N° d'ordre …

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES

FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE

Département des Sciences de l'Environnement

Laboratoire de recherche d'écodéveloppement des espaces

THESE DE DOCTORAT

Présentée par : **Mr.Ouaar Djilali**

Filière :*Sciences de l'environnement*

Spécialité:*Gestion,valorisation des ressources naturelles et développement durable*

Intitulé

Valorisation multifonctionnelle du bois d'une cupressacée de l'ouest algérien : cas de *Juniperus oxycedrus* L

Soutenue le : 21 /06 /2023

Devant l'honorable jury composé de :

President de jury : Mme Toumi –Benali Fawzia……..Professeur ,UDL/ SBA

Examinateur :Mr Kerfouf Ahmed ……..…….....Professeur,UDL/SBA

Examinateur : Mr Hachem Kadda.....Professeur,UMT/ Saïda

Promoteur : Mme Megherbi-Benali-Aicha…….Professeur, UDL/SBA

Co-Promoteur :Mr GERARD Jean……Chargé de recherche,CIRAD de Montpellier

Année universitaire 2022-2023

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu tout puissant de m'avoir donné les ressources morales, physiques et intellectuelles pour terminer ce travail.

Je voudrais exprimer mes sincères remerciements à **Madame Megherbi Benali Aicha**, directrice de ma thèse, Professeur à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, directrice du laboratoire d'écodéveloppement des espaces, Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbès, pour la confiance, l'aide, les conseils, et les critiques qu'elle m'a donnés au cours de ces années de ce travail. J'ai apprécié sa disponibilité et son intérêt au cours d'élaboration de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également à **Monsieur GERARD Jean**, co-directeur de ma thèse, chargé de recherches, responsable de l'unité de recherche production et transformation des bois tropicaux et méditerranéens du CIRAD, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire, sa supervision, ses encouragements ,ses conseils et commentaires pratiques, son appui et son aide pour effectuer ce travail. Je garde un excellent souvenir de mon passage dans son laboratoire et il m'a permis aussi de rencontrer de nombreuses personnes dans le domaine de recherche sciences du bois.

Je tiens à remercier tous les membres de l'Unité de Recherche BioWooEB du CIRAD pour leur gentillesse et contribution lors de l'exécution de mes essais.

J'exprime mes plus vifs remerciements à **Madame Toumi –Benali Fawzia**, Professeur à l'Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbés pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de cette thèse.

Je tiens également à remercier **Monsieur Kerfouf Ahmed**, Professeur à l'Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbés, **Monsieur Hachem Kadda**, Professeur à l'Université Moulay Tahar de Saïda, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je voudrais ici en particulier remercier **M. SENECAL Gaël**, responsable des analyses – CIRAD, US Analyses (analyses des eaux, sols et végétaux) pour les analyses minéralogiques des cendres.

Mes remerciements s'adressent aussi à **Madame Benadem Wassila**, ingénieur à l'institut national de recherche agronomique de Sidi Bel Abbés, pour m'avoir aidé à la réalisation des analyses des sols.

Je tiens à remercier aussi **M. Babali Brahim**, Maitre de conférences ‘A’ à l’université de Tlemcen pour l’identification botanique de cette espèce.

Mes remerciements vont aussi à tous les membres de l’unité de recherche amélioration génétique et adaptation des plantes méditerranéennes et tropicales (UMR AGAP) de Montpellier pour leur accueil et leur gentillesse au cours de mon stage sur le dosage des macromolécules des bois.

Je voudrais remercier tous les membres de l’unité d’Amélioration Génétique et Physiologie Forestières au sein de l’INRA Val de Loire d’Orléans pour leur aide dans les analyses chimiques.

Je tiens également à adresser mes remerciements au personnel de la conservation des forêts de Moulay Slissen pour leur disponibilité et leur aide lors de mes expérimentations.

Je remercie également le ministère de l’Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique d’Algérie, l’Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbès.

J’adresse aussi mes sincères remerciements à la direction de la recherche et de la stratégie de CIRAD qui a financé mon séjour sous forme de bourse de 4 mois.

Mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui m’ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Enfin, je ne pourrais terminer sans dire un grand merci à **ma mère**, **mon père** et **mes frères** pour leurs encouragements et leur soutien durant mes études.

Sommaire

Remerciements

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Résumé

ملخص

Abstract

Production scientifique

Introduction générale……...1

Première partie : Synthèse bibliographique

Chapitre I

Aperçu sur le secteur forestier en Algérie et étude bibliographique sur l'espèce étudiée

I.1.Le secteur forestier en Algérie…….... …4

I.1.1.Présentation de la forêt algérienne……..... …4

I.1.2.Principales caractéristiques de la forêt algérienne……..... …5

I.1.3. Superficie des principales essences forestières…… …6

I.1.4.Facteurs de dégradation de la forêt algérienne…… …6

I.1.4.1.Incendies…… …7

I.1.4.2. Surpâturage…….. …7

I.1.4.3.Défrichement…… …8

I.1.4.4.Les attaques parasitaires…….....…9

I.1.5.La stratégie actuelle de développement forestier…….. …9

I.1.6.Production forestière en Algérie…….. ..10

I.1.6.1.Production des forêts aménagées…….. ..10

I.1.6.2.Production des forêts non aménagées……..... ..11

I.1.7.Débouchés des produits forestiers locaux……..... ..11

I.2.Présentation de l'espèce *Juniperus oxycedrus* L……....11

I.2.1.Le genre *Juniperus* L……..... ..11

I.2.1.1. Description et répartition……. ..11

I.2.1.2.Germination……..13

I.2.1.3.Intérêts et usages……..... ..13

I.2.2.L'espèce *Juniperus oxycedrus*…….. ..14
I.2.2.1.Historique de l'espèce……..14
I.2.2.2.Dénominations vernaculaires……..... ..14
I.2.2.3. Classification botanique……..15
I.2.2.4.Caractères botaniques de l'espèce……....15
I.2.2.4.1. Feuilles……... ..16
I.2.2.4.2.Fleur et floraison……..... ..16
I.2.2.4.3. Fruit……..17
I.2.2.4.4.Bois…… ..17
I.2.2.5.Caractéristiques écologiques……...17

Chapitre II

Revue bibliographique sur le matériau bois

II.1.Introduction…….. 18
II.2.Plan ligneux du bois……. 18
II.3.Structure anatomique du bois……..... 19
II.3.1.Anatomie du bois à l'échelle macroscopique…….. 19
II.3.1.1.Duramen…… 19
II.3.1.2.Aubier…… 19
II.3.1.3.Ecorce…… 19
II.3.1.4.Cambium…… 20
II.3.2. Anatomie du bois à l'échelle microscopique……... 20
II.4.Composition chimique du bois…… 21
II.4.1.Les substances macromoléculaires……... 22
II.4.1.1.La cellulose…… 22
II.4.1.2. Les hémicelluloses…… 22
II.4.1.3.La lignine……... 23
II.4.2.Les extractibles…… 24
II.4.3.Les substances minérales……..... 24
II.5.Facteurs influençant les proportions de bois d'aubier et de duramen……. 25
II.6.Equilibre hygroscopique……..... 25
II.6.1.L'eau dans le bois…….. 25
II.6.2.Mesure du taux d'humidité……... 26
II.7.Propriétés physiques et mécaniques…… 26

II.7.1.La masse volumique……. 26
II.7.2.Point de saturation des fibres (PSF)…….. 27
II.7.3.Retraits du bois……. 27
II.7.4. Module d'élasticité longitudinal (Module de Young)……. 28
II.7.5.Contrainte de rupture en compression……..... 29
II.8.Durabilité naturelle du bois……. 30
II.8.1.Agents de détérioration……. 31
II.8.1.1.Les champignons lignivores……..... 31
II.8.1.1.1.La pourriture brune……. 31
II.8.1.1.2.La pourriture molle……. 32
II.8.1.1.3.La pourriture blanche…….. 32
II.8.1.2.Les champignons lignicoles……..... 33
II.8.1.2.1.Les moisissures……... 33
II.8.1.2.2.Les champignons de bleuissement…….. 34
II.8.1.2.3.Les échauffures……... 34
II.8.1.3.Les bactéries……..... 34
II.8.1.4.Les insectes xylophages……. 34
II.8.1.4.1.Les insectes de bois frais…… 34
II.8.1.4.2.Les insectes de bois sec……..... 34
II.8.1.5.Térébrants marins……..... 35
II.8.2.Classes de durabilité naturelle……..... 35
II.8.2.1.Durabilité vis-à-vis des champignons lignivores……..... 36
II.8.2.2.Durabilité vis-à-vis des termites…… 36

Deuxième partie : Étude expérimentale

Chapitre III

Matériel et méthodes

III.1. Objectif des recherches……. 37
III.2.Origine du matériel végétal…… 37
III.3. Caractéristiques des sites de prélèvement……..... 41
III.3.1.Station de Moulay Slissen……... 42
III.3.2.Station de Medroussa…….. 42
III.4.Les critères de sélection des arbres…… 43
III.5.Age du bois et largeur moyenne des cernes……... 44

III.6.Mesure des proportions d'aubier…… 45
III.7.Préparation des éprouvettes……... 45
III.8.Evaluation de la durabilité naturelle et de la composition en extractibles……..... 47
III.8.1.Extraction et caractérisation des fractions extractibles……... 48
III.8.2.Extraction et dosage des polyphénols totaux…….. 49
III.8.2.1.Extraction des polyphénols totaux……... 49
III.8.2.2.Dosage des polyphénols totaux…… 50
III.8.3.Durabilité naturelle vis-à-vis des champignons et des termites…….. 51
III.8.3.1.Durabilité naturelle vis-à-vis des champignons……... 51
III.8.3.2.Durabilité naturelle vis-à-vis des termites……... 54
III.9.Dosages des macromolécules……..... 55
III.9.1.Dosage des extractibles totaux…… 55
III.9.2.Dosage de la lignine Klason et de la lignine acide-soluble……..... 56
III.9.3. Dosage de l'holocellulose…….. 57
III.9.3.1. Dosage de l'α-cellulose……... 58
III.10.Analyse minéralogique des cendres……..... 58
III.10.1.Principe……. 58
III.10.2.Mode opératoire……..... 58
III.11.Propriétés physiques et mécaniques……. 60
III.11.1.Retraits transverses et point de saturation des fibres (PSF)…….. 60
III.11.2.Détermination du module d'élasticité longitudinal par méthode vibratoire……. 64
(méthode BING®)
III.11.2.1. Méthode Bing©……. 64
III.11.2.2 Mode opératoire……. 64
III.11.3. Essai de rupture en compression axiale……..... 66
III.12.Méthode d'analyse statistique des données……. 68

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Variation de la largeur moyenne des cernes……. 69
IV.1.1 Résultats…….. 69
IV.1.2. Discussion…….. 70
IV.2.Proportion d'aubier……..... 70
IV.2.1. Résultats……. 70

IV.2.2. Discussion…….. 71
IV.3. Quantification et caractérisation des extractibles……. 72
IV.3.1. Taux d'extractibles…… 72
IV.3.2. Composition chimiques des fractions extractibles…… 73
IV.3.2.1. Extractibles à l'eau : résultats……. 73
IV.3.2.1. Extractibles au toluène-éthanol : résultats…….. 74
IV.3.2.2. Commentaires sur les compositions chimiques en fractions extractibles……... 76
IV.4. Dosage des polyphénols totaux…… 77
IV.4.1. Résultats……. 77
IV.4.2. Discussions…… 77
IV.5. Durabilité naturelle vis-à-vis des champignons et des termites……..... 79
IV.5.1. Durabilité naturelle vis-à-vis des champignons……. 79
IV.5.1.1. Résultats……. 79
IV.5.1.2. Discussions……. 81
IV.5.2. Durabilité naturelle vis-à-vis des termites……. 83
IV.5.2.1. Résultats……. 83
IV.5.2.2. Discussions……. 85
IV.6. Variabilité des macromolécules du bois……... 85
IV.6.1. Résultats…… 85
IV.6.2. Discussions…… 86
IV.7. Etude comparative de la composition minérale des cendres…… 88
IV.7.1. Résultats…… 88
IV.7.2. Discussion……. 89
IV.8. Retraits transverses et point de saturation des fibres……..... 90
IV.8.1. Résultats…… 90
IV.8.2. Discussions…… 92
IV.9. Variabilité de la masse volumique……..... 93
IV.9.1. Résultats…… 93
IV.9.2. Discussions…… 94
IV.10. Variabilité du module d'élasticité longitudinal…….. 96
IV.10.1. Résultats…….. 96
IV.10.2. Corrélation entre la densité et le module d'élasticité longitudinal…….. 97
IV.10.3. Discussions…….. 97

IV.11.Variabilité de la contrainte de rupture en compression axiale……. 99
IV.11.1. Résultats 99
IV.11.2. Corrélation de la densité avec la contrainte de rupture en compression axiale…... 99
IV.11.3. Discussions…….. 100

Conclusion générale et perspective……102
Références bibliographiques……... 106
Annexe……...133

Liste des tableaux

Numéro	Titre	Page
Tableau 1	Principales essences forestières et leurs superficies (ha) en Algérie	6
Tableau 2	Répartition moyenne (% en masse) des différents composés dans le bois des feuillus et des résineux (Sjöström 1993)	21
Tableau 3	Classes de masse volumique d'après la norme NF B 51-005 (sept.1985)	26
Tableau 4	Classes de Point de Saturation des Fibres (= PSF) (Gérard *et al.* 1998)	27
Tableau 5	Classes de retraits linéaires transverses d'après la norme NF B 51 006 (septembre 1985)	28
Tableau 6	Classes de module d'élasticité longitudinale d'après la norme NF B 51-008 (1987)	29
Tableau 7	Classes de contrainte en compression axiale d'après la norme NF B 51-007 (septembre 1987)	29
Tableau 8	Classes de durabilité (DC) du bois vis-à-vis des attaques fongiques (Basidiomycètes) selon XP CEN / TS 15083–1(2006)	36
Tableau 9	Classes de durabilité du bois vis-à-vis des attaques de termites d'après les évaluations de l'EN 117(2013)	36
Tableau 10	Données dendrométriques des arbres	44
Tableau 11	Longueurs d'onde (en nm) utilisées pour le dosage des éléments par ICP-AES	60
Tableau12	Taux d'extractibles du bois de duramen de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances étudiées	73
Tableau13	Composition chimique des extraits du bois de duramen de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* des deux provenances étudiées	75
Tableau 14	Taux de cendres et teneurs en éléments minéraux (Ca, K, Mg, Na, Fe, P) du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances étudiées	89

