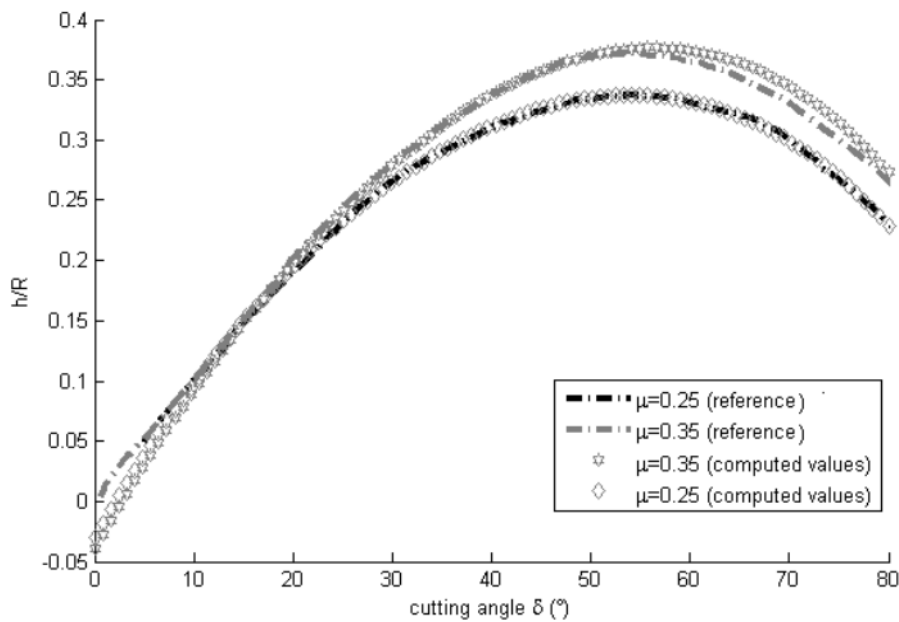
La figure III.9 ci-dessous montre la valeur de fonction objectif (fitness) à chaque itération de l'algorithme PSO (**figure. III. 8**). On remarque que la valeur du fitness est minimale lorsque le processus itératif de PSO arrive à environ 10 itérations, cela traduit la vitesse de convergence de l'algorithme PSO adopté.



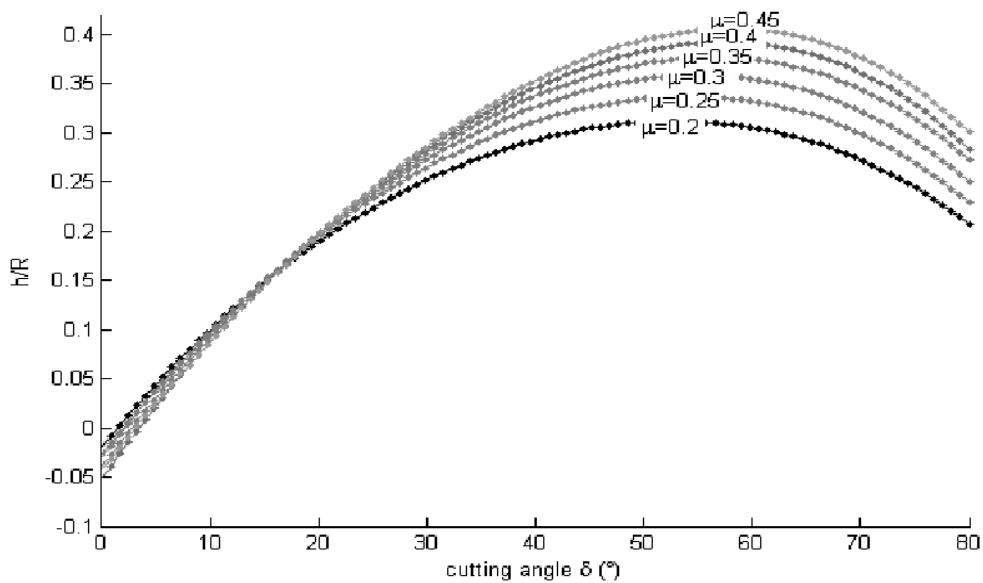
**Figure III. 9.** Valeurs du fitness à travers les itérations du code PSO.

La figure III.10 présente la comparaison entre les résultats obtenus à partir de notre modèle PSO et ceux du modèle expérimental [Sit-1983]. Les résultats montrent que la méthode PSO reproduit les mêmes valeurs que ceux de la référence.

Dans la figure III.11, on démontre que l'approche développée peut aussi réaliser une prédiction étendue pour une large gamme de coefficients de frottement, c.à.d. un large éventail de couple outil-matière (COM).



**Figure III.10.** Comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux [Sit-1983] pour  $\mu = 0.25$ ,  $\mu = 0.35$



**Figure III.11.** Rapport  $\frac{h}{R}$  en fonction de l'angle de coupe  $\delta$  pour différentes valeurs du coefficient de frottement.

Les résultats de simulation de l'évolution des angles de coupe  $\delta$  pour différentes valeurs de  $\mu$  et  $h$  sont présentés dans le tableau III-5. On remarque que les valeurs optimales des angles de coupe  $\delta$  sont comprises entre  $19^\circ$  à  $23^\circ$ , pour des épaisseurs de placage  $h$  inférieur à 2 mm (cellules vertes dans le tableau III-5). On remarque aussi que pour les valeurs d'épaisseur

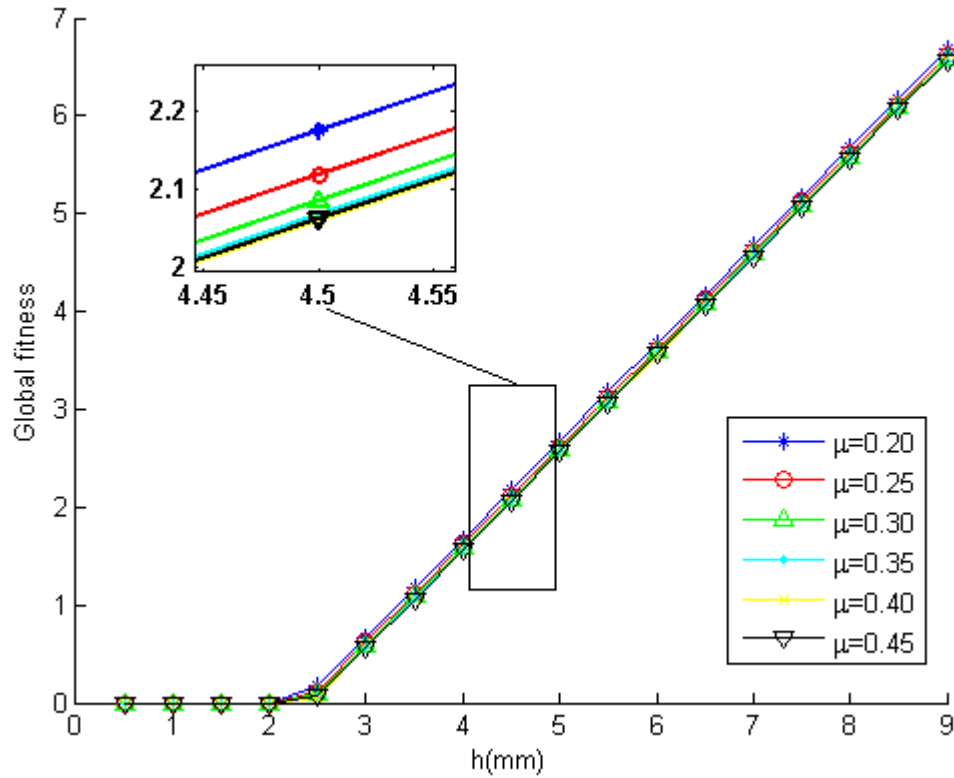


du placage  $h$  supérieurs à 2mm, les angles de coupe  $\delta$  divergent et atteignent la valeur maximale  $27^\circ$  ; (cellules en rouge dans le tableau III-5). Cette divergence est confirmée dans la figure III.12, où on remarque que les valeurs de la fonction objectif (fitness) augmentent considérablement pour des valeurs de  $h$  supérieur à 2mm.

Quand l'épaisseur du placage  $h$  est supérieur à 2mm, la contrainte d'égalité ou physiquement la condition de pré-fissuration devient difficile à vérifier, nous pensons qu'avec l'ajout de barre de pression, un champ de force localisé à la pointe de l'outil favorise la direction de coupe dans le déroulage du bois [Csa-2013].

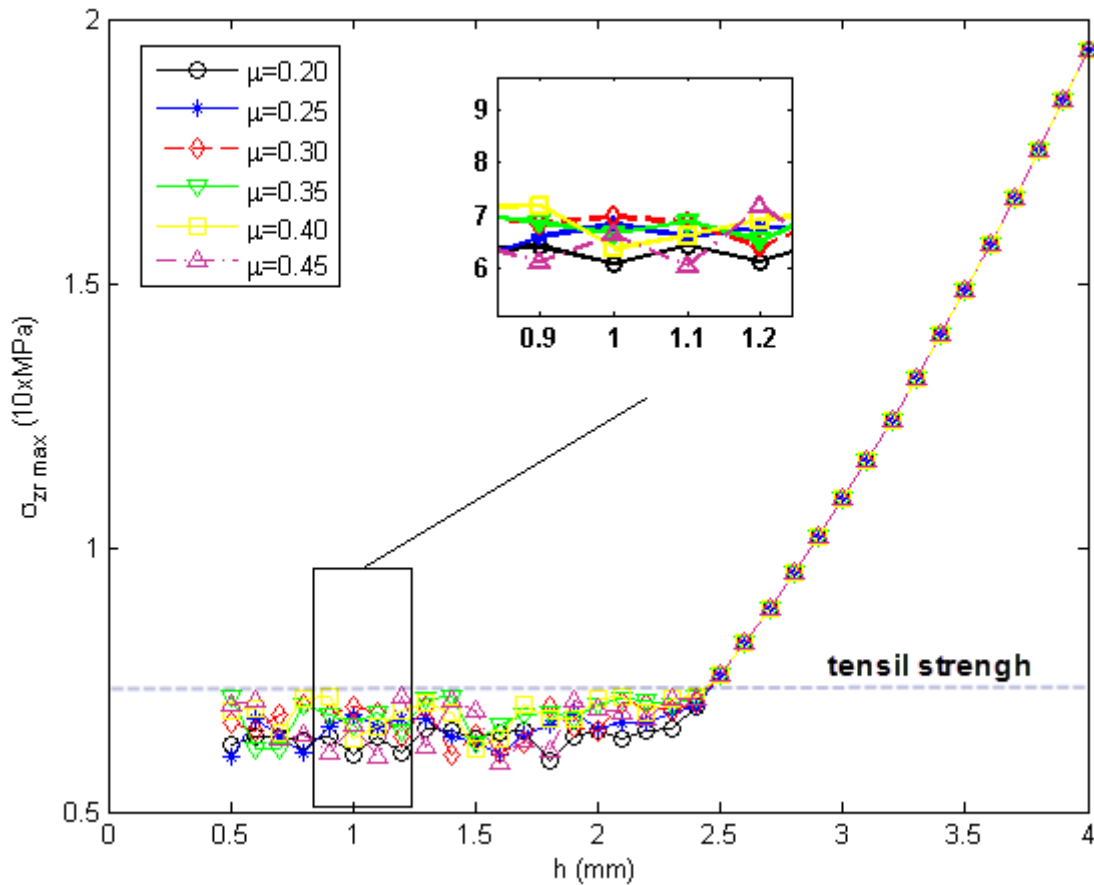
**Tableau III.5.** Angles de coupe  $\delta$  calculés par PSO pour différentes valeurs de  $\mu$  et  $h$ .

$\mu \backslash h$	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
0.5	20.0968°	19.7004°	21.1700°	21.8003°	19.8852°	22.7203°
1	21.7828°	21.9861°	21.4962°	22.0494°	22.9337°	23.7891°
1.5	22.6062°	23.2626°	22.1520°	23.2705°	23.4526°	23.8358°
2	22.9844°	23.2733°	22.0921°	23.7529°	24.3735°	24.0630°
2.5	27°	27°	27°	27°	27°	27°
3	27°	27°	27°	27°	27°	27°
3.5	27°	27°	27°	27°	27°	27°
4	27°	27°	27°	27°	27°	27°
4.5	27°	27°	27°	27°	27°	27°
5	27°	27°	27°	27°	27°	27°
5.5	27°	27°	27°	27°	27°	27°
6	27°	27°	27°	27°	27°	27°
6.5	27°	27°	27°	27°	27°	27°
7	27°	27°	27°	27°	27°	27°
7.5	27°	27°	27°	27°	27°	27°
8	27°	27°	27°	27°	27°	27°
8.5	27°	27°	27°	27°	27°	27°
9	27°	27°	27°	27°	27°	27°



**Figure III.12.** Valeurs du fitness global en fonction de l'épaisseur  $h$ , pour différentes valeurs de  $\mu$ .

Dans ce qui suit on s'intéressera aux calculs des forces de coupe agissant lors du déroulage. Dans la figure III.13, on s'aperçoit qu'avant d'arriver à une épaisseur de placage de 2.5 mm, le comportement de la courbe reste régulier jusqu'à atteindre une valeur de la contrainte de traction  $\sigma_{zr\max}$  correspondant à la résistance à la traction. Au-delà de l'épaisseur de 2.5 mm, la contrainte de traction  $\sigma_{zr\max}$  augmente de façon exponentielle, dépassant ainsi la résistance à la traction du matériau bois considéré. La variation du coefficient de frottement n'a pas grand effet sur la contrainte de traction  $\sigma_{zr\max}$ .



**Figure III.13.** Evolution de  $\sigma_{zr\max}$  en fonction de  $h$  pour différentes valeurs de  $\mu$ .

Les figures III.14, III.15, présentent les composantes des forces de coupe  $p_{h_{edge}}$  et  $p_{v_{edge}}$  pour les directions tangentielle (horizontale) et radiale (verticale), respectivement (voir équations II.24, II.25 dans le chapitre II).

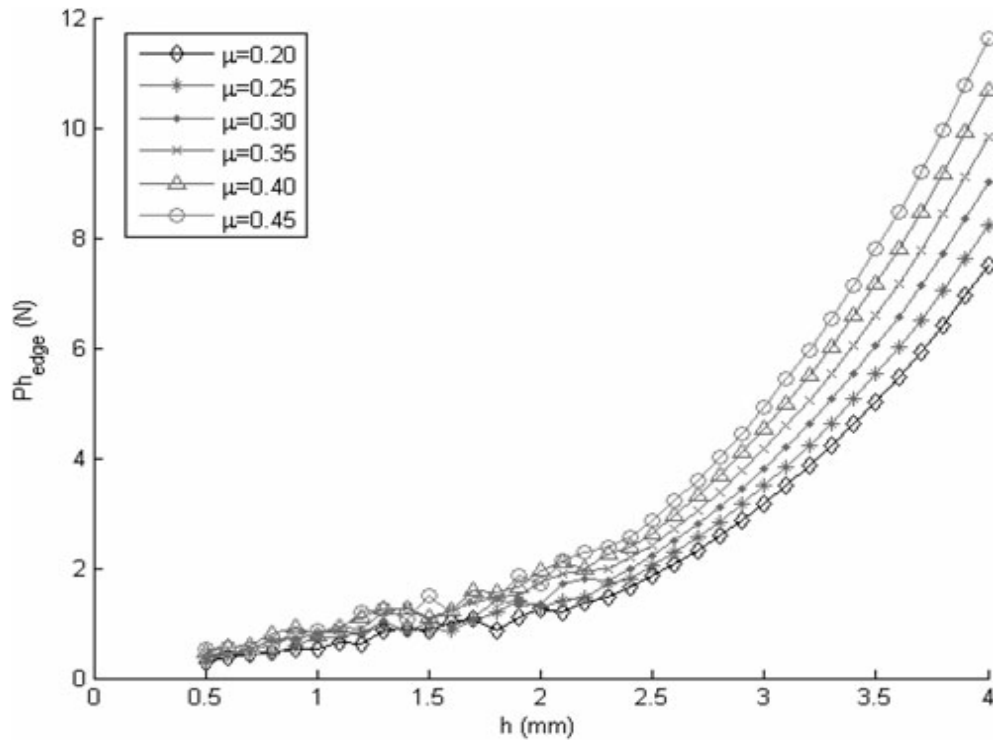
La première figure indique que la valeur de la force de coupe tangentielle  $p_{h_{edge}}$  est toujours positive, elle augmente proportionnellement avec l'augmentation de l'épaisseur du placage  $h$ .

La deuxième figure indique quant à elle que la valeur de la force de coupe radiale  $p_{v_{edge}}$  est négative, elle diminue proportionnellement avec l'augmentation de l'épaisseur du placage  $h$ .

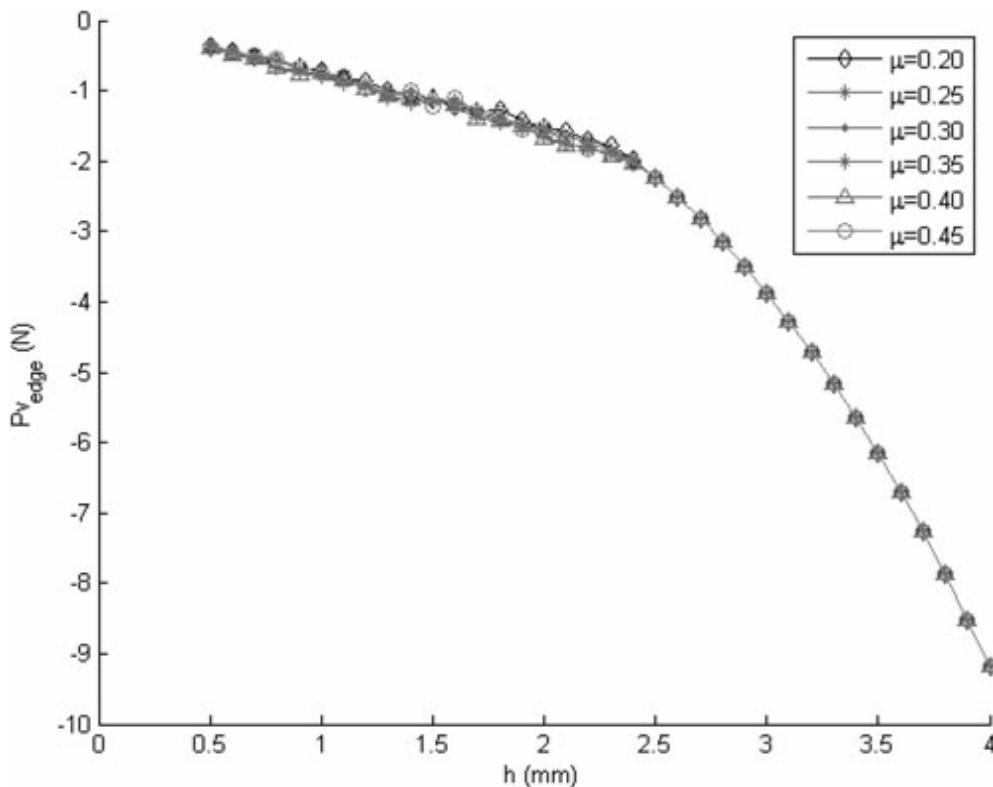
La variation des deux composantes de force de coupe s'amplifie lorsque l'épaisseur du placage dépasse 2mm ; l'ajout d'une barre de pression pour éviter ce phénomène est recommandé dans [Csa-2013].

On remarque aussi que la force tangentielle  $p_{h_{edge}}$  est influencée par l'effet de la variation du coefficient de frottement, cela s'explique par le fait que la force de frottement s'oppose au

mouvement de l'outil lors de l'usinage, contrairement à la force radiale  $p_{v\_edge}$  qui est indépendante de l'effet de la variation du coefficient de frottement.



**Figure III.14.** Variation de la force de coupe tangentielle  $p_{h\_edge}$  (horizontale) en fonction de l'épaisseur du placage  $h$  pour différentes valeurs de  $\mu$ .



**Figure III.15.** Variation de la force de coupe radiale  $p_{v\_edge}$  (verticale) en fonction de l'épaisseur du placage  $h$  pour différentes valeurs de  $\mu$ .

### III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude a été menée portant sur l'optimisation numérique de la géométrie de l'outil lors du procédé de déroulage du bois, la technique méta-heuristique utilisée est l'optimisation par essaims de particules (Particle Swarm Optimization « PSO »). Les résultats obtenus par le modèle numérique proposé sont comparés et validés avec ceux de la littérature. La méthode PSO a montré qu'elle peut produire des solutions optimales pour différentes conditions d'usinage (épaisseur du placage, coefficients de frottement) avec un temps de calcul moindre. L'intervalle préconisé par la PSO pour les valeurs des angles de coupe optimales est de  $19^\circ$  à  $23^\circ$  pour des placages de 2 mm et moins. Concernant les placages épais de plus de 2 mm, la condition de pré-fissuration ne sera plus vérifiée, et l'utilisation d'une barre de pression devient primordiale pour éviter la dégradation de la qualité du placage.