Liste des figures

Numéro	Titre	Page
Figure 1	Répartition des forêts algériennes ((D.G.F. 2016)	04
Figure 2	Carte de répartition des principales espèces en Algérie (INRF, 2012)	05
Figure 3	Forêt de Medroussa (wilaya de Tiaret) incendiée en 2015 (Brahim, 2017)	07
Figure 4	Défrichement dans la forêt de Medroussa (wilaya de Tiaret) (Brahim, 2017)	08
Figure 5	Distribution de la section Caryocedrus et de la section *Juniperus (*section *Oxycedrus*) (Adams, 2014)	12
Figure 6	Distribution de *Juniperus* sect. *Sabina* (Adams, 2014)	12
Figure 7	Aire naturelle de répartition des espèces du genre *Juniperus* en Algérie (Hafsi, 2018)	13
Figure 8	Aspect général d'un arbre de l'espèce *Juniperus oxycedrus* dans la station de Moulay Slissen (photo Ouaar, 2018).	15
Figure 9	Feuille de *Juniperus oxycedrus* (photo Ouaar, 2018).	16
Figure 10	Rameaux fleuris d'un pied mâle de genévrier cade (Reille, 2014).	16
Figure 11	Plans ligneux : plan transversal ; plan tangentiel ; plan radial (Bourreau, 2011).	19
Figure 12	Structure générale du tronc d'un arbre (Natterer *et al*., 2000).	20
Figure 13	Vue schématique du plan ligneux d'une essence résineuse (à gauche) et d'une essence feuillue (à droite) (Bouet et Humbert, 2003).	21
Figure 14	Structure de la cellulose (Stevanovic, 2014).	22
Figure 15	Structure chimique partielle de glucomannanes des résineux (Tame *et al*., 2007).	23
Figure 16	Monomères précurseurs des lignines (Fengel et Wegener, 1989).	24
Figure 17	L'eau libre et l'eau liée dans le bois (Guibal *et al*., 2015).	27
Figure 18	Relation entre contrainte de rupture en compression et densité (Cirad, 2021).	30
Figure 19	La mérule : aspect du bois dégradé en « petits cubes » (Chapelet *et al*., 1991).	32
Figure 20	Observation macroscopique d'un bois altéré par la pourriture molle (Colling, 2002).	32
Figure 21	Attaque du bois par la pourriture fibreuse (Colling, 2002).	33
Figure 22	Photographies de termites ; de gauche à droite : ouvrier, soldat (Chapelet *et al*., 1991).	35

Figure 23	Localisation des deux régions de prélèvement des échantillons de *Juniperus oxycedrus* dans le Nord-Ouest de l'Algérie (Boudouaya *et al.*, 2015).	37
Figure 24	Carte de végétation des formations forestières de la wilaya de Sidi Bel Abbès (IFN, 2006).	39
Figure 25	Carte de végétation des formations forestières de la wilaya de Tiaret (CFT, 2018).	41
Figure 26	Type de sol profond dans la station de Moulay Slissen (photo Ouaar, 2018)	42
Figure 27	Type de sol caillouteux dans la station de Medroussa (photo Ouaar, 2018).	43
Figure 28	Comptage manuel des cernes à la loupe binoculaire (photo Ouaar, 2018).	44
Figure 29	Tranche de Genévrier oxycèdre pour la détermination du pourcentage d'aubier (photo Ouaar, 2018).	45
Figure 30	Ebauches d'éprouvettes (photo Ouaar, 2019).	46
Figure 31	Schémas synoptique de découpage des éprouvettes des essais physiques et mécaniques.	47
Figure 32	Essai d'extraction des extractibles (photo Ouaar, 2018).	49
Figure 33	Exposition des éprouvettes de bois aux champignons (a) et incubation des éprouvettes dans une enceinte climatique pendant 8 semaines(b) (photo Thévenon, 2019).	52
Figure 34	Eprouvettes de bois après 8 semaines d'incubation dans une enceinte climatique (photo Thévenon, 2019).	52
Figure 35	Nettoyage des éprouvettes avec une brosse douce (photo Thévenon, 2019).	53
Figure 36	Pesée des éprouvettes après exposition fongique (photo Thévenon, 2019).	53
Figure 37	Exposition des éprouvettes de bois aux termites (photo Thévenon, 2019).	54
Figure 38	Boîte de Pétri contenant un échantillon témoin (photo Thévenon, 2019).	55
Figure 39	Schémas de dosage de la lignine Klason et de la lignine acide-soluble.	57
Figure 40	Eprouvettes de mesures des retraits linéaires et du PSF (photo Ouaar, 2019).	60

Figure 41	Comparateur utilisé pour la mesure des dimensions suivant les directions R et T ; sur la photo, mesure suivant la direction R (photo Ouaar, 2019).	62
Figure 42	Exemple de détermination du PSF de deux éprouvettes de *Juniperus oxycedrus* par calcul de l'ordonnée à l'origine des courbes [Taux d'humidité] = f [Variations surfaciques]	64
Figure 43	Dispositif de mesure Bing (photo Ouaar, 2019).	65
Figure 44	Exemple d'un signal analytique associé aux modes de fréquence pour un échantillon de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus*.	66
Figure 45	Essai de compression axiale (photo Ouaar, 2019).	67
Figure 46	Exemple de courbe force-déplacement pour un échantillon de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus*.	68
Figure 47	Interactions entre âge (a) et largeur moyenne des cernes (b) des arbres de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* des deux provenances.	69
Figure 48	Interactions entre âge (a) et proportion d'aubier (b) des arbres de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* des deux provenances.	71
Figure 49	Extraits du duramen des bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* (a) extraits au toluène-éthanol ;(b) extraits à l'eau (photo Ouaar, 2018).	73
Figure 50	Chromatogrammes issus des analyses GC-MS des extraits du duramen des bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* : (a) extraits à l'eau du bois de Sidi Bel Abbès ; (b) extraits à l'eau du bois de Tiaret ; (c) extraits au mélange toluène/éthanol du bois de Sidi Bel Abbès ; (d) extraits au mélange toluène/éthanol du bois de Tiaret.	74
Figure 51	Comparaison des teneurs en polyphénols totaux par extraction au méthanol et à l'acétone pour les deux provenances.	77
Figure 52	Dégâts de *Coniophora puteana* sur les éprouvettes d'aubier de Pin sylvestre et Hêtre (photo Thévenon, 2019).	79
Figure 53	Eprouvettes de bois des deux provenances après exposition à *Coniophora puteana ;* (a) bois de Sidi Bel Abbès ; (b) bois de Tiaret (photo Thévenon, 2019).	80
Figure 54	Comparaison des pertes de masse (en %) dues aux deux champignons pour les échantillons des deux provenances.	81
Figure 55	Etat des éprouvettes de Pin sylvestre après exposition aux termites (photo Thévenon, 2019).	84

Figure 56	Etat des éprouvettes après exposition aux termites : (a) bois de Sidi Bel Abbès ; (b) bois de Tiaret (photo Thévenon, 2019).	84
Figure 57	Echantillon 7 T avec cotation visuelle 1(la trace ponctuelle révèle une tentative d'attaque) (photo Thévenon, 2019).	84
Figure 58	Comparaison des teneurs en extractibles totaux, lignine totale (Klason et acide-soluble), α-cellulose et hémicellulose du bois de duramen de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances.	86
Figure 59	Distributions du retrait radial total (a), du retrait tangentiel total (b), et du point de saturation des fibres(c) du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances.	91
Figure 60	Distribution de la masse volumique de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances étudiées.	94
Figure 61	Distribution du module d'élasticité longitudinal de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances.	96
Figure 62	Relation entre la densité et le module d'élasticité longitudinal des deux provenances Sidi Bel Abbès(S) et Tiaret (T)	97
Figure 63	Distribution des contraintes de rupture en compression axiale de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances.	99
Figure 64	Relations entre la densité et la contrainte de rupture en compression axiale pour les deux provenances Sidi Bel Abbès(S) et Tiaret (T).	100

Liste des abréviations

AG : acide gallique

BNEDER : Bureau National d'Etudes de Développement Rural

CFS : Conservation des Forêts de Sidi Bel Abbès

CFT : Conservation des Forêts de Tiaret

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.

cos: cosinus

DGF : Direction générale des forêts

EAG : équivalent d'acide gallique

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'agriculture et l'alimentation

HR : Humidité relative.

ICP-AES : spectrométrie d'émission atomique – plasma à couplage inductif

IFN : Inventaire Forestier national

INRA : Institut National des Recherches Agronomiques.

INRF: Institut national de recherche forestière

L, R, T : Longitudinal-radial-tangentiel.

MATE : Ministère de l'agriculture du territoire et de l'environnement

MPa : mégapascal, 1 MPa = 1 N/mm^2

MS : matière sèche

PM : perte de masse.

sin: sinus

v/v : volume par volume

Résumé

Notre travail de recherche rentre dans le cadre de la connaissance de la qualité du bois de *Juniperus oxycedrus*, dans une perspective de valorisation de cette espèce pour des applications à haute valeur ajoutée. Les bois de *Juniperus oxycedrus* étudiés sont issus de deux provenances du Nord-Ouest algérien aux conditions climatiques et édaphiques différentes (régions de Sidi Bel Abbès et de Tiaret). Dans cette optique, nous avons déterminé l'influence des facteurs stationnels sur les caractéristiques dendrométriques, physiques, mécaniques, chimiques ainsi que la durabilité naturelle du bois vis-à-vis de champignons basidiomycètes et des termites.

Les propriétés dendrométriques déterminées sont la largeur moyenne des cernes et les proportions d'aubier. Les résultats ont montré que les arbres de la provenance de Sidi Bel Abbès présentent des largeurs moyennes de cernes supérieures à celles de la provenance de Tiaret en relation avec des conditions de croissance plus favorables. Cette tendance est l'inverse de celle observée pour les proportions d'aubier. Ces résultats ont montré également que l'âge affecte négativement la largeur moyenne des cernes et la proportion d'aubier des arbres des deux provenances.

Les extractibles et les polyphénols totaux du duramen ont été quantifiés et caractérisés. La durabilité naturelle du duramen a été évaluée vis-à-vis de deux champignons de pourriture brune (*Rhodonia placenta* et *Coniophora puteana*) et de termites (*Reticulitermes flavipes*). Les taux d'extractibles les plus élevés sont ceux obtenus pour les bois de Sidi Bel Abbès. Pour les deux provenances, le bois de *Juniperus oxycedrus* est très durable vis-à-vis des champignons de pourriture. Il est aussi répulsif et résistant aux attaques de termites. Une analyse ciblée des relations entre la composition chimique et la durabilité naturelle permettra de mettre en évidence la nature du ou des constituants responsables de la durabilité naturelle du bois de *Juniperus oxycedrus* tant vis-à-vis des champignons lignivores que des termites. Les résultats obtenus pour le dosage des macromolécules de duramen montrent que la teneur en α-cellulose des bois provenant de Tiaret est très significativement supérieure à celle de Sidi Bel Abbès. Par contre, aucune différence significative n'a été observée entre les deux provenances pour la teneur en lignine totale et en hémicelluloses. L'analyse de la composition minérale (calcium, phosphore, potassium, magnésium, sodium, fer, silice) et le taux de cendres des bois n'a révélé aucune différence significative entre les deux provenances.

L'évaluation des caractéristiques physiques (masse volumique, retrait radial total, retrait tangentiel total et point de saturation des fibres) et mécaniques (module d'élasticité longitudinal et contrainte de rupture en compression axiale) a mis en évidence des tendances variables en fonction de la provenance des bois, mais cette variabilité reste cependant limitée. Les résultats obtenus montrent que pour les deux provenances, le bois de *Juniperus oxycedrus* est mi-lourd, avec un retrait radial total moyen, un retrait tangentiel total faible, un point de saturation faible, un module d'élasticité longitudinal faible et une résistance à la rupture faible. L'étude des relations entre la densité et les propriétés mécaniques du bois des deux provenances ont mis en évidence une corrélation positive significative entre la densité et la contrainte de rupture en compression axiale alors une corrélation non significative entre la densité et le module d'élasticité longitudinal. Les résultats de l'étude montrent que le bois de *Juniperus oxycedrus* pourrait être davantage utilisé pour une large gamme d'emplois, sous forme de matériau, mais aussi pour des applications à vocation cosmétique, pharmacologique et médicinale.

Mots clé : valorisation, bois, *Juniperus oxycedrus*, Nord-Ouest algérien, corrélation.

ملخص:

يندرج عملنا البحثي في إطار معرفة جودة خشب العرعار الشربيني ضمن منظور تقييمي لهذا النوع من أجل تطبيقات إضافية ذات قيمة عالية. أخشاب العرعار الشربيني التي تمت دراستها تنحدر من مصدرين في شمال غرب الجزائر مختلفين من حيث الظروف المناخية و التربة المختلفة (منطقة سيدي بلعباس ومنطقة تيارت). وعلى هذا الأساس ، حددنا تأثير عوامل الموقع على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية وقياسات الشجرة وكذا المتانة الطبيعية للخشب إزاء الفطريات القاعدية والنمل الأبيض.

خصائص قياسات الشجرة المحددة هي متوسط عرض الحلقات ونسب الخشب الأبيض. أظهرت النتائج أن الأشجار من منطقة سيدي بلعباس لها متوسط عرض حلقات أكبر من تلك الموجودة في منطقة تيارت وهذا راجع إلى ظروف النمو الملائمة. هذا المنحى هو عكس ذلك الذي لوحظ في نسب الخشب الأبيض. أظهرت هذه النتائج أيضًا أن العمر يؤثر سلبًا على متوسط عرض الحلقة ونسبة الخشب الأبيض بالنسبة لكلا المصدرين .