Le modèle développé se révèle très prometteur et présente les avantages suivants :

1. Ce modèle a été construit sur la base de la théorie de la coupe orthogonale, il peut être ainsi étendu à d'autres procédés d'usinage du bois tel que le fraisage, le tournage, etc.
2. La notion de multi-objectivité peut être ajoutée à notre modèle (comme par exemple, ajouter l'effet de l'usure de l'outil) et sous divers contraintes (comme par exemple, coût d'usinage).
3. Combiner ce modèle d'optimisation avec une technique d'intelligence artificielle afin de fournir des résultats plus précis.

## Conclusion générale et perspectives

L'objectif principal de notre étude a été de montrer la faisabilité de l'application d'une méthodologie d'optimisation développée vers l'usinage du bois en général, et le déroulage en particulier. Cela nous a permis de fixer la géométrie de l'outil et les limites des conditions de coupe de façon à travailler dans une zone de coupe optimale, avec pour résultats un état de surface correct et une épaisseur régulière du placage. Dans ce contexte, nous avons constaté l'absence de recherches concernant l'optimisation du choix de la géométrie de l'outil et des conditions de coupe pour le matériau bois. La méthode d'optimisation employée est une méthode bio-inspirée (Particle Swarm Optimization « PSO ») ; se basant sur le comportement des essaims d'animaux, qui a prouvé son efficacité dans plusieurs domaines. Cette méthode a été utilisée auparavant avec succès dans l'optimisation de l'usinage de différents matériaux métalliques, permettant aux chercheurs de déterminer les conditions de coupe dans lesquelles l'usinage devient problématique afin de les éviter et ainsi trouver la plage de paramètres optimaux pour que les états de surface soient meilleurs et l'usure minimale. Dans notre cas, nous avons employé la méthode d'optimisation par essaims de particules pour la détermination de la géométrie optimale de l'outil de coupe dans le procédé de déroulage du bois qui peut garantir un bon état de surface et une épaisseur régulière du placage final. Nous avons réalisé de ce fait, une série de tests numériques tendant à définir les valeurs optimales de l'angle de coupe pour différentes essences de bois. La méthodologie de résolution et les résultats de ces tests nous permettent de souligner les points suivants :

- La description des caractéristiques structurales et physico-mécaniques du bois reste indispensable pour déterminer les paramètres du matériau bois nécessaires pour la conduite de cette étude d'optimisation.
- Ce procédé d'usinage met en jeu plusieurs phénomènes physico-mécaniques tels que : la compression, le cisaillement, le frottement contre la surface de l'outil et aussi la fissuration.

- L'algorithme PSO produit de façon efficace des solutions optimales dans diverses situations d'usinage (pour différentes épaisseurs du placage et coefficients de frottement) dans un temps de calcul raisonnable.
- La plage des valeurs des angles de coupe optimaux est comprise entre 19° et 23°.
- Pour la production d'un placage de bois d'épaisseur supérieure à 2 mm, l'utilisation d'une barre de pression est primordiale pour éviter le pré-fissuration du bois et obtenir ainsi un placage de qualité.

L'algorithme PSO développé dans cette recherche présente des caractéristiques encourageantes pour les travaux futurs : Cet algorithme peut être facilement généralisé à d'autres procédés d'usinage du bois, tels que le fraisage et le tournage, puisque le mode de coupe orthogonal a été adopté. Il peut également être étendu à un problème multi-objectif (e.g. ajouter l'usure de l'outil) et sous diverses contraintes (e.g. critères économiques, temps d'usinage, etc.). L'algorithme peut aussi être combiné à une technique d'intelligence artificielle pour fournir des résultats plus précis et plus flexibles.

Cette étude constitue un premier pas vers l'utilisation de l'optimisation numérique dans le procédé d'usinage du bois et générer des données utiles pour les travaux futurs (ajout de la mécanique des barres de pression, application à d'autres procédés d'usinage du bois, etc.).

## Références bibliographiques

- [Aaf-2007]** Aafi, A. (2007). Etude de la diversité floristique de l'écosystème de chêne-liège de la forêt de la Mamora. Institut Agronomique et vétérinaire Hassan II.
- [Agu-2003]** Aguilera, A., Méausoone, P. J., Martin, P. (2003). A new methodology for wood cutting optimization in the secondary manufacturing processes. *HolzalsRoh-und Werkstoff*, 61(5), 358-362.
- [Akn-2009]** Aknouche, H. (2009). Etude de l'usure des outils de coupe traités dans le domaine de l'usinage du bois. These de doctorat, UMBB.
- [All-2005]** Allaire, G. (2005). Analyse numérique et optimisation, éditions de l'école Polytechnique.
- [Bal-1995]** Baldwin, r. (1995). Plywood and veneer-based products manufacturing practices. Miller Freeman Books, 388 p
- [Ben-2008]** Benslimane, M., Hamimed, A., El Zerey, W., Khaldi, A. Mederbal, K. (2008). Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord. *La revue électronique en sciences de l'environnement*, 8(3).
- [Bom-2011]** Bombrun, M., Sene, A. (2011). L'optimisation par essaim particulaire pour des problèmes d'ordonnancement. Rapport d'Ingénieur Projet de 2ème Année, Institut Supérieur d'Informatique de Modélisation et de Leurs Applications.
- [Bon-1997]** Bonnans, J. (1997). Optimisation numérique, coll. SMAI Mathématiques et Applications no27, Springer, 1997.
- [Bon-2007]** Bonin, V. (2006). Analytical modelling of chip formation during beech green wood rotary veneer cutting process (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).



- [Bou-1955]** Boudy, P. (1955). Economie forestière Nord-Africaine. vol. 1, description forestière de l'Algérie et de la Tunisie.
- [Bou-2007]** Boucher, J., Meausoone, P.-J., Martin, P., Auchet, S., and Perrin, L. (2007). Influence of helix angle and density variation on the cutting force in wood-based products machining. *Journal of materials processing technology*,
- [Bou-2010]** Bouallagui, S. (2010). Techniques d'optimisation déterministe et stochastique pour la résolution de problèmes difficiles en cryptologie (Doctoral dissertation, INSA de Rouen).
- [Bou-2019]** Bouarab, f.Z. Aknouche, A. Hamrani. (2019). A predictive model of the optimal tool edge geometry for veneer cutting processes, *Machining Science and Technology*, Francis and Taylor
- [Chan-2009]** Chandrasekaran, M. (2009). Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: a literature review. Springer-Verlag London
- [Cle-2004]** Clerc, M., & Siarry, P. (2004). Une nouvelle métaheuristique pour l'optimisation difficile : la méthode des essais particuliers.
- [Csa-2013]** Csanády, E., Magoss, E. (2013). Mechanics of the cutting process. In *Mechanics of Wood Machining*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [Ctb-1979]** Centre Technique du Bois. (1979). Technologie du déroulage CTB. Paris : CTB, 64 p. (Cahiers technique du bois)
- [Cos-2004]** Costes, J.-P., Ko, P. L., Ji, T., Decées-Petit, C., and Altintas, Y. (2004). Orthogonal cutting mechanics of maple: modeling a solid wood-cutting process. *Journal of Wood Science*.

- [Cyr-1996]** Cyrille DECES-PETIT, (1996). Etude des phases transitoires au cours du déroulage de bois. Thèse de Doctorat, ENSAM, Centre de Cluny.
- [Dav-2013]** Davim, J. P. (Ed.). (2013). Wood machining. John Wiley & Sons.
- [Den-2006]** Denaud, L. E. (2006). Vibro-acoustic analysis of the peeling process (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [Dor-2012]** El Dor, A. (2012). Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essaim particulaire : applications en segmentation d'images et en électronique (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).
- [Ebe-1995]** Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995, October). A new optimizer using particle swarm theory. In Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on (pp. 39-43). IEEE.
- [Elt-2013]** Eltawahni, H. A., Rossini, N. S., Dassisti, M., Alrashed, K., Aldaham, T. A., Benyounis, K. Y., & Olabi, A. G. (2013). Evaluation and optimization of laser cutting parameters for plywood materials. *Optics and lasers in engineering*, 51(9), 1029-1043.
- [Ete-2013]** Etele, Csandy. Endre, Magoss. (2013). Mechanics of the cutting process. In *Mechanics of Wood Machining*, pages 1{30. Springer Berlin Heidelberg.
- [Eym-2004]** Eyma, F., Méausoone, P.-J., and Martin, P. (2004). Study of the properties of thirteen tropicalwood species to improve the prediction of cutting forces in mode b. *Annals of forest science*.
- [Fag-2006]** Faga, M. G. and Settrineri, L. (2006). Innovative anti-wear coatings on cutting tools for wood machining. *Surface and coating technology*.
- [Fis-2003]** R. Fischer and Ch. Gottlober. (2003). Basics in the optimization of wood cutting in the example of peripheral milling. *Proc 16th Int Wood Machining*.

- [Fis-2004]** R. Fischer. (2004). Micro processes at cutting edge some basics of machining wood, Vienna. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Wood Machining, pages 191.
- [Flo-2004]** Florent Eyma, Pierre-Jean Méausoone, and Patrick Martin. (2004) Study of the properties of thirteen tropical woods pieces to improve the prediction of cutting forces in mode b. Annals of forest science.
- [Flo-2005]** Florent Eyma, Pierre-Jean Méausoone, Pierre Larricq, Rémy Marchal. (2005). Utilization of a dynamometric to estimate cutting forces involved during routing. Comparison with actual calculated values. Annals of forest science.
- [Gaw-2013]** Gawronski, T. (2013). Optimization of CNC routing operations of wooden furniture parts. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- [Gha-1997]** Ghazi, A, Lahouati, R. (1997). Sols et ressources biologiques. Alger : Institut national des études de stratégie globale (INESG).
- [Gia-1997]** A.E. Giannakopoulos, S. Suresh. (1997). Indentation of solids with gradients in elastic properties: Part i. point force. International Journal of Solids and Structures.
- [Gui-1987]** Guitard, D. (1987). Mécanique du matériau bois et composites. Cépaduès.
- [Han-2010]** Handbook, W. (2010). Wood handbook-Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: USA.
- [Hao-1999]** Hao, J. K., Galinier, P., Habib, M. (1999). Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes. Revue d'intelligence artificielle.