مستخلصات ومتعدد الفينول الكلية لخشب القلب تم تحديدها كمًا ووصفا .تم تقييم المتانة الطبيعية لخشب القلب ضد نوعين من فطريات العفن البني (*Rhodonia placenta* و *Coniophora puteana*) والنمل الأبيض (*Reticulitermes flavipes*).أعلى معدلات للمستخرجات هي تلك التي تم الحصول عليها من خشب منطقة سيدي بلعباس بالنسبة لكلا المصدرين ، إن خشب العرعار الشربيني متين للغاية ضد الفطريات المتعفنة كما أنه طارد ومقاوم لهجمات النمل الأبيض.إن التحليل المستهدف للعلاقة بين التركيب الكيميائي والمتانة الطبيعية سيجعل من الممكن إبراز طبيعة المكون أو المكونات المسؤولة عن المتانة الطبيعية لخشب العرعار الشربيني فيما يتعلق بفطريات التعفن والنمل الأبيض.أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من التحليل لخشب القلب أن محتوى -α- سلولوز في الخشب الذي مصدره من منطقة تيارت أعلى بكثير منه من الذي مصدره من منطقة سيدي بلعباس.من ناحية أخرى ، لم يلاحظ أي فرق ملحوظ بين المصدرين لمحتوى اللجنين الكلي والهيميسلولوز.أظهر تحليل التركيب المعدني (كالسيوم ، فوسفور ، بوتاسيوم ، مغنيسيوم ، صوديوم ، حديد ، سيليس) ومحتوى رماد الخشب عدم وجود فرق ملحوظ بين المصدرين.

إن تقييم الخصائص الفيزيائية (الكتلة الحجمية ، الإنكماش الشعاعي الكلي ، الإنكماش العرضي الكلي ونقطة تشبع الألياف) والخصائص الميكانيكية (معامل المرونة الطولي و عتبة الإنكسار في الضغط المحوري) كشف عن تباينات متغيرة وفقًا لمصدر الخشب ، ولكن هذا التباين يبقى محدودا.أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنه بالنسبة لكل من المصدرين ، فإن خشب العرعار الشربيني متوسط الثقل، مع إنكماش شعاعي كلي متوسط، إنكماش عرضي كلي منخفض ، ونقطة تشبع منخفضة،معامل مرونة طولي منخفض وقوة كسر منخفضة .أظهرت دراسة العلاقة بين الكثافة والخواص الميكانيكية للخشب من كلا

المصدرين وجود علاقة ارتباط موجبة بين الكثافة و عتبة الإنكسار في الضغط المحوري ، بينما لا يوجد ارتباط بين الكثافة والمعامل الطولي للمرونة. تظهر نتائج الدراسة أنه يمكن استخدام خشب العرعار الشربيني في مجموعة واسعة من الاستخدامات ، في شكل مواد ، ولكن أيضًا للتطبيقات التجميلية و الصيدلانية والطبية.

الكلمات المفتاح: التقييم ، الخشب ، العرعار الشربيني ، شمال غرب الجزائر ، الارتباط.

Abstract

Our research falls within the framework of knowledge of the quality of Juniperus oxycedrus wood, with a view to promoting this species for high value-added applications. The woods of *Juniperus oxycedrus* studied come from two origins in northwestern Algeria with different climatic and edaphic conditions (regions of Sidi Bel Abbès and Tiaret).With this in mind, we have determined the influence of stationary factors on the dendrometric, physical, mechanical and chemical characteristics as well as the natural durability of wood against basidiomycete fungi and termites.

The dendrometric properties determined are the average width of the rings and the proportions of sapwood. The results showed that the trees from the Sidi Bel Abbès provenance have mean ring widths greater than those from the Tiaret provenance in relation to more favorable growth conditions. This trend is the opposite of that observed for sapwood proportions. These results also showed that age negatively affects mean ring width and proportion of sapwood in trees from both provenances.

Total heartwood extractives and polyphenols were quantified and characterized. The natural durability of heartwood was assessed against two brown rot fungi (*Rhodonia placenta* and *Coniophora puteana*) and termites (*Reticulitermes flavipes*). The highest extractive rates are those obtained for the woods of Sidi Bel Abbès. For both provenances, the wood of *Juniperus oxycedrus* is highly resistant to rotting fungi. It is also repellent and resistant to termite attacks. A targeted analysis of the relationships between the chemical composition and the natural durability will make it possible to highlight the nature of the constituent(s) responsible for the natural durability of the wood of *Juniperus oxycedrus* both with respect to lignivorous fungi and termites. The results obtained for the assay of heartwood macromolecules show that the α-cellulose content of wood from Tiaret is very significantly higher than that of Sidi Bel Abbès. On the other hand, no significant difference was observed between the two sources for the content of total lignin and hemicelluloses. Analysis of the mineral composition (calcium, phosphorus, potassium, magnesium, sodium, iron, silica) and wood ash content revealed no significant difference between the two provenances.

The evaluation of the physical characteristics (density, total radial shrinkage, total tangential shrinkage and fiber saturation point) and mechanical characteristics (longitudinal modulus of elasticity and breaking stress in axial compression) highlighted variable tendencies according to the origin of the wood, but this variability remains limited. The results obtained show that for both provenances, the wood of *Juniperus oxycedrus* is medium-heavy, with an average

total radial shrinkage, a low total tangential shrinkage, a low saturation point, a low longitudinal modulus of elasticity and resistance to the weak break. The study of the relationship between the density and the mechanical properties of wood from the two sources has shown a significant positive correlation between the density and the breaking stress in axial compression, while a non-significant correlation between the density and the modulus of longitudinal elasticity. The results of the study show that the wood of *Juniperus oxycedrus* could be further used for a wide range of uses, in the form of material, but also for cosmetic, pharmacological and medicinal applications.
Key words: valuation, wood, *Juniperus oxycedrus*, northwestern Algeria, correlation.

Production scientifique

Publications internationales

OUAAR Djilali, MEGHERBI BENALI Aicha, TOUMI BENALI Fawzia, THEVENON Marie-France, CANDELIER Kévin, PIGNOLET Luc, GERARD Jean. . Durabilité naturelle et composition en extractibles du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* du Nord – Ouest de l'Algérie. Bois et Forêts des Tropiques, 350 : 57-69.

Communications internationales

OUAAR Djilali, MEGHERBI - BENALI Aicha, LOTTE Sylvain, GERARD Jean, TOUMI - BENALI Fawzia. Activité antibactérienne de l'huile essentielle extraite de la sciure de bois de *Juniperus oxycedrus subsp*. *oxycedrus*. 7èmes journées du GDR 3544 « Sciences du bois », 20-22 novembre 2018, Cluny (France).

OUAAR Djilali, MEGHERBI BENALI Aicha, TOUMI BENALI Fawzia, THEVENON Marie-France, CANDELIER Kévin, PIGNOLET Luc, GERARD Jean. Influence des facteurs stationnels sur la durabilité naturelle du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus*. International Seminar on Biodiversity, Valorization and Conservation of Urban and Forest Ecosystems: (In support of sustainable development), 28-29 avril 2021, Université de M'sila.

OUAAR Djilali, MEGHERBI BENALI Aicha, TOUMI BENALI Fawzia, THEVENON Marie-France, CANDELIER Kévin, GERARD Jean. Caractérisation des substances extractibles du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* .Conférence Internationale sur « Les Forêts Méditerranéennes : Etat des Lieux et Perspectives » 15-16 Mars 2022, Université de Khenchela.

Communications nationales

OUAAR Djilali, MEGHERBI BENALI Aicha, TOUMI BENALI Fawzia, THEVENON Marie-France, CANDELIER Kévin, GERARD Jean. L'effet de conditions de croissance sur le taux d'extractibles et la teneur en polyphénols totaux du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* Le 1er Séminaire National des Sciences Agronomiques : Recherches à Vision Economique en Sciences Agronomiques, 15-16 juin 2021, Université de M'sila.

OUAAR Djilali, MEGHERBI BENALI Aicha, TOUMI BENALI Fawzia, THEVENON Marie-France, CANDELIER, Kévin, PIGNOLET Luc, GERARD Jean. Résistance aux termites du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus.* 5ème Journée Scientifique sur

valorisation des Phytoressources, Eau et Environnement, 11 décembre 2021, Université de Sidi Bel Abbès.

Introduction générale

Introduction générale

La forêt algérienne qui fait partie intégrante du bassin méditerranéen, se caractérise par une grande diversité ce qui facilite l'adaptation de multiples formations végétales. Elle se distingue par sa valeur écologique, sa richesse en espèces forestières et occupe les bioclimats les plus variables (Hafsi, 2018).Cependant, la production forestière algérienne est loin de satisfaire la demande nationale en bois. En effet, les forêts dites économiques ne couvrent que 1,2 million d'ha et leur production est en nette régression en raison du vieillissement des peuplements, de l'absence de plans d'aménagement et de systèmes d'exploitation (DGF, 2007). Il faut noter aussi que l'absence d'une politique forestière valorisante explique la mauvaise gestion du patrimoine forestier en Algérie. Ainsi, la croissance démographique associée à une demande en bois de plus en plus forte nécessite la production de bois de plantation pour répondre aux besoins de la population. Ainsi par exemple, le montant des importations de bois par l'Algérie en 2007 a atteint 300 millions de dollars (Tatar, 2012) et il ne fait que progresser depuis.

En effet, la valorisation des ressources locales présente le double avantage de générer de la valeur et de l'activité sur un territoire donné. Cependant, les potentialités et les perspectives de valorisation de ces ressources dépendent de la qualité de leur bois, sous-tendue par la qualité des arbres sur pied (rectitude, cylindricité, présence de défauts externes ou internes) (Derbal, 2016).

Parmi les espèces forestières présentes dans la forêt algérienne, le genévrier oxycèdre ou cade (*Juniperus oxycedrus*, famille des Cupressaceae) a la capacité de pouvoir se développer de manière très locale sous des bioclimats semi arides, en résistant à la sécheresse, en étant peu exigeant, et très plastique quant à la nature et la fertilité des sols. Klimko *et al*. (2007) ont subdivisé *Juniperus oxycedrus* en quatre sous-espèces : subsp. *oxycedrus*, subsp. *macrocarpa* (Sibth. & Sm.) Ball, subsp. *badia* (H. Gay) Debeaux, subsp. *transtagana* (Franco). Parmi ces quatre sous-espèces, *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* est l'espèce la plus abondante en Algérie (Chaouche *et al*., 2015). Durant ces quinze dernières années, plusieurs travaux de recherche ont été conduits sur *Juniperus oxycedrus*, notamment en Algérie. Ces études ont porté sur des sujets variés tels que les variations morphologiques des populations (Klimko *et al*., 2007 ; Hafsi *et al*., 2017) ou l'activité des composés phénoliques présents dans l'écorce des racines (Chaouche *et al*., 2015). Ces travaux sont cependant principalement axés sur l'obtention, la composition et l'activité biologique : (1) de l'huile de cade obtenue par distillation du bois, cette huile étant très utilisée en médecine vétérinaire, en dermatologie et

en médecine traditionnelle (Quézel et Gast, 1998 ; Loizzo *et al*., 2007 ; Julin, 2008 ; Abdellah *et al*., 2018 ; Al-Snafi, 2018) ; (2) des huiles essentielles issues des feuilles, des baies, des cônes ou des écorces (Marongiu *et al*., 2003 ; Dob *et al*., 2006 ; Medini *et al*., 2013 ; Hayta et Bagci, 2014 ; Al-Snafi, 2018).

Les études sur le bois de *Juniperus oxycedrus* ont donc essentiellement porté sur la composition et l'activité biologique des huiles essentielles alors que les connaissances sur son bois en tant que matériau sont parcellaires et peu documentées. En outre, ce bois est qualifié de résistant ou durable sans qu'aucune référence solide ne soit associée à cette constatation (Uçar et Balaban, 2002 ; Balaban *et al*., 2003 ; Julin, 2008).

La valorisation de cette espèce nécessite une connaissance approfondie des propriétés de son bois, ainsi que leurs variations en fonction des conditions écologiques du site. Les bois peuvent présenter des variations dans leurs propriétés et dans leurs performances pour des applications spécifiques en fonction de facteurs environnementaux et génétiques (Rocha *et al*., 2019). Ces propriétés peuvent être très variables en fonction de la répartition géographique des peuplements (Langbour *et al*., 2011). Cette variation de la qualité concerne l'ensemble des caractéristiques dendrométrique, chimiques, physico-mécaniques et de durabilité naturelle vis-à-vis des champignons et termites.

Le pourcentage du bois d'aubier est un caractère très important et un critère de choix et d'estimation de la qualité du bois. Il est donc nécessaire de comprendre la relation entre la croissance et la proportion du bois d'aubier afin de mieux valoriser le bois.

L'utilisation du bois dans une situation donnée est étroitement liée à sa durabilité naturelle. Cette caractéristique est généralement associée à la teneur et à la composition chimique des extractibles présents naturellement dans le bois (Taylor *et al*., 2006). D'autre part, l'étude des caractéristiques chimiques du bois permettra de comprendre ses propriétés physiques et mécaniques ainsi que la plupart des variations de la qualité du bois. En effet, la qualité du bois dépend de ses propriétés chimiques pour des utilisations finales spécifiques (teneur en cellulose, hémicelluloses lignine et les extractibles) (Zobel et van Buijtenen, 1989). Du fait de son origine biologique, le bois est un matériau hétérogène dont la qualité est déterminée en fonction de son adéquation à l'usage donné (Traoré, 2009).

Parmi les caractéristiques physiques, la masse volumique à 12 % d'humidité, les retraits transverses de séchage et le point de saturation des fibres sont des indicateurs majeurs de la qualité du bois et de sa stabilité après mise en œuvre (Guibal *et al.*, 2015).

Les deux propriétés mécaniques les plus couramment mesurées sont le module d'élasticité longitudinal et la contrainte de rupture en compression axiale, utilisés pour l'évaluation de la qualité du bois pour les emplois en structure (Green *et al*., 1999).

L'objectif général de ce travail est de déterminer l'influence des facteurs stationnels sur la qualité du bois de *Juniperus oxycedrus* en vue d'une meilleure valorisation.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- étudier les variations de la largeur moyenne des cernes et les proportions du bois d'aubier selon la provenance des bois et entre les arbres.
- caractériser et quantifier les fractions extractibles et les polyphénols totaux selon la provenance des bois.
- étudier la durabilité naturelle des deux provenances étudiées vis-à-vis de deux espèces de champignons de pourriture brune (*Rhodonia placenta* et *Coniophora puteana*) et d'une espèce de termites (*Reticulitermes flavipes*).
-quantifier les macromolécules du bois et étudier la composition minérale des cendres de deux provenances.
- étudier les caractéristiques physiques de deux provenances : masse volumique à 12 % d'humidité, retrait total de séchage (radial, tangentiel), et point de saturation des fibres.
- étudier les caractéristiques mécaniques de deux provenances : module d'élasticité longitudinal et contrainte de rupture en compression axiale.
- déterminer la relation entre la densité et les propriétés mécaniques étudiées.

Le travail présenté dans ce mémoire de thèse se repartit en deux grandes parties :

La première partie est dédiée à la synthèse bibliographique, organisée en 2 chapitres. Nous présentons dans le premier chapitre la situation de secteur forestier en Algérie et des connaissances sur l'espèce. Dans le deuxième chapitre, nous présentons des informations générales sur le matériau bois à travers la description de sa structure anatomique, sa composition chimique, sa durabilité naturelle vis-à-vis des champignons et termites, ses propriétés physiques et mécaniques.

La deuxième partie correspond à l'étude expérimentale que nous avons conduite et concerne le troisième et le quatrième chapitre. Dans le premier chapitre (matériel et méthodes), nous présentons dans un premier temps les caractéristiques des deux sites d'étude et les critères de sélection des arbres. Dans un second temps, nous présentons les différents matériels et méthodes utilisés dans cette étude. Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus et les discussions relatives à ces résultats. Enfin, une conclusion générale et une présentation des diverses perspectives de recherches à venir concluent ce travail.

Première partie
Synthèse bibliographique

Chapitre I
Aperçu sur le secteur forestier en Algérie et étude bibliographique de l'espèce étudiée

I.1. Le secteur forestier en Algérie

I.1.1. Présentation de la forêt algérienne

L'Algérie est le plus grand pays du continent africain avec une superficie de 2,382 millions km² dont 84 % est occupé par le Sahara. La partie Nord occupe 250 000 km² soit un peu plus de10 % de la superficie totale où les conditions climatiques sont favorables au développement des formations forestières. Cependant, le couvert forestier global est de 4,1 millions d'hectares qui ne représentent que 16 % du nord de l'Algérie ou 1,7 % de l'ensemble du territoire (Fosa, 2000). Il est constitué de plusieurs écosystèmes à base d'essences principales réparties entre 70 % de résineux et 30 % de feuillus (F.A.O., 2006). Le taux de boisement est de 18,8 % pour le nord de l'Algérie (Ghazi, 2009). Ce taux de boisement est évidemment insuffisant pour assurer l'équilibre physique et biologique du territoire. Les forêts représentent 41 % de la superficie forestières, 59 % sont occupés par les maquis (figure 1).

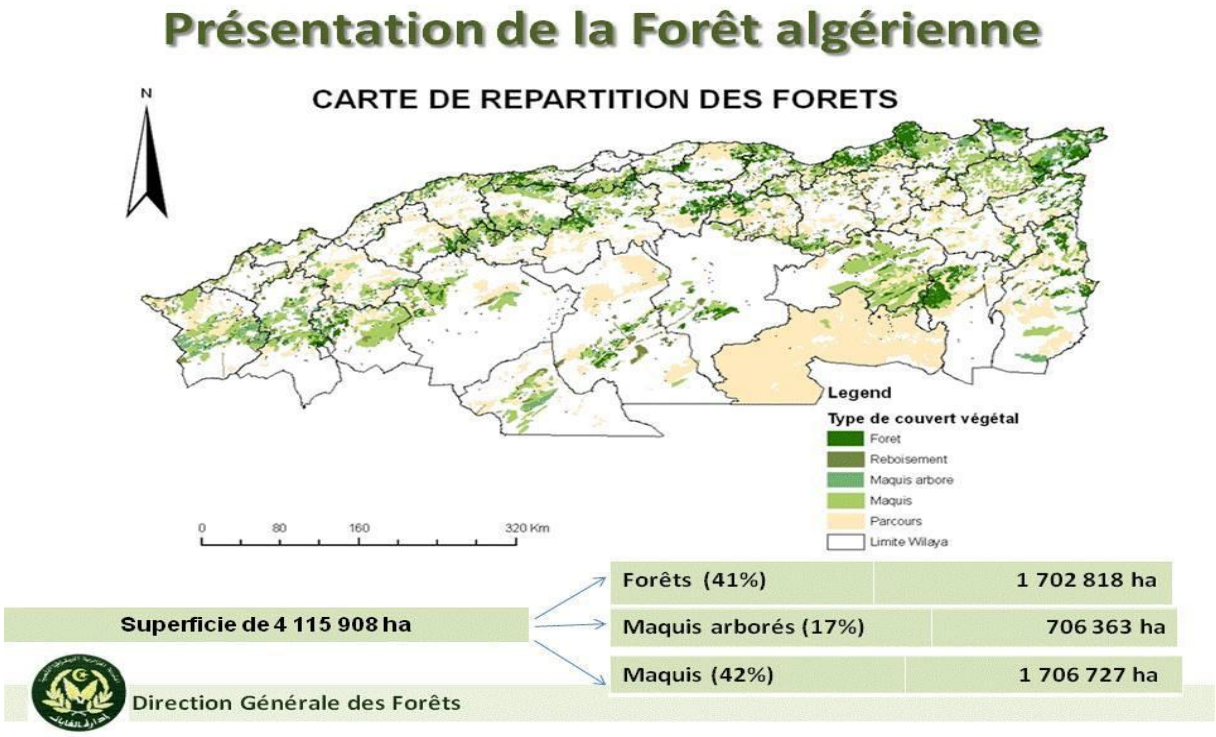


Figure 1. Répartition des forêts algériennes (DGF, 2016).

La forêt algérienne est constituée essentiellement par une variété d'essences étroitement liées au climat méditerranéen. Elle est hétérogène et inégalement répartie en fonction de la distribution des méso-climats, de l'orographie et de l'action anthropique (Benderradji *et al.*, 2006) (figure 2).On peut distinguer trois principales zones bien différentes entre elles :

- le littoral et les chaînes côtières et sub-côtières de l'Est du pays (massifs de Petite Kabylie, de l'Edough, d'El Tarf, Guelma, Souk Ahras). Ces régions sont bien arrosées, elles sont

couvertes des forêts les plus denses et les plus belles où le chêne liège et le chêne zéen constituent des massifs importants.

-les reliefs de l'atlas Tellien. Ces régions moins arrosées présentent les grands massifs de pin d'Alep et de chêne vert (Monts de Tlemcen, Sidi Bel Abbès, Saida, Tiaret…) ainsi que de cèdre de l'Atlas sur les plus hauts sommets des Babors, de l'Atlas blidéen, du Djurdjura, et du Ouarsenis.

- l'Atlas saharien comportant les grands massifs de pin d'Alep des Aurès-Nemencha, du Hodna, des Ouled Nail et du Djebel Amour, ainsi que la majeure partie de la cédraie algérienne, en altitude, au-dessus de 1200 m (Tatar,2012).

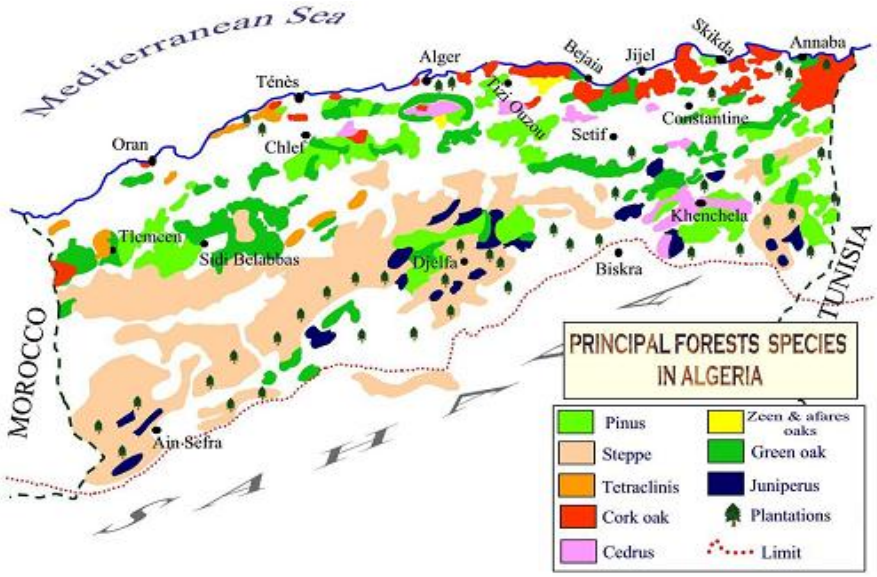


Figure 2. Carte de répartition des principales espèces en Algérie (INRF, 2012).

I.1.2. Principales caractéristiques de la forêt algérienne

Les grands traits de la forêt algérienne peuvent se résumer comme suit :

-forêt essentiellement de lumière, irrégulière, avec des peuplements feuillus ou résineux le plus souvent ouverts formés d'arbres de toutes tailles et de tous âges en mélange parfois désordonné (Fosa,2000);

-présence d'un épais sous-bois composé d'un grand nombre d'espèces secondaires limitant la visibilité et l'accessibilité et favorisant la propagation des feux (Boudy, 1955) ;

-existence d'un surpâturage important (surtout dans les subéraies) et empiétement sur les surfaces forestières par les populations riveraines (Madani *et al.*, 2001);

-état de dégradation avancé résultant des effets conjugués des incendies, du défrichement et des pacages ainsi que d'attaques parasitaires (Bensouiah, 2004).

I.1.3. Superficie des principales essences forestières

D'après différentes études réalisées par Boudy (1955), Seigue (1985), Ghazi et Lahouati (1997) et DGF(2007), les principales essences forestières et leurs superficies en Algérie sont récapitulées dans le tableau 1.

Tableau1. Principales essences forestières et leurs superficies (ha) en Algérie

Essences forestières	1955 (Boudy)	1985 (Seigue)	1997(GHAZI et Lahouati)	2007 (DGF)
Pin d'Alep	852 000	855 000	800 000	881 000
Chêne liège	426 000	440 000	463 000	229 000
Chêne vert	679 000	680 000	354 000	108 000
Chêne zéen et afarès	-	67 000	65 000	48 000
Genévriers	279 000	-	217 000	-
Thuya de Berbérie	157 000	160 000	143 000	-
Cèdre de l'Atlas	45 000	30 000	12 000	16 000
Pin maritime	-	12 000	38 000	31 000
Sapin de Numidie	-	300	-	-
Maquis	780 000	-	-	1662 000

La comparaison des données de la direction générale des forêts (2007) avec les plus anciennes met en évidence la stabilité et la progression des superficies de pin d'Alep. Par contre, les superficies des formations de chêne liège, chêne vert, **c**èdre de l'Atlas, chêne zeen et afarès ont considérablement diminué. La dégradation des forêts a conduit à une augmentation des formations de maquis qui occupaient une superficie de 1 662 000 ha en 2007.

Le Bureau National d'Études pour le Développement Rural (2009) a classé les principales essences forestières selon leur utilisation en deux groupes. Le premier groupe des forêts dites économique, constitué par les résineux (pin d'Alep, pin maritime et cèdre) et de feuillus (chêne zéen, afarès et eucalyptus).Le second groupe des forêts joue un rôle de protection essentiellement composé de chêne vert, thuya et genévrier.

I.1.4. Facteurs de dégradation de la forêt Algérienne

La forêt algérienne est à un stade de dégradation très avancée. Cet état alarmant est le résultat de l'action combinée de plusieurs facteurs naturels, historiques et sociaux (Berriah, 2015). De 1955 à 1997, la forêt algérienne a perdu plus de 1030 000 hectares, soit une perte annuelle de 24 523 ha. Le taux de déforestation est de 21 % en 42 ans ; la forêt en bon état ne représente que 58 % (MATE, 2002).

La connaissance des facteurs de dégradation est nécessaire pour la sauvegarde de l'équilibre naturel du pays. Les principaux facteurs de dégradation de la forêt algérienne sont : les incendies, le surpâturage, les défrichements, les attaques parasitaires.

I.1.4.1. Incendies

Les incendies constituent un des facteurs de dégradation les plus graves. Ils provoquent non seulement la destruction complète de la végétation, mais altèrent également le sol, enlaidissent le paysage et compromettent souvent la reconstitution végétale (Borsali *et al*., 2014) (figure 3).

Les statistiques de la Direction Générale des Forêts montrent qu'entre 1996 et 2005, 246 978 ha de forêts, broussailles, alfa et autres ont été ravagés par le feu (DGF, 2005).Ce sont les forêts de pin d'Alep et de chêne liège qui payent le plus lourd tribut face aux incendies (Madoui, 2002).

Les incendies sont à 72 % d'origine inconnue ; la part des incendies volontaires est de 27 % et les causes diverses 1 % (Missoumi *et al*., 2002).

Figure 3. Forêt de Medroussa (wilaya de Tiaret) incendiée en 2015 (Brahim, 2017).

I.1.4.2. Surpâturage

Le pâturage est une activité propre aux forêts, parfois souhaitée, car le bétail participe au contrôle de la prolifération des strates arbustives et herbacées, hautement inflammables (Le Houerou, 1980). En Oranie, les parcours en montagnes fournissent des pâturages de bonne qualité ; dès le début de l'été, les troupeaux s'y déplacent. Ces ressources fourragères sont liées aux formations de pin d'Alep, de chêne vert, de romarin, de genévrier (Bouazza, 1995).En revanche, le surpâturage a toujours un effet néfaste sur la forêt du fait du broutage excessif de la végétation et des jeunes repousses forestières ; il provoque un tassement du sol par le piétinement ce qui empêche la régénération des peuplements, réduit la capacité de rétention en eau des sols et épuise les ressources disponibles ; il contribue à dégrader les parcours et expose le sol à l'érosion (Ferka-Zazou, 2006).

L'élevage bovin reste le plus pratiqué dans les zones montagneuses. Les terres forestières abritent: 1300 000 de bovins ; 600 000 caprins ; et 4000 000 ovins, soit respectivement 80, 30 et 25 % du cheptel total pour toutes l'Algérie. La charge pastorale appliquée est au moins le double de la charge optimale. Le cheptel en surnombre détruit le couvert végétal protecteur tout en rendant, par le piétinement, la surface du sol pulvérulente. Il provoque la disparition des sols superficiels, le déchaussement des arbres et accroit la sensibilité aux chablis (MATE, 2014).