- [Haz-2006]** Hazard .C, J. P. Barette et J. Mayer. Mémoire technologie Bois et matériaux associés. Editions Casteilla, 2006
- [Hoc-2012]** H,Hocheng. (2012) Machining technology for composite materials principles and practice. Woodhead Pub, Philadelphia, Pa.
- [Hol-1998]** Holmberg, S. (1998). A numerical and experimental study of initial defibration of wood. Report TVSM, 1010.
- [Ian-1965]** Ian N. Sneddon. (1965). The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq-problem for a punch of arbitrary prole. International Journal of Engineering Science.
- [Ide-2015]** Ide, J., Tiedemann, M., Westphal, S., Haiduk, F. (2015). An application of deterministic and robust optimization in the wood cutting industry. 4OR, 13(1), 35-57.
- [Ike-2000]** Ikermoud, K, (2000) évaluation de ressources forestières nationales.DGF.Alger.39p.
- [Isk-2005]** Iskra, P. and Tanaka, C. (2005). The influence of wood fiber direction, feed rate, and cutting widthon sound intensity during routing. HolzalsRoh-und Werksto, 63(3) :167{172
- [Joh-2014]** Johannes, B. (2014). Optimization Modeling. AIMMS, George Mason University, USA.
- [Khe-2013]** Khelil, N., &Djerou, L. (2013). Intégration Numérique (2D) basée sur l'Intelligence en Essaim. Éditions Universitaires Européennes.
- [Kol-1975]** Kollmann, F. F., Kuenzi, E. W., Stamm, A. J. (1975). Particleboard. In Principles of Wood Science and Technology (pp. 312-550). Springer Berlin Heidelberg.

- [Kri-2016]** Krimpenis, A. A., Fountas, N. A., Mantziouras, T., Vaxevanidis, N. M. (2016). Optimizing CNC wood milling operations with the use of genetic algorithms on CAM software. *Wood Material Science & Engineering*, 11(2), 102-115.
- [Kul-2013]** Kuljich, S., Cool, J., & Hernández, R. E. (2013). Evaluation of two surfacing methods on black spruce wood in relation to gluing performance. *Journal of wood science*, 59(3), 185-194.
- [Kiv-1950]** Kivimaa, E. (1950). Cutting force in woodworking. *ValtionTeknillinenTutkimus laitoksen Julkai-suja*, (No. 18):102.
- [Kmo-1976]** Komatsu, M. (1976). Machine boring properties of wood, 2: The effects of boring conditions onthe cutting forces and the accuracy of nishing. *Journal of the Japan Wood Research Society*.
- [Lau-2016]** Laurent, G. (2016). Optimisation déterministe et stochastique, Laboratoire de mathématiques Jean Leray, Université de Nantes.
- [Lu-2002]** Lu, G. (2002). HDPE wood-plastic composite material model subject to damage (Doctoral dissertation, Washington State University).
- [Lut-1974]** Lutzj.F. (1974). Techniques for peeling, slicing and drying veneers. USDA FPL Madison Report 228, 63 p.
- [Mar-1983]** Marchal, R. (1983). Intérêt de la prise en compte de caractéristiques physiques et anatomiques simples du bois de chêne pur l'appréciation de la qualité des placages d'ébénisterie. DEA Sciences du Bois, INPL, Nancy, 105p.

- [Mar-2009]** Rémy Marchal, Frédéric Mothe, Louis-Etienne Denaud, Bernard Thibaut, and Laurent Bleron. (2009). Cutting forces in wood machining, basics and applications in industrial processes, wood Machining, micromechanics and fracture. *Holzforschung*.
- [Mat-2013]** Mathias, K. (2013). Méthodes et outils d'optimisation. Université Art et Métiers Paris tech.
- [Mer-1945]** Merchant, M. E. (1945). Mechanics of the metal cutting process. i. orthogonal cutting and a type2 chip. *Journal of applied physics*,16(5) : 267-275
- [Mck-1975]** McKenzie, W. and Karpovich, H. (1975). Wear and blunting of the tool corner in cutting a wood- based material. *Wood science and technology*, 9(1): 59-73
- [Mck-1960]** McKenzie, W. M. (1960). Fundamental aspects of the woodcutting process. *Forest Products Journal*, 10(9): 447-56
- [Mck-1961]** Mac kenzie W.M. (1961). Fundamental aspects of the wood cutting process, Doctoral thesis. University of Michigan.
- [Mck-2001]** McKenzie, W., Ko, P., Cvitkovic, R., and Ringler, M. (2001). Towards a model predicting cuttingforces and surface quality in routing layered boards. *Wood Science and Technology*, 35(6):563{569.
- [Mez-2003]** Mezali, M. (2003). Forum des Nations unies sur les forêts (3e session, Genève). Alger : Ministère de l'Agriculture et du Développement rural et Direction générale des forêts.
- [Woo et Koch-1970]** Tool Forces and Chip Formation In Orthogonal Cutting Of Loblolly Pine. Res. Pap. SO-52. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 29 p.

- [Mot-1988]** Mothe F. (1988). Aptitude au déroulage du bois de douglas. Conséquences de l'hétérogénéité du bois sur la qualité des placages. Doctorat de l'INPL en Sciences du Bois, Nancy.
- [Mot-1990]** Mothe, F. (1990). Evaluation de la qualité d'un placage déroulé application au cas de l'Epicéa. Actes du 3eme colloque des Sciences et Industries du Bois, Bordeaux, 83p
- [Mov-1985]** E.Movassaghi. (1985). Influence des paramètres micro densimétriques du Bois, sur les efforts de coupe et la qualité des placages de Douglas et de Châtaigner obtenus par déroulage, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 181p.
- [Mov-1985]** Movassaghi, E. (1985). Influence des paramètres micro densimétriques du bois, sur les efforts de coupe et la qualité des placages de douglas et de châtaigner obtenus par déroulage. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, 181p.
- [Nav-2005]** Navi, P., Heger, F. (2005). Comportement thermo-hydrromécanique du bois : Applications technologiques et dans les structures. PPUR presses polytechniques.
- [Oue-2005]** Ouelmouhoub, A. (2005) contribution à l'étude des subéraies de la région d'El Kala : Dynamique post-incendie des successions végétales et leur biodiversité. Thèse Magister INA Alger.
- [Pal-2005]** Jan Palmqvist, Matz Lenner, and Stig-Inge Gustafsson. (2005). Cutting-forces when up-milling in beech. Wood science and technology, 39(8):674.
- [Pav-1987]** Pavithran, C., Mukherjee, P. S., Brahmakumar, M., & Damodaran, A. D. (1987). Impact properties of natural fibre composites. Journal of Materials Science Letters, 6(8), 882-884.

- [Pet-1964]** Peter Koch et al. (1964). Wood machining processes. Wood machining processes.
- [Por-2011]** Porankiewicz, B., Axelsson, B., Gronlund, A. A., and Marklund, B. (2011). Main and normalcutting forces by machining wood of pinussylvestris. *BioResources*, 6(4):3687{3713.
- [Ros-1964]** N.A. Rostovtsev. (1964). On the theory of elasticity of a nonhomogeneous medium. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*.
- [San-2006]** Sana, B. (2006). Lignes d'usinage avec équipements standard : Modélisation, configuration et optimisation. École Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne.
- [Sch-1995]** Schwefel, H. P., Schwefel, H. P., Schwefel, H. P., & Schwefel, H. P. (1995). Evolution and optimum seeking (Vol. 1515). New York: Wiley.
- [Sch-2005]** Scholz, F. and Troeger, J. (2005). Modelling of cutting forces. In Proc. of 17th Int. Wood Machining Seminar, Yuri Stakhiev Seminar, G. Lachenmayr and F. Scholz (ed.), Rosenheim, pages 260{264.
- [Sei-1985]** Seigue, A. (1985). Forêt circumméditerranéenne et ses problèmes. Maisonneuve et Larose.
- [Set-2005]** Settles, M. (2005). An introduction to particle swarm optimization. Department of Computer Science, University of Idaho.
- [Sha-2006]** Shang, Y. W., & Qiu, Y. H. (2006). A note on the extended Rosenbrock function. *Evolutionary Computation*, 14(1), 119-126.
- [Sit-1983]** Sitkei, G. (1983). Fortschritte in théorie des spanens von holz. *Holztechnologie* 2, 67–70.



- [Sit-1990]** Sitkei, G., et. al. (1990). Théorie des spanens von Holz. Fortschrittbericht No. 1. Acta Fac. Ligniensis Sopron.
- [Ska-1988]** Skaar, C. (1988). Wood Moisture and the Environment. In Wood-Water Relations (pp. 1-45). Springer Berlin Heidelberg.
- [Sté-2017]** Stéphane, C. (2017). Introduction à l'optimisation pour l'ingénieur.
- [Ste-1988]** Stewart, H. (1988). Tool forces and edge recession from cutting medium density fiberboard. Forest products journal.
- [Sup-2006]** Supadarattanawong, S., Rodkwan, S. (2006). An investigation of the optimal cutting conditions in Parawood (Heave a Brasiliensis) machining process on a CNC wood router. Kasetsart Journal (Natural Science), 40(5), 311-319.
- [Sin-2005]** Sinn, G., Zettl, B., Mayer, H., and Stanzl-Tschegg, S. (2005). Ultrasonic-assisted cutting of wood. Journal of materials processing technology, 170(1-2):42-49.
- [Tab-2000]** Tabiei, A., & Wu, J. (2000). Three-dimensional nonlinear orthotropic finite element material model for wood. Composite structures, 50(2), 143-149.
- [Thi-1988]** Thibaut B. (1988). Le processus de coupe du bois par déroulage. Thèse de doctorat d'État mention Sciences, Montpellier : Université des sciences et technologies du Languedoc, p367.
- [Thi-1988b]** Thibaut B. (1988b). Analyse des phénomènes de flambement du copeau lors de l'usinage du bois en mode 0° -90°: Bordeaux, GS Rhéologie du Bois, p. 287-298
- [Thi-1989]** Thibaut B. (1989). Le déroulage des bois de petit diamètre. Projet groupe P5.01: « Properties and utilization of tropical Wood », IUFRO, Abidjan, P. 117-129.