I.1.4.3. Défrichement

Les défrichements conduisent à une destruction totale et irrémédiable de la végétation en place, et à une disparition définitive des surfaces boisées pour un autre usage. C'est essentiellement pour satisfaire en terrains les besoins de l'agriculture et de l'élevage que tous les défrichements opérés à l'intérieur des formations végétales peuvent se justifier (Benabdeli, 1996) (figure 4).

De 1893 à 1941, le domaine forestier a perdu 116 000 ha de forêts au profit de l'extension des cultures coloniales (R.N.E., 2000).Actuellement, les populations montagnardes, privées de surface agricole, continuent à labourer les différents niveaux de la forêt. Le déboisement devient alors inévitable pour la mise en culture des terres défrichées et pour la consommation du bois de feu utilisé pour la cuisine et le chauffage au cours de l'hiver. La pauvreté et le chômage conduisent les habitants à commettre des délits forestiers pour pouvoir subvenir à leurs besoins primaires (coupes et ventes illicites de bois, fabrication de charbon, défrichements pour l'extension des parcelles de céréales, surpâturage…) (Tatar, 2012).

Figure 4. Défrichement dans la forêt de Medroussa (wilaya de Tiaret) (Brahim, 2017).

I.1.4.4. Les attaques parasitaires

Actuellement, la plupart des forêts et des reboisements réalisés sont en déséquilibre, ce qui induit une augmentation des facteurs d'agression et un affaiblissement de la résistance des espèces, avec un développement de la propagation des parasites et une accentuation des dégâts.

Parmi les ravageurs forestiers, la chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.) est celle qui pose le plus de problèmes par l'intensité et la récurrence des dégradations. Les cibles préférées de l'insecte sont les jeunes plantations de pin d'Alep, notamment celles réalisées dans des zones marginales ou en dehors de l'aire de l'espèce. Le bombyx disparate (*Lymantria dispar*), sur les chênes, et le *Phoracantha*, sur les eucalyptus, sont également des ennemis redoutables qui occasionnent de grandes pertes (DGF, 2007).

I.1.5. La stratégie actuelle de développement forestier

L'Administration forestière, dont les actions s'inscrivent dans le cadre de la stratégie de l'état en matière de gestion des forêts et de conservation des ressources forestières et alfatières, a pour fonction :

- d'administrer, protéger et valoriser le domaine forestier national qui s'étend sur 4,7 millions d'hectares;
- de contribuer au développement des zones de montagne menacées par l'érosion physique sur 12 millions d'ha ;
- de valoriser les terres à vocation forestière;
- de contribuer à la lutte contre la désertification dans les zones steppiques et présahariennes sur 28 millions d'hectares ;
- de mettre en valeur et développer les nappes alfatières sur 2,7 millions d'hectares;
- de contribuer à la protection des périmètres irrigués dans la zone saharienne, des agglomérations et des centres de vie qui y sont situés ;
- d'inventorier, préserver et contribuer au développement de la faune et de la flore des zones naturelles et de continuer à la conservation de la biodiversité, notamment dans les parcs nationaux et les réserves naturelles ;
- de promouvoir les formes d'organisation nécessaires à l'association des populations riveraines à la protection et au développement des forêts ;

- de participer à la création d'un cadre de vie meilleur dans les zones urbaines et suburbaines en relation avec les collectivités publiques, les associations et les groupements socioprofessionnels, et ce à travers la création de ceintures vertes ;
- d'élaborer et proposer des projets de textes législatifs et réglementaires relatifs aux forêts et à la protection de la nature (DGF, 2007).

I.1.6. Production forestière en Algérie

La production de bois a suivi un rythme très irrégulier depuis l'indépendance. Faible de 1963 à 1990, elle a connu une augmentation sensible à partir de 1991, atteignant 240 000 m^3 en 1993. Elle a diminué entre 1994 et 2000 avec les volumes les plus bas, ne dépassant pas les 15 000 m^3 par an. Cette diminution est due à la conjoncture sécuritaire (terrorisme) particulièrement difficile. Depuis, la production évolue en dents de scie, dépassant souvent les 100 000 m^3 avec un volume mobilisable de 200 000 m^3. En 2007, elle a enregistré un volume exploité de 154 471 m^3, dont 57 % de bois de trituration, 25 % de bois d'œuvre et 18 % de bois de feu. En 2008, elle a diminué de moitié, passant à 98 000 m^3 à cause des incendies et de l'épuisement de la ressource dépassant l'âge d'exploitabilité. Les peuplements de pin d'Alep contiennent plus de 80 % de la possibilité totale annuelle, le reste est fourni par les eucalyptus, le chêne zéen et le chêne afarès (Tatar, 2012).

Les besoins nationaux en bois sont évalués à 1,3 million m^3/an, alors que l'Algérie n'en produit qu'un peu plus de 15 %, avec une moyenne approchant les 200 000 m^3, dont 50 à 60 % de bois de trituration, 20 à 30 % de bois d'œuvre et 10 à 20 % de bois de feu. La superficie occupée par les forêts productives ne couvre qu'un tiers du patrimoine forestier national, soit 1,4 millions d'hectares, qui peuvent produire théoriquement au moins 500 000 m^3 de bois par an (MATE, 2014). La production de bois est issue de forêts aménagées ou non aménagées.

I.1.6.1. Production des forêts aménagées

Les forêts aménagées sont constituées des résineux (pin d'Alep) et de feuillus (chêne zéen, chêne afarès). Pour le pin d'Alep, il s'agit notamment des massifs de Telagh, Djelfa (Senalba Chergui et Gherbi) et de Khenchela (Béni-Imloul). Ces forêts sont exploitées depuis le début des années 80. En ce qui concerne les chênes zéen et afarès, les principales forêts (Guerrouch et Akfadou) sont en cours d'exploitation bien que ces chênes ne trouvent que difficilement des débouchés (Fosa, 2000).

I.1.6.2. Production des forêts non aménagées

La production de bois issus des forêts naturelles concerne les essences suivantes, par ordre décroissant : pin d'Alep, chêne zéen, chêne afarès, cèdre, pin maritime. Le pin d'Alep représente environ 70 % de la production totale de bois, mais seulement 20 % de bois d'œuvre. L'eucalyptus est essentiellement cultivé pour le bois de trituration. Environ 30 % de la production de chênes, de cèdre et de pin maritime est utilisée pour le bois d'œuvre (Fosa, 2000).

I.1.7. Débouchés des produits forestiers locaux

Les bois des genévriers sont destinés essentiellement à la combustion ou transformés en charbon de bois. Les bois d'eucalyptus, sont surtout utilisés pour la trituration et à la construction (étais, poutres...), rarement pour le bois d'œuvre (Tatar, 2012). Le bois du Pin d'Alep, le plus répandu, est de qualité très variable, souvent médiocre. Il est le plus souvent utilisé pour des emplois de faible à moyenne valeur ajoutée, essentiellement la menuiserie, la charpente et le coffrage. Le bois de cèdre est généralement associé à des produits haut de gamme, notamment en aménagement intérieur et en ébénisterie (Derbal, 2016).Le bois de chêne zéen est essentiellement utilisé pour fabriquer des traverses de chemin de fer en raison de sa densité et sa dureté très élevées. Le bois de pin maritime, de meilleure qualité que le Pin d'Alep, est surtout utilisé en menuiserie (Fosa, 2000).

I.2. Présentation de l'espèce *Juniperus oxycedrus* L

I.2.1. Le genre *Juniperus* L.

I.2.1.1. Description et répartition

Le genre *Juniperus* appartient à la tribu *Junipereae* et à la sous-famille *Cupressoideae* (Vidaković et Soljan, 1991). Il représente le taxon le plus diversifié des *Cupressaceae* ainsi que le deuxième le plus varié de l'embranchement des conifères après le genre *Pinus* L. (Debazac, 1991 ; Adams, 2014), avec environ 75 espèces, réparties en 3 sections : *Caryocedrus* (une seule espèce : *J. drupaceae* Labill.), *Juniperus* appelé également *Oxycedrus* (14 espèces) et *Sabina* (60 espèces) (Adams, 2014).

Les espèces de ce genre sont des arbustes à feuilles persistantes ou des petits arbres (Calaciura et Spinelli, 2008).La répartition de ce genre est la plus large par rapport aux autres genres des conifères, mais elle est limitée dans l'hémisphère Nord, uniquement en Afrique où certaines espèces se retrouvent au-delà de l'équateur, dans l'hémisphère sud (Mao *et al.*, 2010; Farjon et Filer, 2013) (figure 5 et figure 6).

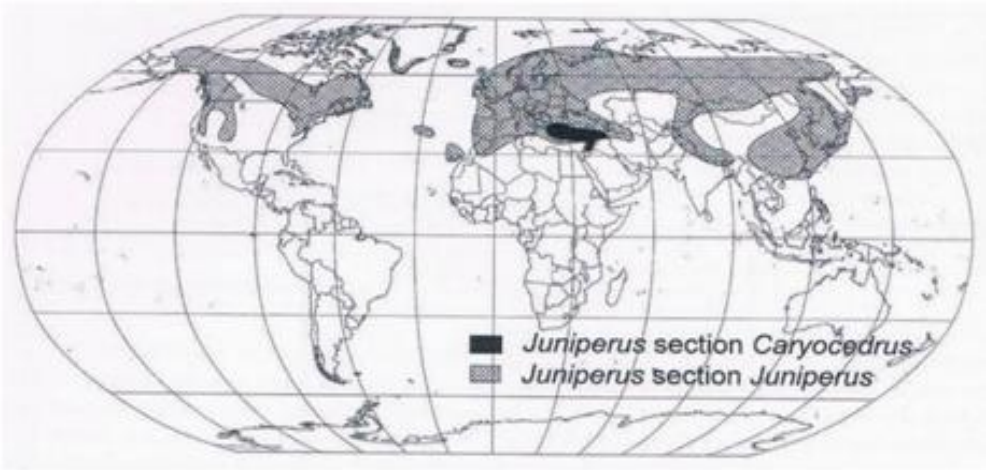


Figure5. Distribution de la section Caryocedrus et de la section *Juniperus* (section *Oxycedrus*)(Adams, 2014).

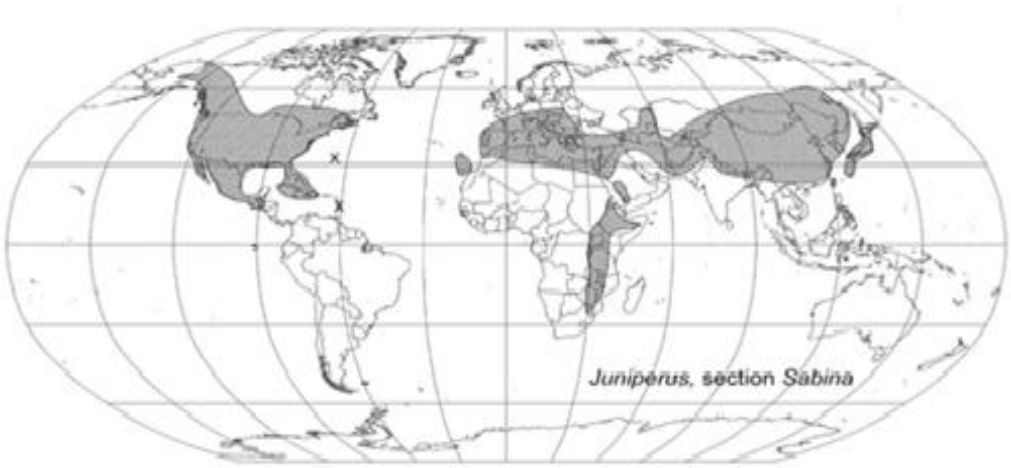


Figure 6. Distribution de *Juniperus* sect. *Sabina* (Adams, 2014).

Les espèces des deux sections *Caryocedru*s et *Oxycedrus* sont dioïques c'est-à-dire que les organes mâles et les organes femelles sont portés par des individus séparés alors que celles de la section *Sabina* sont monoïques, rarement dioïques (Adams, 2014).

En Algérie, ce genre est présent sous forme de cinq espèces, parmi lesquelles deux sont rares (*J. thurifera, J. communis*), une très rare (*J. sabina)* et les deux dernières, dans un état de dégradation (*J.* oxycedrus et *J. phoenicea*) (INRF, 2012). La figure 7 présente la répartition des espèces du genre *Juniperus* en Algérie.

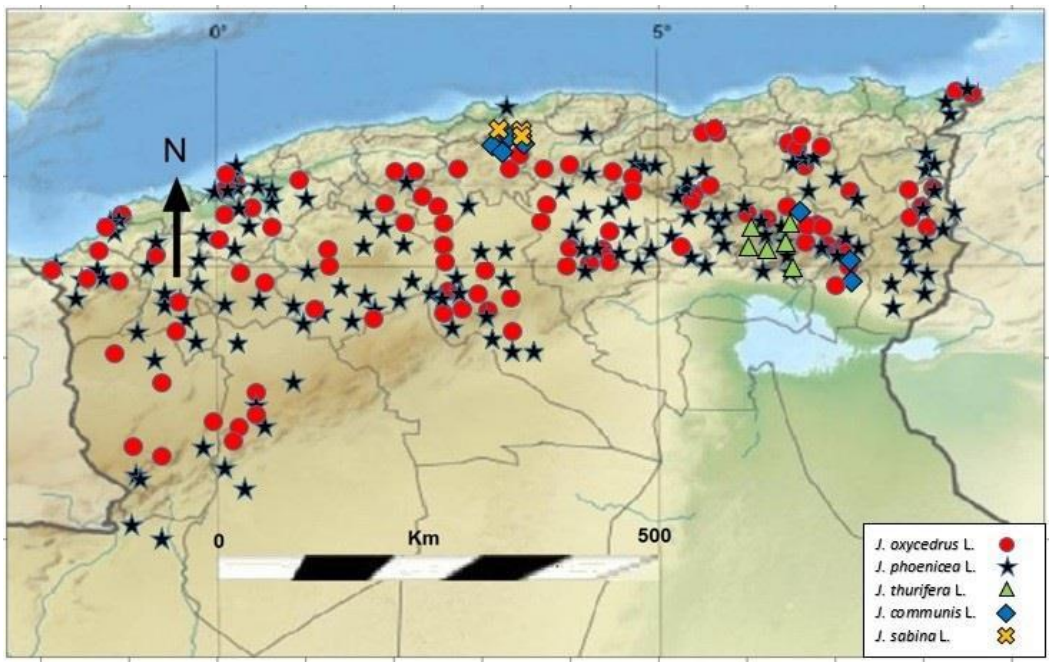


Figure 7. Aire naturelle de répartition des espèces du genre *Juniperus* en Algérie (Hafsi, 2018).

I.2.1.2. Germination

La germination des espèces du genre Juniperus qui varie selon les espèces, se fait au printemps (Deborah et Joseph, 1995). Elle peut être retardée jusqu'à deux ans en raison de la dormance embryonnaire, de l'enveloppe imperméable des graines et des inhibiteurs chimiques (Johnsen et Alexander, 1974).Les graines présentent une dormance tégumentaire levée par le passage dans le tube digestif d'un animal. La dispersion des graines se fait par les animaux frugivores, oiseaux et mammifères (Mugnaini *et al*., 2004).La méthode habituelle pour surmonter la dormance embryonnaire des graines de genévrier est la stratification froide/humide ou une combinaison de stratification chaude/humide suivie d'une stratification froide/humide (Johnsen et Alexander, 1974;Van Haverbeke et Comer, 1985).

Le genévrier a la capacité de s'adapter aux conditions environnementales très dures, se développant dans des situations écologiques extrêmes et colonisant les espaces durs (Calaciura et Spinelli, 2008).

I.2.1.3.Intérêts et usages

Le genévrier assure par son enracinement profond la rétention de l'eau dans les sols et les protège de l'érosion en enrichissant le sol en matière organique et en protégeant ses particules fines (Calaciura et Spinelli, 2008).

Les extraits de Juniperus présentent de nombreuses activités biologiques: antioxydant (Chaouche *et al*., 2013), antiseptique (Miceli *et al*., 2009; Taviano *et al*., 2013), antiviral (Ben Sassi *et al*., 2008), anti-inflammatoire (Akkol *et al*., 2009; Lesjak *et al*., 2013), analgésique(Akkol *et al*., 2009), anticancéreux (Kusari *et al*., 2011), antidiabétique (Orhan *et al*., 2012), neuroprotecteur (Tavares *et al*., 2012).

Le bois a une texture fine ; il est durable, facile à ouvrer, brun rougeâtre, d'une odeur agréable, sans canaux résinifères ; le bois final est peu apparent, tendre à dur selon l'essence. En raison de son odeur agréable et de son effet anti-insectes, il est utilisé pour finir l'intérieur de coffres et des placards; les espèces à bois tendre sont utilisées pour fabriquer des crayons à mine de plomb et pour la sculpture. Il est également utilisé comme piquet de clôture (Farrar, 1996).

I.2.2. L'espèce *Juniperus oxycedrus*

I.2.2.1. Historique de l'espèce

Le genévrier oxycèdre appartient à la famille des cupressacées. Il a été décrit par Linnéen 1753sous le nom de *Juniperus oxycedrus*. Le nom *«oxycedrus»* provient des deux mots grecs *«oxys»* et *«Cedros»* qui signifient respectivement aigu et Cèdre, c'est-à-dire «Cèdre à feuilles épineuses» (Garnier *et al.*, 1961).

Cette plante est largement utilisée en médecine traditionnelle pour le traitement de diverses maladies tel que l'hyperglycémie, l'obésité, la tuberculose, la bronchite, et la pneumonie (Sanchez de Medina *et al*., 1994; Swanston-Flatt *et al*., 1990; Duke, 1985).

L'extrait de cade le plus connu est l'huile de cade, huile empyreumatique goudronneuse obtenue par pyrogénation du bois (distillation sèche par carbonisation). Elle est utilisée depuis l'antiquité contre les dermatoses et les maladies du cuir chevelu, et pour ses propriétés antiseptiques ; elle est utilisée dans une douzaine de spécialités dermatologiques humaines et vétérinaires distribuées en France, ainsi que dans de nombreux savons et shampooings. Elle est utilisée dans les cas de gale, eczéma, psoriasis, pityriasis, alopécies, et autres affections (Bouhlal *et al*., 1988).

I.2.2.2. Dénominations vernaculaires

Français: Cadier, Cade, Genévrier oxycèdre, Petit Cèdre, Petit Cèdre d'Espagne

Anglais: Berried Cedar, Prickly Cedar, Brown berried Juniper, Cade Oil Plant.

Allemand: Céder Wachholder, Spanischer Wachholder, Stachelbeere Wachholder.

Espagnol: Cada.

Italien : Appeggi, Ginepro Appeggi, Ginepro rosso, Ginepro Ossicedro **(**Garnier *et al*., 1961 ; Bonnier, 1990)

Arabe: Taga (Quézel et Santa, 1962).

I.2.2.3. Classification botanique

Embranchement: Spermaphytes

Sous- Embranchement: Gymnospermes

Classe: Conifères

Ordre : Coniférales

Famille: Cupressacées

Genre : *Juniperus*

Espèce: *Juniperus* oxycedrus L. (Quézel et Santa, 1962).

I.2.2.4. Caractères botaniques de l'espèce

Juniperus oxycedrus ou genévrier oxycèdre est un arbuste ou un arbrisseau d'un vert glauque pouvant atteindre 9 mètres de hauteur ; son port est en colonne à l'âge adulte (Damerdji et Meniri, 2014) avec un tronc présentant une écorce mince et grisâtre qui se détache en fines lanières (Seigue, 1985) (Figure 8).

Figure 8. Aspect général d'un arbre de l'espèce *Juniperus oxycedrus* dans la station de Moulay Slissen (photo Ouaar ,2018).

I.2.2.4.1. Feuilles

Le feuillage persistant se présente sous forme d'aiguilles. Ces aiguilles, à pointe fine et piquante, sont disposées en verticilles de 3 sur 6 rangs. Leur face supérieure porte deux bandes blanches séparées par la nervure médiane verte, ce qui permet de faire la distinction avec le genévrier commun (une seule raie chez *Juniperus communis*) (Damerdji et Meniri, 2014) (Figure 9).

Figure 9. Feuille de *Juniperus oxycedrus* (photo Ouaar, 2018).

I.2.2.4.2. Fleur et floraison

Le Genévrier oxycèdre est un arbuste dioïque dont la floraison survient en avril-mai.

Les fleurs mâles sont de petits cônes jaunes (Figure 10). Les cônes femelles prennent peu à peu l'apparence de baies, les écailles se soudent les unes aux autres. Ces cônes arrivent à maturité au bout de deux ans environ (Damerdji et Meniri, 2014).

Figure 10. Rameaux fleuris d'un pied mâle de genévrier cade (Reille, 2014).

I.2.2.4.3. Fruit

Les fruits sont bruns rouges à maturité, de 6 à 9 mm (Damerdji et Meniri, 2014). Ils portent généralement 3 graines, brunes, triangulaires, ovoïdes (Farjon, 2010).

I.2.2.4.4. Bois

Le bois est de couleur fauve, homogène, à grain fin, pouvant acquérir un beau poli ; il est utilisé en ébénisterie et en marqueterie, pour fabriquer des placages et des crayons (Rameau et *al.*, 1993).

I.2.2.5. Caractéristiques écologiques

Le genévrier oxycèdre est typique de la région méditerranéenne où il représente un élément pionnier très dynamique, surtout en milieu forestier dégradé. Il est associé essentiellement au chêne vert, au chêne liège, voire au pin d'Alep ; il est présent sur les massifs montagneux où il est souvent abondant dans les chênaies (Quézel et Gast, 1998).On le rencontre en moyenne altitude, plutôt de 500 à 1000 m (Laszlo, 2000).

Le genévrier oxycèdre exige beaucoup de lumière et de chaleur ; il résiste à la sécheresse et il est sensible au froid (Riou-Nivert, 2001).Il est indifférent à la nature du sol, apprécie les lieux arides rocailleux, sur calcaire ou sur sols acides, préfère les sols drainés, même calcaires ou secs (Damerdji et Meniri, 2014).

Klimko *et al*. (2007) ont subdivisé l'espèce *oxycedrus* en quatre sous-espèces différentes : subsp. *oxycedrus*, subsp. *macrocarpa* (Sibth. & Sm.) Ball, subsp. *Badia* (H.Gay) Debeaux, subsp. *transtagana* (Franco). Ces sous espèces diffèrent selon leurs habitats, la largeur des aiguilles et les dimensions des cônes. En Algérie, Quézel et Santa (1962) notent deux sous-espèces :

- Subsp.*rufescens* (Link) Deb., dans les forêts de montagnes dans toute l'Algérie (fruit mûr, rougeâtre, de 6-15 mm de diamètre ; fleurs mâles subglobuleusesde1 mm de diamètre).
- Subsp. *macrocarpa* (S. et Sm.) Ball qui colonise des dunes de tout le littoral, venant très exceptionnellement à l'intérieur des terres (fruit mûr brun-rouge, de 8-15 mm de diamètre ; fleurs mâles ovoïdes, de 1,5-2 mm.

Il existe des formes de passage entre les deux sous-espèces.

Chapitre II
Revue bibliographique sur le matériau bois

II.1. Introduction

Le bois est un matériau noble, composite d'origine végétale, produit par les arbres vivants. Il est également un matériau biopolymérique dont la structure est cellulaire, poreuse, hiérarchique et présente plusieurs niveaux de structure, chacune bien organisée (Stevanovic et Perrin, 2009). Sa composition chimique, ses propriétés physiques et mécaniques varient avec l'espèce, à l'intérieur d'une même espèce, en fonction de l'origine géographique et la position dans l'arbre. Les arbres dont il est issu sont subdivisés en deux grands groupes : les gymnospermes, plus communément appelés conifères et les angiospermes qui correspondent aux feuillus. Chacun de ces groupes renferme des milliers d'espèces différentes (Mounguengui, 2008).

Le bois est constitué majoritairement de trois polymères : la cellulose, les hémicelluloses et les lignines. A côté de ces trois polymères majeurs se trouvent également des substances organiques de faible poids moléculaire appelées substances extractibles ou métabolites secondaires, et des substances inorganiques correspondant aux cendres obtenues après combustion du bois (Mounguengui, 2008).

II.2. Plan ligneux du bois

Les éléments du bois sont orientés parallèlement et perpendiculairement à un axe de symétrie matérialisé par la moelle centrale. Il y a donc trois plans ligneux de référence (figure 11) :

• le plan transversal qui est perpendiculaire à l'axe de la tige et sur lequel on peut observer les cernes annuels.

• le plan radial, orienté de la moelle vers l'écorce suivant les rayons. Il suit le fil du bois et est perpendiculaire aux cernes. Il correspond au débit sur quartier, appelé aussi débit sur maille.

• Le plan tangentiel, perpendiculaire au plan radial. Il suit le fil du bois et est tangentiel aux couches d'accroissement. Il correspond au débit sur dosse.

Le plan ligneux est constant pour une espèce donnée, est généralisable pour une famille ou un groupe d'espèces et présente des analogies avec les espèces voisines (Keller, 1994). Il permet de comprendre la structure d'un bois, c'est un caractère systématique. Son étude conduit à la description des bois, à leur connaissance, à l'appréciation de leurs propriétés et permet de préciser les relations entre l'anatomie et les caractéristiques de ce matériau (Jodin, 1994).

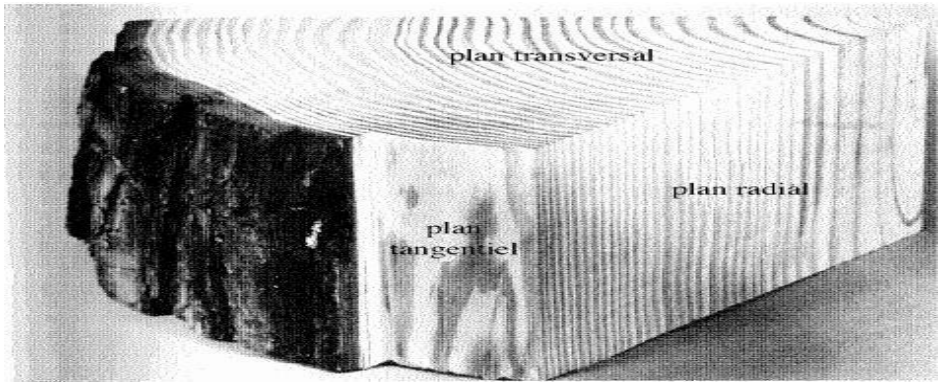


Figure 11. Plans ligneux : plan transversal ; plan tangentiel ; plan radial (Bourreau, 2011).

II.3. Structure anatomique du bois

II.3.1. Anatomie du bois à l'échelle macroscopique

A l'échelle macroscopique, les principales parties du tronc d'un arbre sont, depuis l'extérieur jusqu'à l'intérieur, l'écorce, le phloème, le cambium, l'aubier et le bois de cœur (figure 12).

II.3.1.1. Duramen : bois de cœur ou bois parfait, situe au centre du tronc. Il est constitué exclusivement de cellules mortes, imprégnées de substances extractibles (Panshin et de Zeeuw 1980). Chez certaines espèces, le duramen se distingue de l'aubier par une couleur plus foncée, tendant généralement vers le brun et le rouge. La coloration du duramen est due à la présence de substances extractibles colorées dans les parois et les lumens des cellules (Panshin et de Zeeuw, 1980; Taylor *et al.*, 2002).

La durabilité du duramen est due principalement à la présence d'extractible biocides capables d'empêcher ou limiter les attaques des agents biologiques de dégradation du bois (Panshin et de Zeeuw, 1980). D'autre part, le duramen est également moins attractif que l'aubier pour certains pathogènes parce que les substances nutritives sont peu concentrées et difficilement accessibles (Taylor *et al.*, 2002).

II.3.1.2. Aubier : partie externe du tronc et des branches de l'arbre, vivante, située juste sous l'écorce, au bois de couleur généralement plus claire que le duramen. C'est la partie physiologiquement active du xylème qui permet le transport de la sève brute des racines vers la cime (Taylor *et al*., 2002). Le bois d'aubier est le lieu de réserve en eau et en substances nutritives. Il est généralement beaucoup plus sensible aux attaques des champignons lignivores que le duramen (Brunetti *et al*., 2001).