- [Thi-1992]** Thibaut B. (1992). Basic process in veneer cutting, summary of the main experimental results and proposed simplistic models. IUFRO All Division 5 conference, Nancy, ARBOLOR p. 579.
- [Thi-2001]** Thibaut, B., Gril, J. Fournier, M. (2001). Mechanics of wood and trees: some new highlights for an old story. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIB-Mechanics, 329(9), 701-716.
- [Tim-1951]** Stephen Timoshenko. J, N, Goodier. (1951) Theory of elasticity. McGraw-Hill, New York.
- [Tir-2014]** Tiryaki, S. Malkocoglu, A., and Ozsahin, S. (2014). Using artificial neural networks for modeling surface roughness of wood in machining process. Construction and Building Materials, 66, 329-335.
- [Tor-1989]** Torn, A., Zilinskas, A. (1989). Global optimization. Springer-Verlag New York, Inc.
- [Tou-2010]** Toussaint, P. (2010). Application et modélisation du principe de la précontrainte sur des assemblages de structure bois (Doctoral dissertation, Nancy 1).
- [Val-2004]** Vallée, T. Yildizoğlu, M. (2004). Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie. Revue economie politique, 711-745.
- [Woo-1970]** Woodson, G. E., Koch, P., et al. (1970). Tool forces and chip formation in orthogonal cutting of loblolly pine. Southern Forest Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture.

# Annexe : Partie expérimentale

---

## Sommaire

A.1. Caractérisation expérimentale du bois .....	78
A.1.1. Prélèvement des échantillons.....	78
A.1.2. Préparation des éprouvettes .....	79
A.1.3. Campagnes d'essais mécaniques .....	80
A.1.3.1. Essais de flexion quatre points.....	81
A.1.3.2. Essais de traction.....	83
A.1.3.3. Essais de compression.....	85
A.2. Usinage par déroulage industrielle du bois .....	88
A.2.1. Lieu des travaux.....	88
A.2.2. Essais de déroulage.....	89
A.2.3. Defaults de placage.....	91

Cette annexe présente la campagne d'essais menées, en premier lieu, au sein du laboratoire de l'unité de recherche matériaux procédés et environnements (URMPE) de l'UMBB, afin de caractériser mécaniquement les essences de bois recueillis à travers différentes zones de l'Algérie : Jijel, Bejaia, Bouira et Tlemcen, appartenant essentiellement à la famille d'essences : chêne Zéen, chêne Afares et chêne Liège. En second lieu, au sein de l'entreprise TRANSBOIS Bejaia, pour assister et mener des opérations de déroulage du bois et ainsi être capable de percevoir les difficultés techniques et opérationnelles pour l'obtention de placage optimal de bois.

## A.1. Caractérisation expérimentale du bois

Trois étapes essentielles ont été suivies pour la caractérisation mécanique du bois :

- 1) Prélèvement des échantillons.
- 2) Préparation des éprouvettes.
- 3) Réalisation des essais mécaniques.

### A.1.1. Prélèvement des échantillons

Les essences de bois recueillis à travers différentes zones de l'Algérie (figure A.1) sont : le chêne zéen, chêne afares et chêne liège.



**Figure A.1.** Régions de recueil de nos essences de bois.

Le découpage pour le prélèvement des grumes de bois (figure A.2) a été ensuite effectué au niveau de l'atelier ex-INIL (Ex-Institut National des Industries Légères) de l'UMBB.



**Figure A.2.** Grumes du bois découpées de : chêne zéen, chêne afares, chêne liège.

### **A.1.2. Préparation des éprouvettes**

La préparation ; ou plus précisément le découpage, des éprouvettes, s'est effectué en premier lieu par une scie à chaîne, où les troncs ont été découpé en plusieurs coupes longitudinales (figure A.3-a).

Ces tranches longitudinales sont ensuite découpées à l'aide d'une scie circulaire sur table (figure A.3-b) en des éprouvettes de différentes dimensions adaptées aux types d'essai à réaliser (figure A.4) :

- Essais de flexion à quatre points (selon la norme NFEN408) : 20x20x340 mm.
- Essais de compression axiale (selon la norme NF B 51 007) : 20x20x60 mm.
- Essais de traction (selon la norme NF EN 319) : 20x20x60 mm.

Enfin, à l'aide du papier à verre les éprouvettes découpées sont frottées afin d'avoir une bonne qualité de surface.



**Figure A.3.** Préparation des éprouvettes : a) découpage par scie à chaîne, b) coupe et rabotage)



**Figure A.4.** Découpage des éprouvettes aux dimensions exigées par les normes adoptées.

### A.1.3. Campagnes d'essais mécaniques

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser mécaniquement le comportement des matériaux. Cette loi de comportement établie sera en général une relation entre les contraintes et les déformations subies par le matériau lors des essais. Cependant, les déformations dans une pièce dépendent fortement de sa géométrie et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs. Il faut donc suivre des normes spécifiques (internationales) sur les essais à entreprendre. Ces normes définissent principalement :

- La forme géométrique des éprouvettes d'essai dont on teste le matériau,

- La façon (sens, ampleur, etc.) dont on doit exercer les efforts (forces) sur l'éprouvette.

Dans ce qui suit, on présentera la campagne d'essais mécaniques effectuée dans le laboratoire (URMPE) Boumerdes (flexion 4 points, traction, compression), en précisant toutes les informations nécessaires à ces tests (norme, résultats).

#### **A.1.3.1. Essais de flexion quatre points**

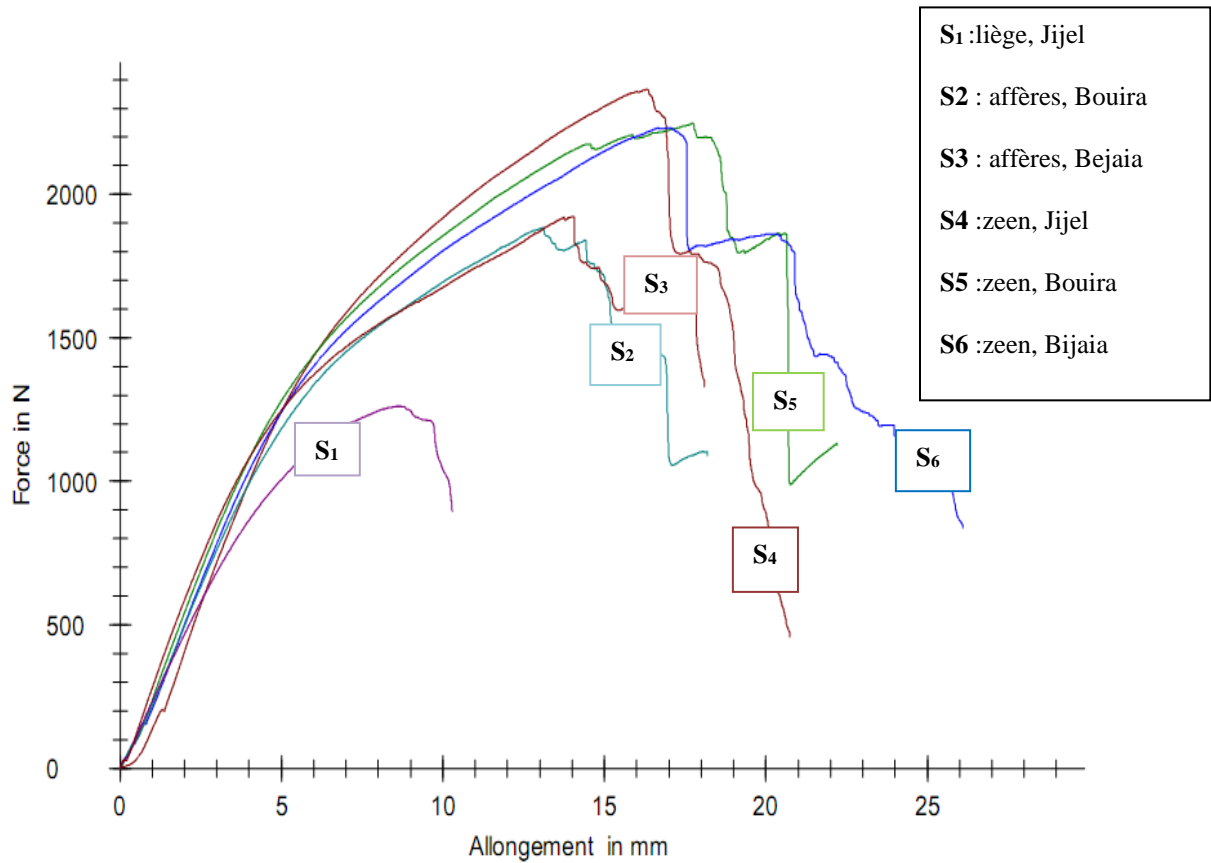
L'objectif de l'essai de flexion quatre points est de déterminer la résistance et la rigidité flexionnelle d'éléments en bois. Il peut s'agir de poutres pleines, en I, lamellé-collées, etc. La procédure est généralement définie en suivant la norme NF EN 408.

La figure A.5 illustre l'essai de flexion quatre points réalisés sur les trois types d'éprouvettes, issus des trois essences étudiées (chêne zeen, chêne afares, chêne liège).



**Figure A.5.** Essai de flexion 4 points réalisé au laboratoire.

Après la réalisation de l'essai de flexion 4 points, les résultats obtenus sur les éprouvettes en bois, sollicitées par une force croissante afin d'analyser le champ de déformation, sont illustrés dans la figure A.6.



**Figure A.6.** Sollicitation en fonction de l'allongement pour chaque type de bois.

Les remarques qui peuvent être tirées de la figure ci-dessus sont :

- La force maximale de rupture est enregistrée pour une force égale à 1500N.
- La loi de comportement observée est constituée d'une partie presque linéaire, qui caractérise le domaine élastique, suivi d'une courbure brusque, qui caractérise le domaine non linéaire plastique et la rupture (figure A.7).



**Figure A.7.** Rupture des éprouvettes soumises à la flexion.



D'après les résultats obtenus des essais réalisés sur différentes éprouvettes, on peut déduire que la résistance à la rupture varie selon le type de bois, dans notre cas, ils sont classés selon l'ordre croissant suivant : S1 : liège/ Jijel, S2 : affères/Bouira, S3 : affères/Bejaia, S4 : zeen/Jijel, S5 : zeen/Bouira, S6 : zeen/Bijaia.

#### **A.1.3.2. Essais de traction**

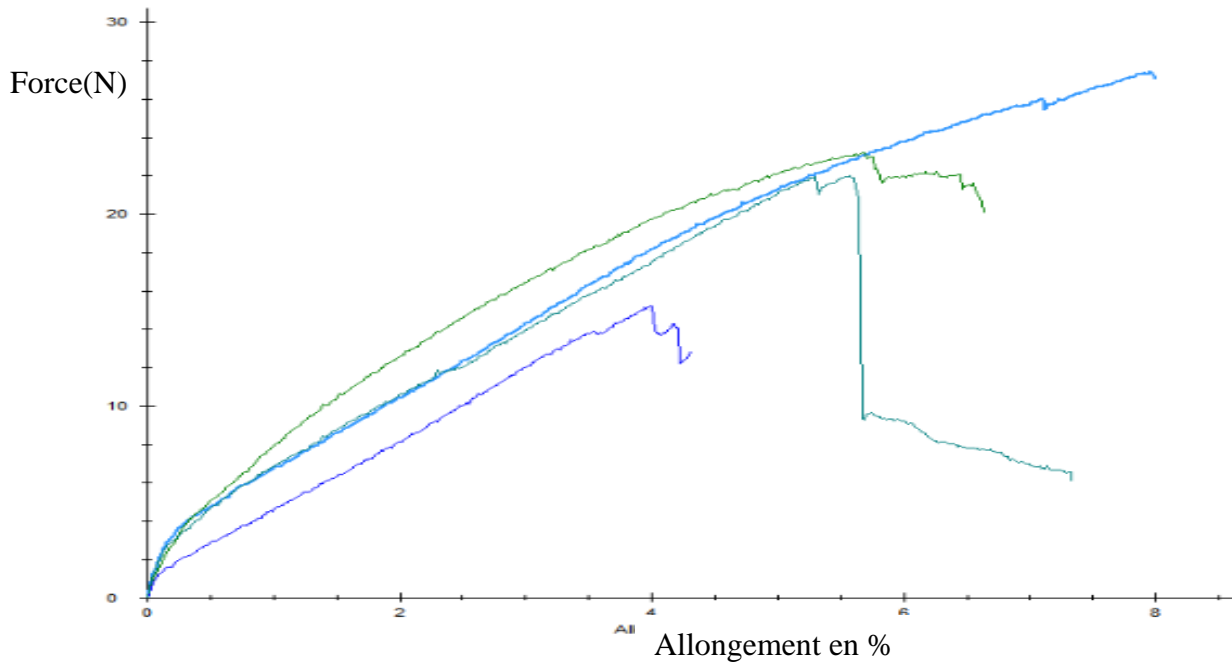
Dans cet essai de traction on essayera de : déterminer le comportement élastique d'un matériau, de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau. La procédure est généralement définie en suivant la norme NF EN 319.

Le schéma ci-dessous (figure A.8) représente l'essai de traction longitudinale appliqué sur les trois types d'éprouvettes issus des trois essences étudiées (chêne zeen, chêne affères, chêne liège).

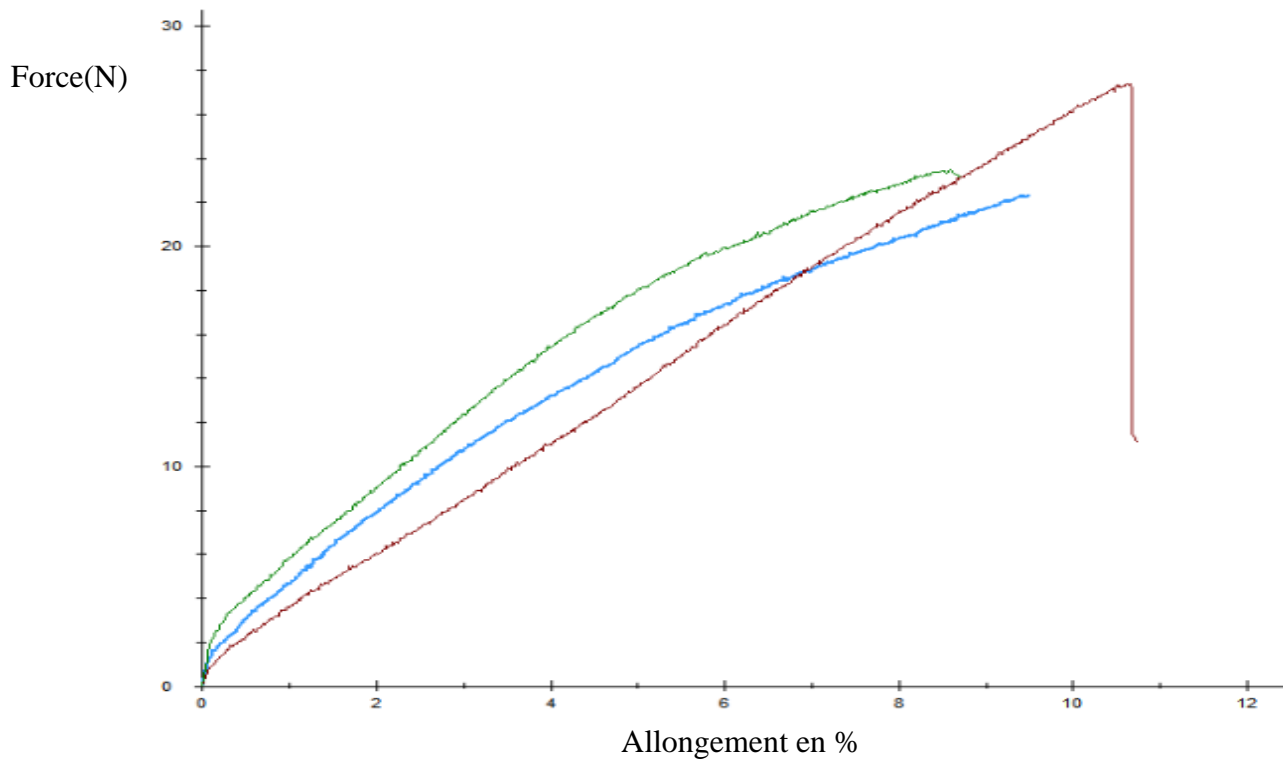


**Figure A.8.** Essais de traction.

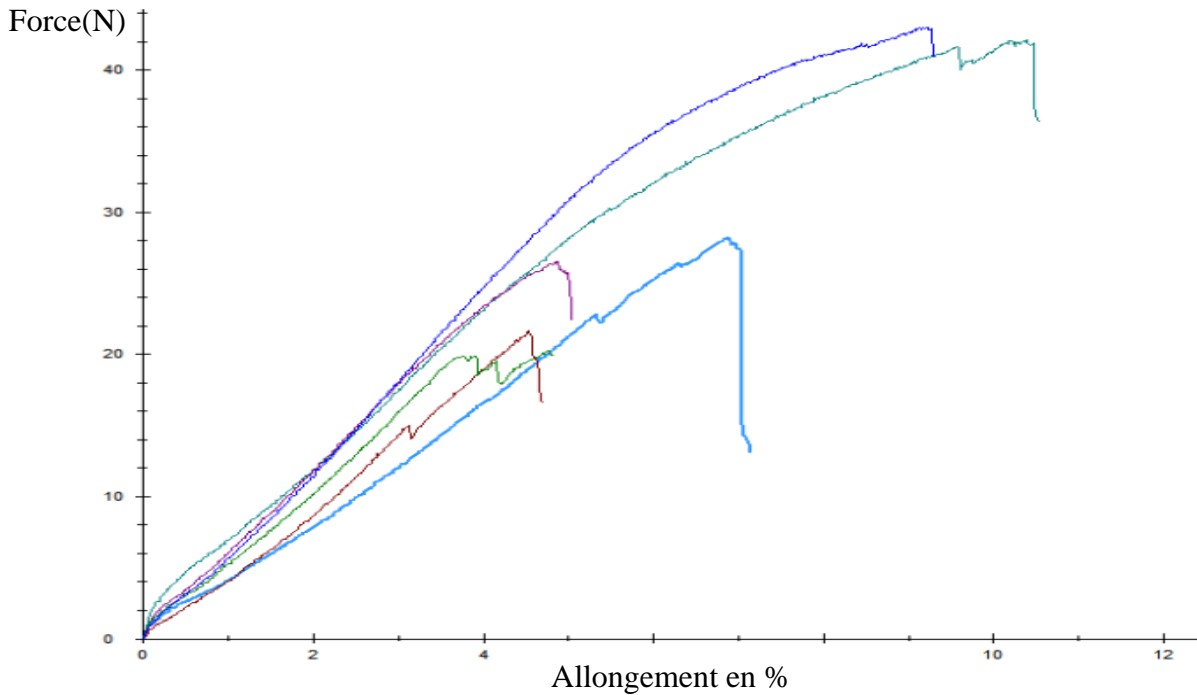
Après la réalisation de l'essai de traction sur les éprouvettes en bois, sollicitées par un champ de force croissant, les résultats du champ de déformation sont illustrés dans les figures A.9, figure A.10 et figure A.11.



**Figure A.9.** Résultats des essais de traction longitudinal sur le chêne zeen (Bejaia).



**Figure A.10.** Résultats des essais de traction longitudinal sur le chêne affères (Bouira).



**Figure A.11.** Résultats des essais de traction longitudinal sur le chêne liège (Jijel).

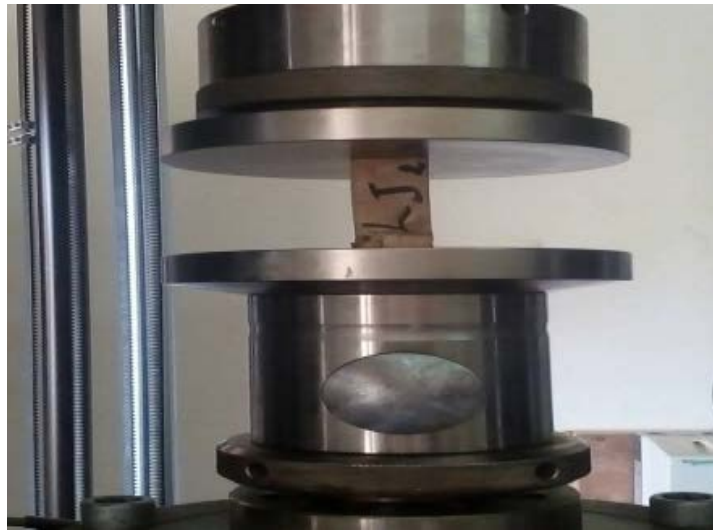
Les remarques qui peuvent être tirées des trois figures précédentes sont :

- Le comportement élastique est dominant où on peut donc déterminer facilement (calcul de pente) le module de rigidité longitudinale.
- La résistance à la traction varie largement avec la direction d'allongement par rapport aux fibres.
- On remarque que la traction longitudinale amène la rupture par fendage parallèlement aux fibres.