II.3.1.3. Ecorce : c'est la première ligne de défense de l'arbre contre la dessiccation, les blessures, les agressions pathogènes et les attaques de prédateurs. Elle est formée de

l'ensemble des tissus situés à l'extérieur du cambium vasculaire et comprend le phloème qui forme l'écorce interne ainsi que le rhytidome (ou périderme) qui forme l'écorce externe. Le phloème a pour rôle de conduire la sève élaborée des méristèmes apicaux vers les tissus basaux. Le rhytidome est composé du phelloderme, du phellogène et du suber (Vaucher, 1993). Elle constitue en moyenne 8% de la masse sèche d'un arbre (Desrochers, 2011). Elle est composée de trois éléments structuraux polymères, la cellulose, les hémicelluloses et la lignine (Harkin et Rowe, 1971).

II.3.1.4. Cambium (ou (zone) assise génératrice libéroligneuse): fine couche annulaire de cellules méristématiques, située entre le bois et le liber ; cette couche de cellule permet la formation de nouvelles cellules de bois vers l'intérieur, et de nouvelles cellules de liber vers l'extérieur.

En zone de climat tempéré, l'activité saisonnière du cambium, plus actif au printemps ou en été qu'en automne ou en hiver, conduit à la formation du bois de printemps ou bois initial d'une part, et du bois d'été ou bois final d'autre part (Polge, 1963; Franceschini *et al.*, 2013).

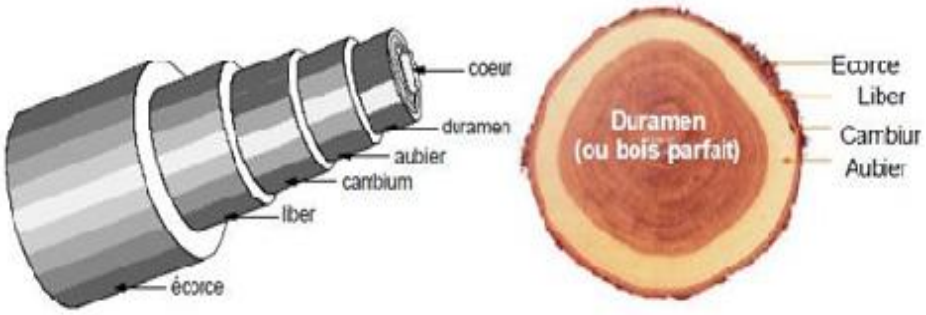


Figure 12. Structure générale du tronc d'un arbre (Natterer *et al.*, 2000).

II.3.2. Anatomie du bois à l'échelle microscopique

Il existe des différences importantes entre la microstructure du bois des gymnospermes et celle du bois des angiospermes. Le bois des gymnospermes présente une structure simple, composée essentiellement de trois types de cellules : les trachéides longitudinales, les trachéides transversales, ainsi que divers types de parenchyme. La sève brute circule dans les trachéides longitudinales qui jouent à la fois un rôle de support mécanique et de conduction. Le bois des feuillus présente une structure plus complexe que celle des résineux, avec des vaisseaux spécialisés pour transporter la sève brute et des fibres assurant la résistance mécanique et le soutien de l'arbre (Payette et Filions, 2010). La figure 13 présente comparativement le plan ligneux d'une essence résineuse et celui d'une essence feuillue.

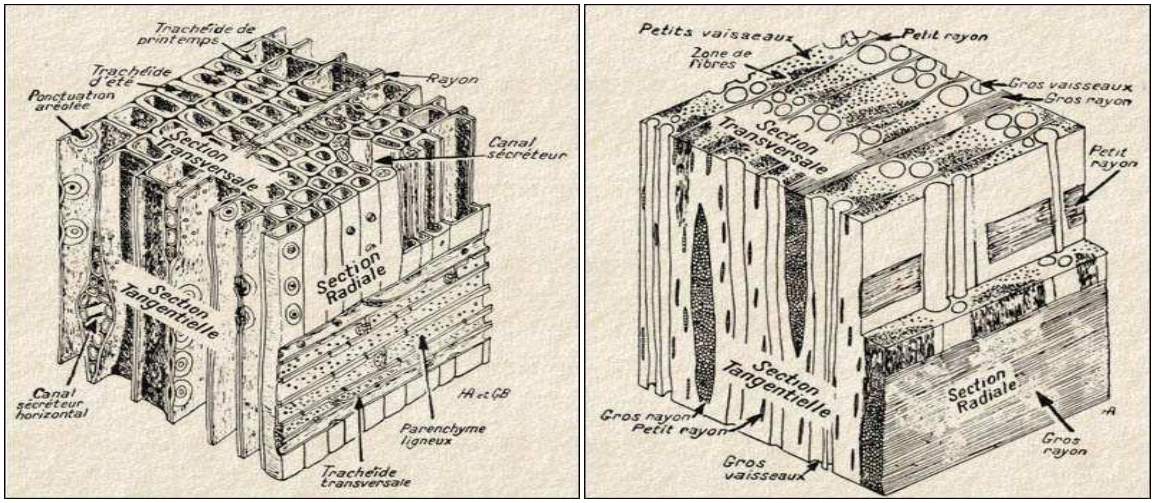


Figure 13. Vue schématique du plan ligneux d'une essence résineuse (à gauche) et d'une essence feuillue (à droite) (Bouet et Humbert, 2003).

II.4. Composition chimique du bois

La composition chimique élémentaire du bois varie très peu d'une essence à l'autre. En moyenne, elle se répartit, en pourcentage du poids anhydre, de la façon suivante :

Carbone : 50 %, Oxygène : 43 %, Hydrogène : 6 %, Azote : 1 %, Cendres (silice, phosphates, potassium, calcium) < 1 % (Chaouch, 2011).

Le bois est formé en majorité de trois composés macromoléculaires : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. A ces trois principaux constituants viennent s'ajouter des composés minoritaires à faible poids moléculaires tels que les extractibles et les substances minérales (cendres) (tableau 2).

Tableau 2. Répartition moyenne (% en masse) des différents composés dans le bois des feuillus et des résineux (Sjöström 1993).

Constituants (%)	Résineux	Feuillus
Cellulose	42 ± 2	45 ± 2
Hémicelluloses	27 ± 2	30 ± 5
Lignine	28 ± 3	20 ± 4
Extractibles	3 ± 2	5 ± 3

Globalement, dans les zones tempérées, les substances macromoléculaires représentent en moyenne 97 à 99 % du bois, tandis que pour les bois tropicaux, elles ne représentent en moyenne que 90 % du bois, étant donné la plus grande proportion d'extractibles et de cendres (Thévenon, 2015).

II.4.1. Les substances macromoléculaires

II.4.1.1. La cellulose

La cellulose est le constituant le plus important de la paroi cellulaire. C'est un polyholoside linéaire forme d'unités de glucopyranose reliées par des liaisons glycosuriques (B1-4). L'unité répétitive, composée de l'association de deux glucoses, est appelée cellobiose (figure 14).La chaine de cette molécule n'est pas ramifiée, des liaisons hydrogène(en traitillé) augmente sa stabilité (Navi et Heger, 2005).

C'est un macro-polymère linéaire dont le degré de polymérisation moyen avoisine 10 000. La cellulose est considérée comme plus stable thermiquement que les hémicelluloses. Elle joue un rôle principal dans le comportement mécanique des parois cellulaires du bois. Son taux de cristallinité est compris entre 40 et 50 % de la matière sèche du bois et varie selon les essences. Au moment de la cristallisation, les chaînes de cellulose s'assemblent pour former une fibrille de 1,2 à 4,8 nm de diamètre. Les fibrilles de cellulose s'agrègent pour former des microfibrilles d'une longueur de 2500 à 5000 nm et d'un diamètre 10 à 25 nm (Fengel et Wegener, 1989). La structure cristalline de la cellulose est d'une grande importance pour les propriétés mécaniques du bois (Stevanovic, 2014).

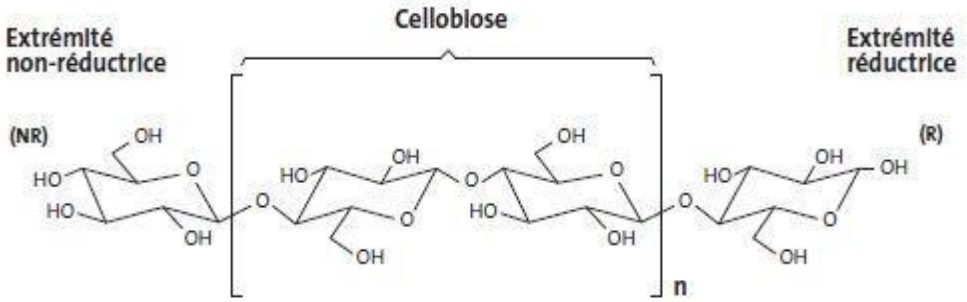


Figure 14. Structure de la cellulose (Stevanovic, 2014).

II.4.1.2. Les hémicelluloses

Les hémicelluloses sont des hétéro-polysaccharides non cellulosiques de la paroi du bois.

Ce sont des chaines plus courtes que la cellulose (degré de polymérisation moyen de 150), ramifiées et constituées de sucres variés, Les hémicelluloses, principalement amorphes, possèdent de nombreux groupements hydroxyles permettant des liaisons étroites avec la cellulose et induisant leur caractère hydrophile (Thévenon, 2015).

Les hémicelluloses des résineux sont différentes de celles des feuillus. Les xylanes sont présentes dans les feuillus à une fraction massique variant entre 20 et 35 %, et entre 7 et

14 % dans les résineux. Les glucomannanes, qu'on trouve notamment dans les résineux, sont formées de galactose, de glucose et de mannose. La proportion des glucomannanes dans les feuillus est de 3 à 5 %, et dans les résineux de 20 à 25 % de la masse du bois sec (Navi et Heger, 2005).La figure 15 représente la structure chimique partielle des glucomannanes des résineux.

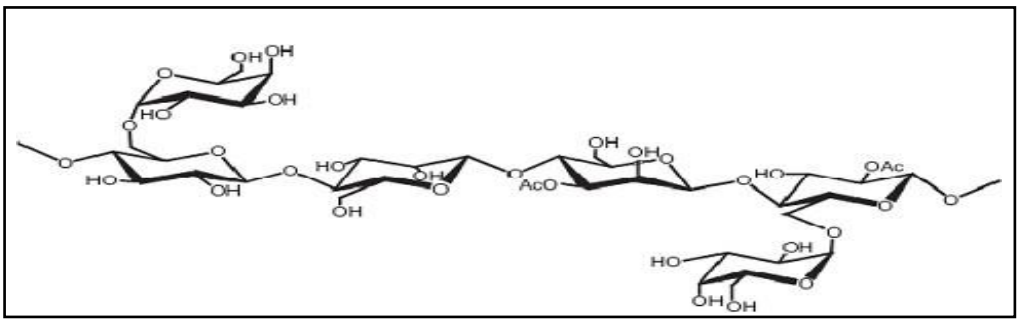


Figure 15. Structure chimique partielle de glucomannanes des résineux (Tame *et al*., 2007).

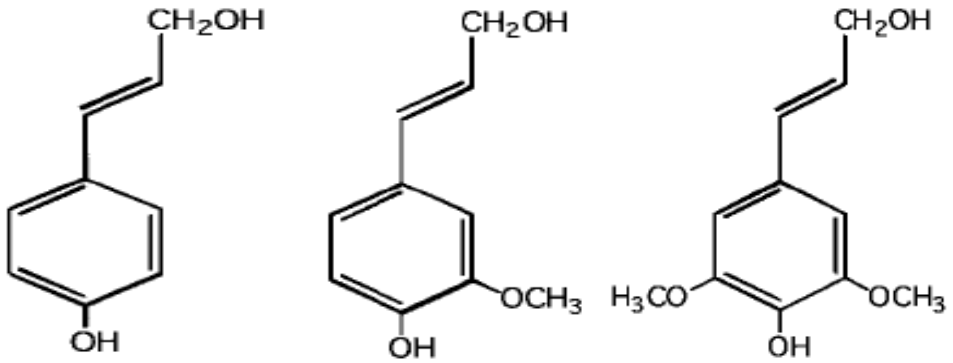
En termes d'applications industrielles, les hémicelluloses sont essentiellement utilisées pour la production d'oses. En effet, en milieu acide, l'hydrolyse des hémicelluloses conduit aux monomères constitutifs tels que le xylose, le glucose et l'arabinose.

La fermentation alcoolique ou enzymatique des oses ainsi formés, les transforme en alcools (éthanol, butanol) et en acides organiques (butyrique, acétique, lactique, etc.) (Delgenes *et al*., 1989).

II.4.1.3. La lignine

La lignine est un composant majeur des tissus des plantes vasculaires et représente en moyenne 18 à 35 % de leur poids total (Dommergue et Mangenot, 1970). Elle assure la rigidité cellulaire et constitue la matrice dans laquelle sont disposées la cellulose et les hémicelluloses (Trouy-Triboulot et Triboulot, 2001).

Du point de vue chimique, les lignines sont des mélanges de polymères amorphes de trois constituants fondamentaux, les alcools p-coumarylique (unité hydroxyphenyl), coniférylique (unité guaiacyl), sinapylique (unité syringyle) (figure 16). Elles varient donc selon les essences : les résineux ont des monomères de type guaïacyle uniquement, alors que les feuillus ont en plus des monomères de type syringyle (Del Rio *et al*, 2001). La lignine présente des propriétés hydrophobes, antioxydantes et principalement responsables de la photocoloration (Pandey, 2005).



Alcool p-coumarylique Alcool coniférylique Alcool sinapylique

Figure 16. Monomères précurseurs des lignines (Fengel et Wegener, 1989).

II.4.2. Les extractibles

Les substances extractibles sont des molécules de faible poids moléculaire localisées dans la structure poreuse du bois. On les appelle extractibles parce qu'elles sont solubles dans les différents solvants polaires (acétone, eau, éthanol) ou apolaires (toluène, cyclohexane, dichlorométhane). Les principaux constituants organiques sont les terpènes et les terpénoïdes, les composés aliphatiques (acides gras saturés et insaturés, alcanes, alcools gras …), les composés phénoliques (tannins condensés et hydrolysables, flavonoïdes, stilbènes, quinones...) (Hillis, 1975, Fengel et Wegener 1989, Jodin ,1994).