### A.1.3.3. Essais de compression

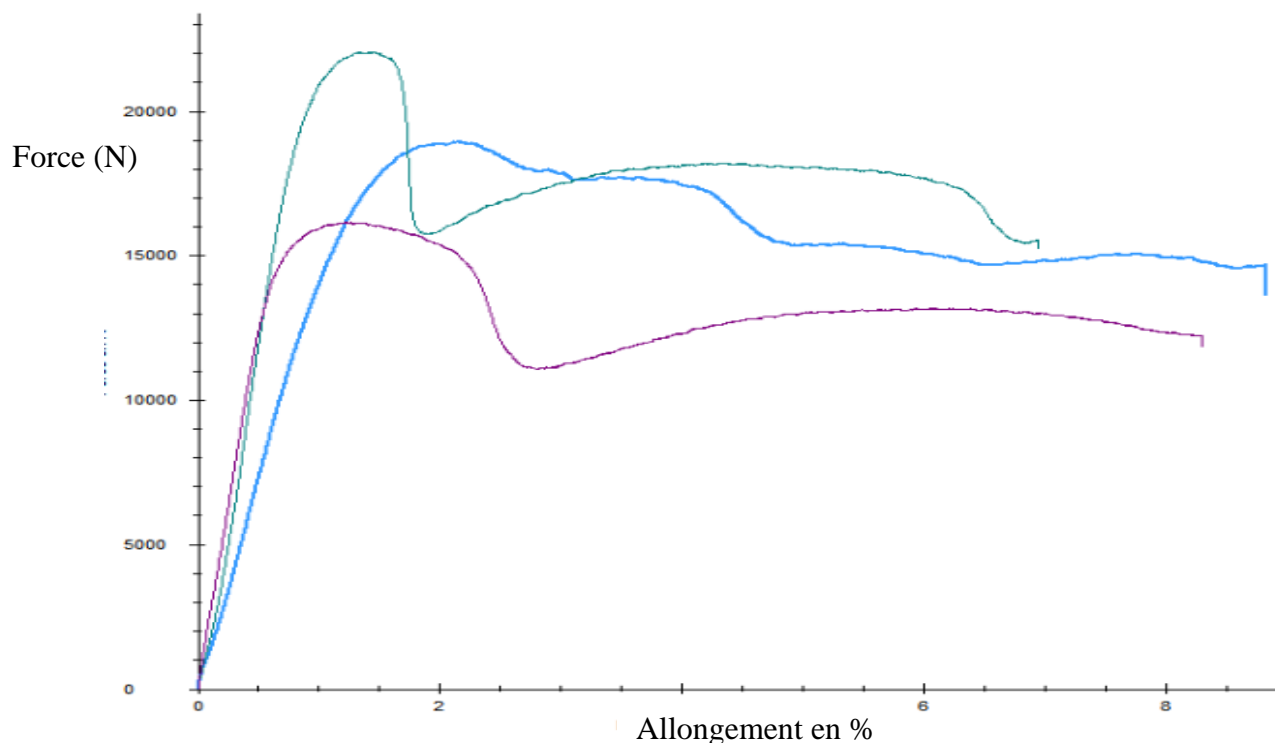
La résistance à la compression est la capacité d'un matériau ou d'une structure à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression (écrasement). La procédure est généralement définie en suivant la norme NF B 51 007.

Le schéma ci-dessus représente l'essai de compression longitudinale réalisée sur les trois types d'éprouvettes issus des trois essences étudiées (chêne zeen, chêne affères, chêne liège) des trois régions (Jijel, Bouira, Bejaia).

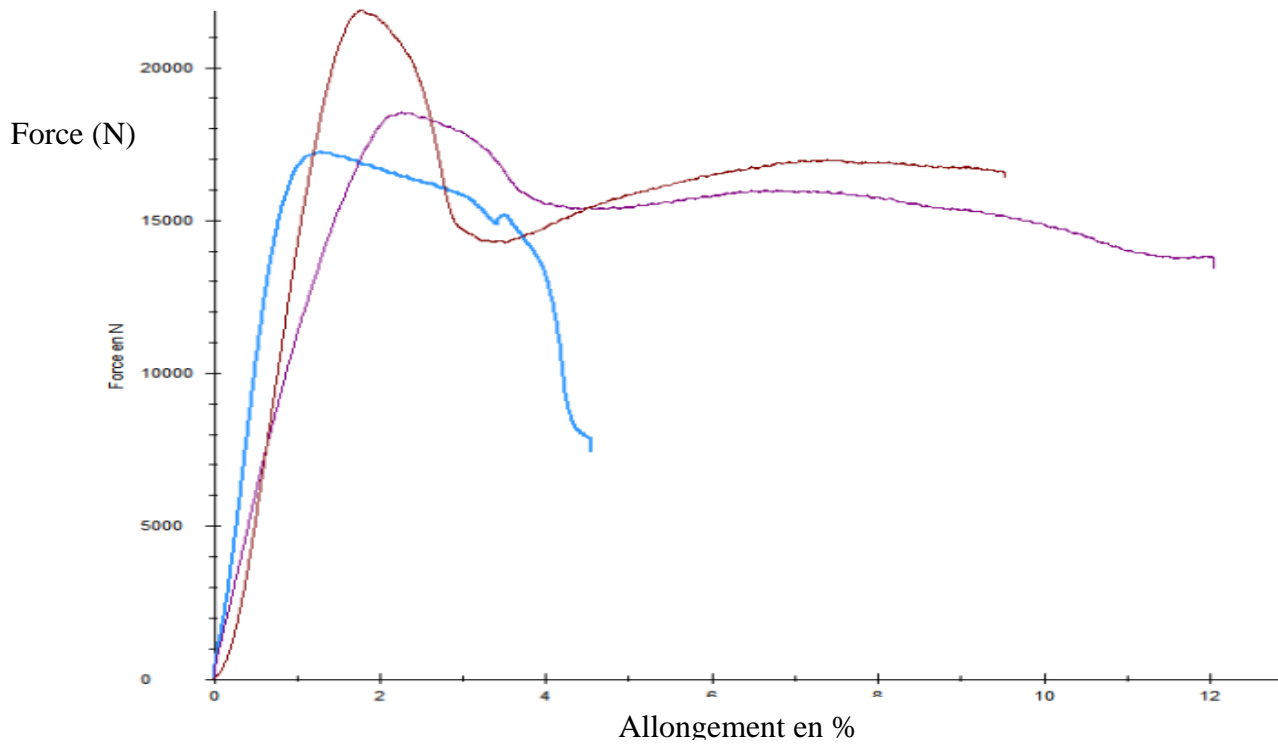


**Figure A.12** essais de compression.

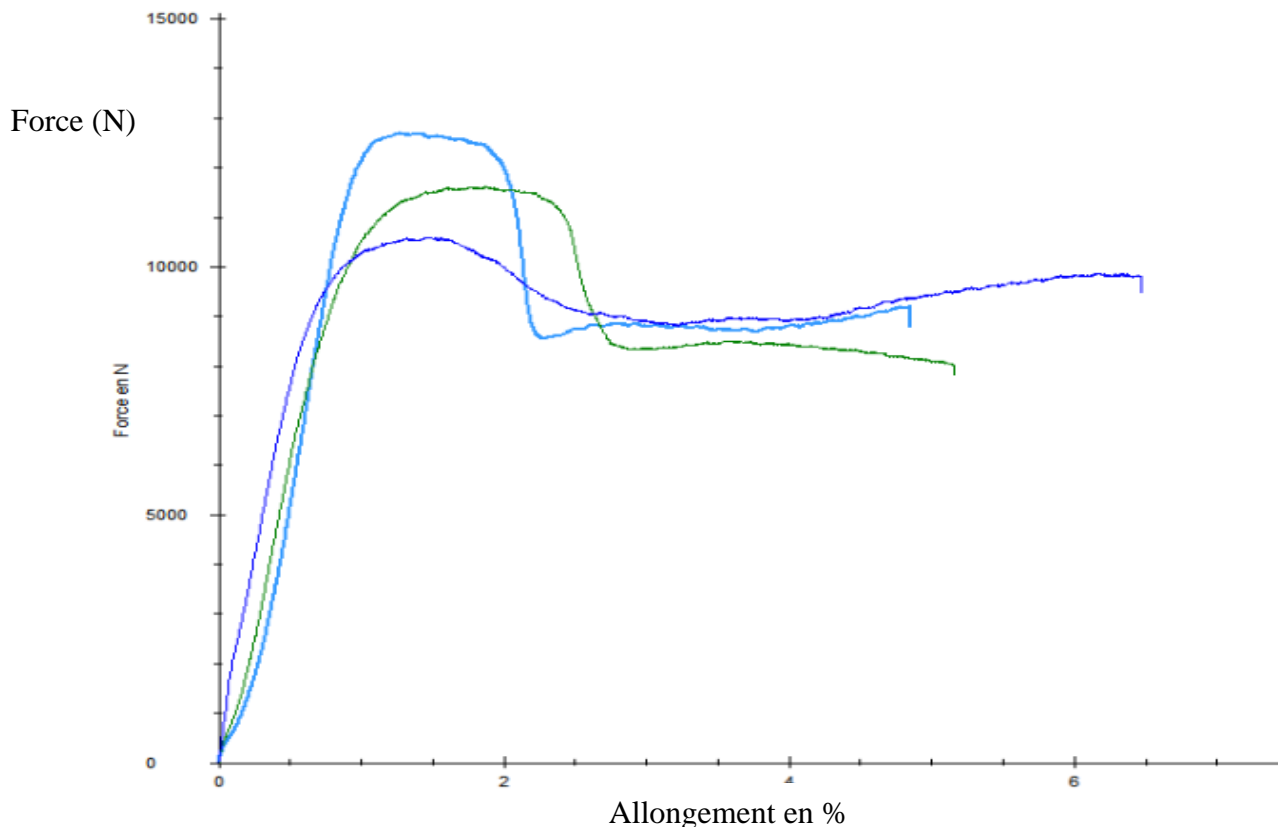
Après l'exécution de l'essai de compression, les résultats obtenus sur les éprouvettes en bois, sollicités par une force croissante afin d'analyser le champ de déformation sont illustrés dans les figures A.13, figure A.14 et figure A.15.



**Figure A.13.** Résultat des essais de compression sur le chêne zeen (Bejaia).



**Figure A.14.** Résultat des essais de compression sur le chêne affères (Bouira).



**Figure A.15.** Résultat des essais de compression sur le chêne liège (Jijel).

Les remarques qui peuvent être tirées des trois figures en dessus sont :

- Les forces maximales mesurées varient entre 15000N à 20000N.
- On constate qu'il existe trois phases de déformation (élastique, flambement et consolidation)

D'après les résultats obtenus des essais réalisés sur différentes éprouvettes, on peut déduire que :

- Le comportement des éprouvettes soumises à des sollicitations de compression dépend fortement de la nature de l'essence et sa densité : l'essence la plus dense est la plus résistante à la compression.
- Durant la première phase élastique le matériau reste sain sans dommage au niveau de ces cellules.
- Durant la deuxième phase de flambement, les cellules subissent un écrasement graduel.
- La troisième phase de consolidation correspond à l'écrasement progressif des parois cellulaires.

## **A.2. Usinage par déroulage industrielle du bois**

### **A.2.1. Lieu des travaux**

L'entreprise par actions TRANSBOIS (fondée en juin 1998) est la principale société de transformation du bois en divers produits finis comme : contreplaqué, panneau latté, panneau de particules, placage de tranchage et sciage de bois.

Les travaux ont été menés à l'entreprise TRANSBOIS Bejaia, qui est située à l'est du port de Bejaia à proximité des réseaux d'approvisionnements et de distributions des marchandises (figure.A.16).



**Figure A.16.** Cartographie de l'entreprise TRANSBOIS Bejaia (Google map).

### A.2.2. Essais de déroulage

Le déroulage des billons de bois a été effectué sur la dérouleuse DNH27 (figure A.17). Cette machine permet d'avoir un placage de 1 à 6 mm d'épaisseur, à partir de billons de longueur maximale égale à 2700 mm et de diamètre maximum de 1800 mm (tableau A.1).



**Figure A.17.** Dérouleuse type : DNH27 de *TRANS BOIS EPE/SPA Bejaia*.

**Tableau A.1:** Données techniques de la dérouleuse type : DNH27 (documents *TRANS BOIS EPE/SPA Bejaia*).

Caractéristique principale	Valeurs
Diamètre maximum des billes	1800mm
Longueur de couteau	2800mm
Epaisseur possible de déroulages	Gamme mince : 0.4 à 2.2 mm Gamme épaisse : 1 à 5.5mm
Vitesse de rotation de la bille	15 à 157t /mm
Puissance du moteur de travail	136 à 750 W
Vitesse de déplacement rapide du chariot : avance recule	23,5mm/s 47mm/s
Vitesse de déplacement des broches	88mm/s
Numéro du couteau	34.602b
Numéro de la barre de pression	8.363b
Diamètre de la grande broche	190mm
Diamètre de la petite broche	130mm
Longueur maxi de la bille	2700mm

L'opération de déroulage a été réalisée sur des grumes du bois de type chêne zeen. Pour obtenir des placages de 1.5 et 2mm d'épaisseur. Les feuilles de placages produites sont enroulées sous forme de bobine (figure.A.18) pour ensuite passer au séchoir à rouleau (150°C), pour une durée d'environ 1h et enfin les mettre en milieu ambiant.



**Figure A.18.** Bobine de la matière déroulée.



### A.2.3. Defaults de placage

Les critères de qualité d'un placage sont [Mar-1983], [Mov-1985], [Mot-1990] : l'homogénéité de l'épaisseur, la planéité, l'état de surface, la fissuration mais aussi la couleur et la nodosité. Les défauts souvent rencontrés dans la matière déroulée sont :

- **Tendance au tuilage**

La tendance au tuilage se reconnaît par des ondulations et des gondolements apparaissant sur le placage (figure.A.19), juste après déroulage. Lorsqu'elle est très prononcée, elle se traduit avant séchage par des phénomènes d'auto-enroulement du placage en fin de déroulage, rendant l'opération de massicotage difficile.

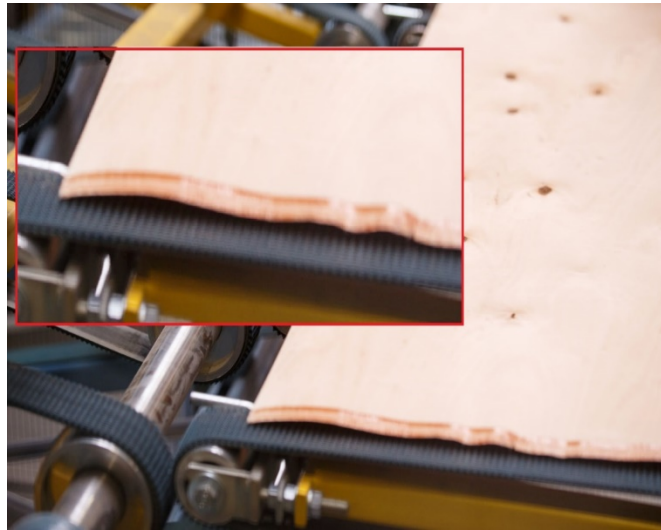


**Figure A.19.** Fissure apparaissant dans la feuille de placage.

- **Irrégularité d'épaisseur**

Quelle que soit l'épaisseur nominale du placage, celui-ci présente toujours une irrégularité d'épaisseur plus ou moins importante (figure.A.20) qui est due à plusieurs facteurs, on citera les vibrations de la machine, l'usure de l'outil, défauts dans la matière à déroulée, etc...Rappelons que les grandes variations entraînent une consommation excessive de colle, diminuent la résistance des joints de colle et nécessitent la mise en œuvre d'une pression

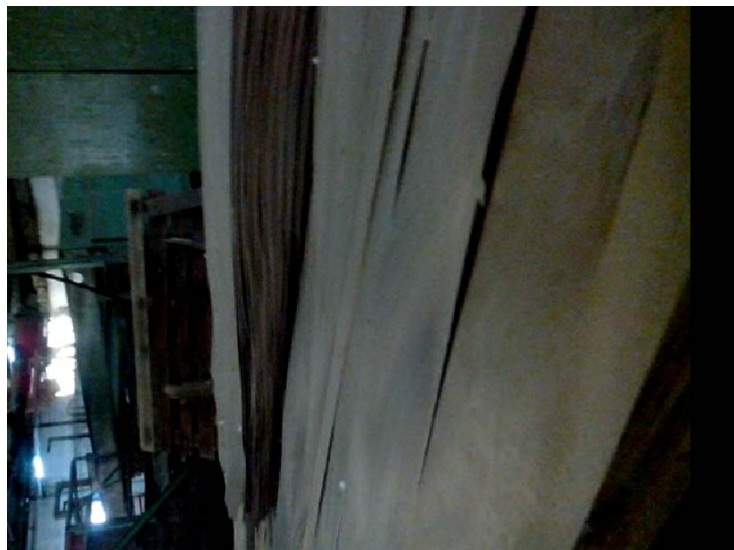
accrue pendant le pressage. Cette hétérogénéité pourrait imposer aussi une post-opération de ponçage qui engendre une perte de matière non négligeable.



**Figure A.20.** Irrégularité d'épaisseur dans la feuille de placage.

- **Fissuration**

Lors de l'opération de déroulage, des fissures (de l'échelle micro à l'échelle macro) apparaissent sur la surface (figure.A.21), cela est dû à plusieurs facteurs on citera : les défauts internes de la matière déroulée, le non-respect des paramètres de coupe optimaux, la dynamique de la machine, etc...



**Figure A.21.** Fissures apparaissant dans la feuille de placage.

Dans cette partie, on s'est intéressé à l'aspect expérimental concernant le travail du bois, en commençant de la caractérisation mécanique à travers différents essais (traction, compression, flexion quatre points), jusqu'aux essais de déroulage industriels dans l'entreprise TRANSBOIS Béjaia. Cette étude a permis d'appréhender les difficultés pratiques rencontrées lors des essais expérimentaux (réglages, calibrage, montage, mesure, etc.) et de constater les défauts obtenus dans la matière déroulée en cas de non-respect des paramètres d'usinage optimaux, en particulier celles concernant l'outil (le réglage des distances avec la barre de pression, de son angle orientation ainsi que son usure...etc.).

## **Bilan des communications et articles publiés dans le cadre de cette thèse**

### **Publications internationales**

1. **Bouarab Fatma-zohra**, Aknouche Hamid, Hamrani Abderrachid, « A predictive model of the optimal tool edge geometry for veneer cutting Processes », *Machining Science and Technology*, Francis and Taylor, 2019.
2. **Bouarab Fatma-zohra**, Aknouche Hamid, Hamrani Abderrachid, « Optimization of tool geometry parameters for rotary peeling veneer cutting processes based on PSO algorithm » *Manufacturing process*, Springer, 2018.
3. **H. Aknouche**, S. Kennouche, F.Z. Bouarab, M.S. Bouamerene, A. Zerizer, B. Safi « Wear of special treated tools during MDF peeling » . *International Journal of New Technology and Research*, ISSN: 2454-4116, Volume 3, 2017.

### **Communications internationales**

4. **Bouarab Fatma-zohra**, Aknouche Hamid, Hamrani Abderrachid, « Optimization of tool geometry parameters for wood veneer cutting processes based on TLBO algorithm » *Congrès international de la mécanique Lille France*, 2017.
5. **H. Aknouche-**, A. Zerizer, C. Nouveau , F.Z. Bouarab W. Banouh, M.S Bouamerene « Apport des couches minces dures pour outils de coupe » . *CMEEE Marrakech Maroc* , 16 – 19 novembre 2015

### **Communications nationales**

6. **Bouarab Fatma zohra**, Aknouche Hamid, « Optimization of tool geometry parameters for rotary peeling veneer process based on PSO algorithms » *11eme journée de Mécanique*, Ecole Militaire Polytechnique Bordj El Bahri, 2018
7. **Bouarab Fatma zohra**, Aknouche Hamid, « Optimization of tool geometry parameters for rotary peeling veneer cutting processes based on TLBO algorithm » *3rd International Symposium on Material and Sustainable Development*, Boumerdes, 2017.
8. **Bouarab Fatma zohra**, Aknouche Hamid, « On the modeling of rotary veneer machining process: state of the art » *6eme Séminaire National sur les Matériaux, Procédés et Environnement SNMPE*, Boumerdes, 2016.
9. **Bouarab Fatma zohra**, participation à projet Tempus Qesamed, « Sensibilisation à la qualité et à la métrologie », *Ecole national d'agronomie*, 2015.
10. **H. Aknouche** W. Banouh, H. Boulahya, F.Z. Bouarab , A. Zerizer, S. Kennouche « *Structure et propriétés mécaniques, tribologiques des films Al-Cr-N* » *CIMDD'2015* November 9th and 10th, 2015 *Université M'Hamed Bougara* Boumerdes