Les extractibles, selon leurs natures, déterminent les principales propriétés du duramen comme la couleur, l'odeur, la durabilité, la perméabilité et la masse volumique. Ces substances ont également tendance à réduire l'hygroscopicité du bois lorsqu'elles sont présentes en grandes quantités (Cloutier, 2005). Elles présentent une diversité de structure et de proportion en fonction de l'essence, de la partie de l'arbre considérée (aubier ou duramen), de l'âge de l'arbre, des conditions environnementales (Thévenon, 2015). Ces substances peuvent être extraites par différentes méthodes telles que l'extraction à chaud à l'aide d'un Soxhlet ou d'un système accéléré d'extraction Dionex, la macération, la distillation à la vapeur (Saha Tchinda, 2015).

II.4.3. Les substances minérales

La combustion du bois à haute température conduit à la formation de cendres qui contiennent les matières minérales du bois. Les principaux éléments minéraux sont la silice, le potassium, le calcium, le magnésium, le sodium, le fer, l'aluminium, le soufre, le chrome, le nickel et le zinc. Ils peuvent être sous la forme d'oxydes, d'oxalates ou de chlorures (Thévenon, 2015).

La teneur en sels minéraux est un élément important pour les propriétés de finition du bois ainsi que pour la production d'énergie à partir des résidus de transformation du bois

(Mbagou, 2017).Chez certaines essences tropicales, la présence de taux élevés de silice a plusieurs conséquences, notamment des difficultés lors de l'usinage mais aussi une bonne résistance aux attaques d'insectes et de térébrants marins(Thévenon, 2015).

II.5. Facteurs influençant les proportions de bois d'aubier et de duramen

La duraminisation est le processus de formation du bois de cœur ou duramen. Dans le duramen se forment des substances chimiques comme les alcaloïdes, les tanins et autres matières colorantes qui jouent un rôle d'antiseptique naturel contre les agents biologiques de dégradation (Dirol et Xavier, 2001).

La proportion de duramen dans un arbre varie selon les espèces et selon les individus. L'âge de l'arbre et le taux de croissance sont les facteurs les plus importants. De manière générale, plus l'arbre est âgé, plus la proportion de duramen est élevée. De même, plus le taux de croissance est important et plus la proportion de duramen est élevée (Taylor et *al.* 2002). Cependant, certaines études ont rapporté des résultats contradictoires (Giroud, 2005).

II.6. Equilibre hygroscopique

L'hygroscopie est une caractéristique très importante du bois puisqu'elle rend le matériau sensible aux conditions climatiques environnantes (humidité et température). Le taux d'humidité du bois tend vers une valeur d'équilibre lorsque l'humidité relative de l'air et la température sont stables.

II.6.1. L'eau dans le bois

Les différents constituants du bois n'ont pas le même comportement vis-à-vis de l'humidité.

L'eau se fixe en priorité sur les hémicelluloses, la cellulose étant moins hydrophile et la lignine étant de tous les composés du bois le plus hydrophobe. L'eau contenue dans le bois peut prendre deux formes différentes :

• l'eau libre ou eau capillaire remplit les lumens des cellules du bois. Elle est retenue uniquement par des forces capillaires et n'intervient pas dans les phénomènes de retrait ou de gonflement (Avat, 1993).

• l'eau liée, adsorbée dans les parois cellulaires où elle est fixée par des forces intermoléculaires (mécanisme de sorption). La sorption peut aller de l'adsorption physique (interactions électrostatiques entre les molécules d'eau et la surface du bois) à l'absorption chimique (liaisons hydrogènes entre les atomes d'oxygène et d'hydrogène des molécules d'eau et des groupements hydroxyles des polysaccharides). Cette fraction d'eau est responsable des variations dimensionnelles du bois (Govin, 2004).

II.6.2. Mesure du taux d'humidité

Le taux d'humidité H (exprime en %) d'un échantillon de bois est égal au rapport entre la masse totale d'eau qu'il contient (différence entre la masse du bois humide MH et sa masse anhydre M0) et sa masse anhydre, multiplié par 100, soit : H(%) = ((MH – M0) /M0) × 100 (Guibal *et al*., 2015).

La norme française (NF B 51-004 février 1942) préconise de mesurer la masse anhydre d'un échantillon après séchage à 103 ± 2 °C jusqu'à obtention d'une masse constante (Govin, 2004).

II.7. Propriétés physiques et mécaniques

La connaissance des propriétés physiques et mécaniques d'un bois permet de qualifier ses potentialités d'utilisation ; ces propriétés varient en fonction des essences et des conditions de croissance des arbres.

II.7.1. La masse volumique

La masse volumique d'une pièce de bois est le rapport entre sa masse et son volume mesuré à un même taux d'humidité. Elle s'exprime en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3) dans le système international d'unités (Guibal *et al*., 2015).Elle varie considérablement d'une espèce à l'autre, au sein d'une même espèce et surtout à l'intérieur d'un même individu (de bas en haut et du centre vers la périphérie). Elle varie aussi d'une provenance à une autre ainsi qu'à l'intérieur d'une provenance, et selon l'âge du bois (Singh, 1987 ; Haygreen *et al.*, 2007).

La masse volumique (ou la densité) à 12 % est une caractéristique technologique de base, la première à déterminer pour qualifier un bois ; cette propriété est corrélée, plus ou moins étroitement, avec les principales propriétés physiques et mécaniques du bois ainsi qu'avec certaines caractéristiques de mise en œuvre (durabilité naturelle, imprégnabilité...) ; elle est la variable physique explicative majeure de la variabilité totale des constantes élastiques du bois (Gérard *et al.*, 1998). Le tableau 3 présente une classification des bois selon leur masse volumique.

Tableau 3. Classes de masse volumique d'après la norme NF B 51-005 (1985).

Classes de masse volumique	Qualification
MV < 500 kg/m^3	Bois très léger
500 kg/m^3< MV < 650 kg/m^3	Bois léger
650 kg/m^3< MV < 800 kg/m^3	Bois mi-lourd
800 kg/m^3< MV < 950 kg/m^3	Bois lourd
MV > 950 kg/m^3	bois très lourd

II.7.2. Point de Saturation des Fibres (PSF)

Le Point de Saturation des Fibres (ou PSF) correspond au taux d'humidité du bois saturé en eau liée, taux en dessous duquel le bois va commencer à sécher en se contractant ; il varie de 20 à 40 % suivant les essences, mais se situe le plus souvent aux environ de 30 % (Gérard *et al.* 1998**).** La figure 17 schématise le phénomène d'évacuation de l'eau libre (sans retrait) puis de l'eau liée (avec retrait) dans une pièce de bois en cours de séchage.

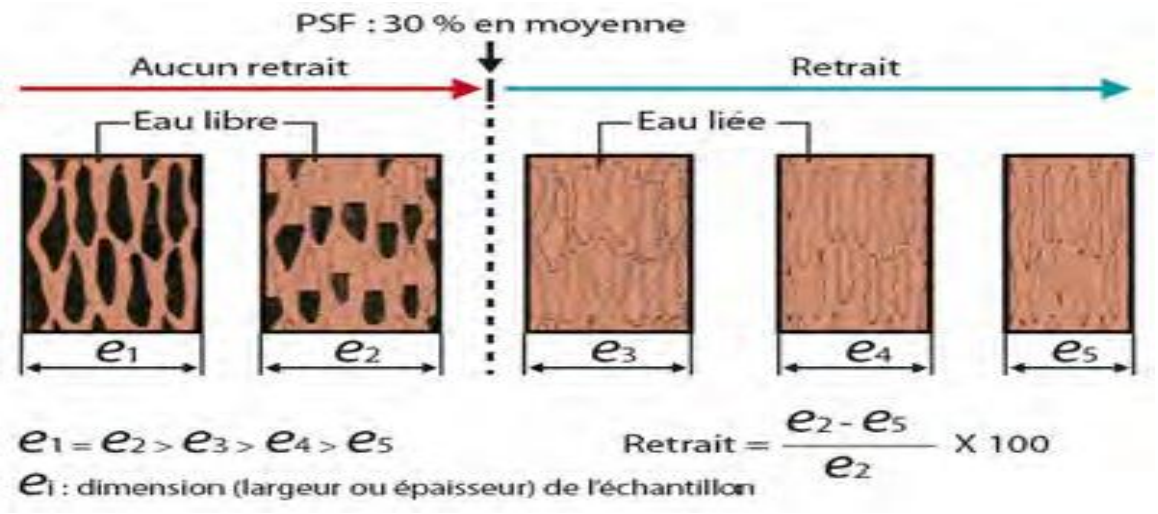


Figure 17. L'eau libre et l'eau liée dans le bois (Guibal *et al*., 2015).

C'est un paramètre important car il détermine partiellement la stabilité dimensionnelle des ouvrages en service (Charron *et al*., 2003).Il peut être déterminé de façon numérique à partir des valeurs de retrait mesurées par rapport à l'état saturé (Ngavoura, 1998 ; Dumonceaud, 2001). Le tableau 4 présente les classes de Point de Saturation des Fibres (= PSF).

Tableau 4. Classes de Point de Saturation des Fibres (= PSF) (Gérard *et al.* 1998).

Classes de Point de Saturation des Fibres	Qualification
PSF < 25 %	PSF faible
25 < PSF < 35 %	PSF moyen
PSF > 35 %	PSF élevé

II.7.3. Retrait du bois

Le retrait du bois est une propriété importante à prendre en compte dans l'évaluation de la qualité du bois, notamment lorsque les produits sont destinés à être utilisés en ébénisterie, en menuiserie et en structure. Il se manifeste dès que le bois ne contient plus d'eau libre et sèche en perdant son eau liée, Le taux d'humidité du bois devient alors inférieur au point de saturation des fibres (Mazet et Nepveu, 1991).

Le retrait du bois en dessous du PSF intervient suivant les trois directions du bois : longitudinale, tangentielle et radiale. Le retrait longitudinal est très faible par rapport aux deux autres retraits, de l'ordre de quelques dixièmes de pourcent, mais il peut avoir une influence notable sur les variations dimensionnelles de pièces de grandes longueurs. Le retrait longitudinal est très difficile à mesurer en laboratoire et il est rarement donné dans les caractéristiques technologiques d'un bois (Guibal *et al*., 2015).

Le retrait est affecté par plusieurs facteurs incluant la teneur en humidité, la masse volumique, la structure anatomique, les extractibles, les constituants structuraux, l'effort mécanique et la proportion de bois juvénile (Tsoumis 1991, Jodin 1994). Le retrait tangentiel total et le retrait radial total sont habituellement déterminés pour qualifier le comportement du bois pendant le séchage ou sa mise en œuvre (Gérard *et al*., 1998).Le tableau 5 représente les classes de retraits linéaires transverses.

Tableau 5. Classes de retraits linéaires transverses d'après la norme NF B 51 006 (1985).

Retrait tangentiel total (%)	Retrait radial total (%)	Qualification
Rt< 6,5 %	Rr< 3,8 %	Retrait faible
6,5 % <Rt< 10 %	3,8 % <Rr< 6,5 %	Retrait moyen
Rt> 10 %	Rr> 6,5 %	Retrait fort

Le retrait total R par rapport à l'état saturé (Rt pour le retrait tangentiel ou Rr pour le retrait radial) est donné par la relation :

$$R = (Ds-Do)/Ds \times 100$$

Où Ds et Do sont respectivement les dimensions des échantillons dans la direction considérée à l'état saturé puis à l'état anhydre.

II.7.4. Module d'élasticité longitudinal (Module de Young)

Le module d'élasticité longitudinal est, par définition, le rapport entre la contrainte longitudinale et la déformation longitudinale lors d'une contrainte uniaxiale imposée. C'est une propriété de première nécessité technologique pour les emplois en structure où les pièces de bois sont fréquemment sollicitées en flexion statique suivant leur plus grande direction, parallèlement aux fibres (Gérard *et al*., 1998).

Le module d'élasticité longitudinal du bois stabilisé à une humidité théorique de 12 % est une caractéristique mécanique de référence. Cette propriété caractérise la proportionnalité entre la charge et la déformation. C'est un indicateur de la rigidité du bois. Plus le module est élevé, plus le bois est rigide (Kittel, 1998).

Selon Guitard (1987), le bois qui possède la densité plus élevée (plus dense) est plus résistant (le module d'Young est plus élevé).Certains auteurs ont proposé des modèles statistiques reliant la densité avec les coefficients élastiques du bois (Guitard, 1987 ; Trouy-Triboulot et Triboulot, 2001). Le tableau 6 présente les classes de module d'élasticité longitudinale.

Tableau 6. Classes de module d'élasticité longitudinale d'après la norme NF B 51-008 (1987)

Valeurs de module de Young	**Qualification**
EL < 10 000 MPa	Module faible
10 000 MPa< EL < 15 000 MPa	Module moyen
EL > 15 000 MPa	Module élevé

II.7.5. Contrainte de rupture en compression

La contrainte de rupture en compression axiale est déterminée sur des bois à 12 % d'humidité selon la procédure définie dans la norme NF B 51-007(1985). Elle correspond à la contrainte (exprimée en MPa) qu'il est nécessaire d'appliquer suivant la direction du fil du bois jusqu'à la rupture d'une éprouvette de dimension standard (Gérard *et al*., 2016).Le tableau 7 présente les classes de contrainte en compression axiale.

Tableau 7. Classes de contrainte en compression axiale d'après la norme NF B 51-007(1985).

Classes de contrainte	Qualification
C ≤ 45 MPa	Contrainte faible
45 MPa ≤ C ≤ 75 MPa	Contrainte moyenne
C ≥ 75 MPa	Contrainte élevée

La masse volumique est le principal facteur d'évaluation des propriétés mécaniques du bois sans défaut car elle permet de mesurer la quantité relative de matériau solide de la paroi cellulaire (Passarini, 2015).La compression axiale augmente presque linéairement avec l'augmentation de la masse volumique (Bowyer *et al.* 2007). La figure 18 met en évidence la relation directe entre contrainte de rupture en compression et densité établie sur 984 essences.

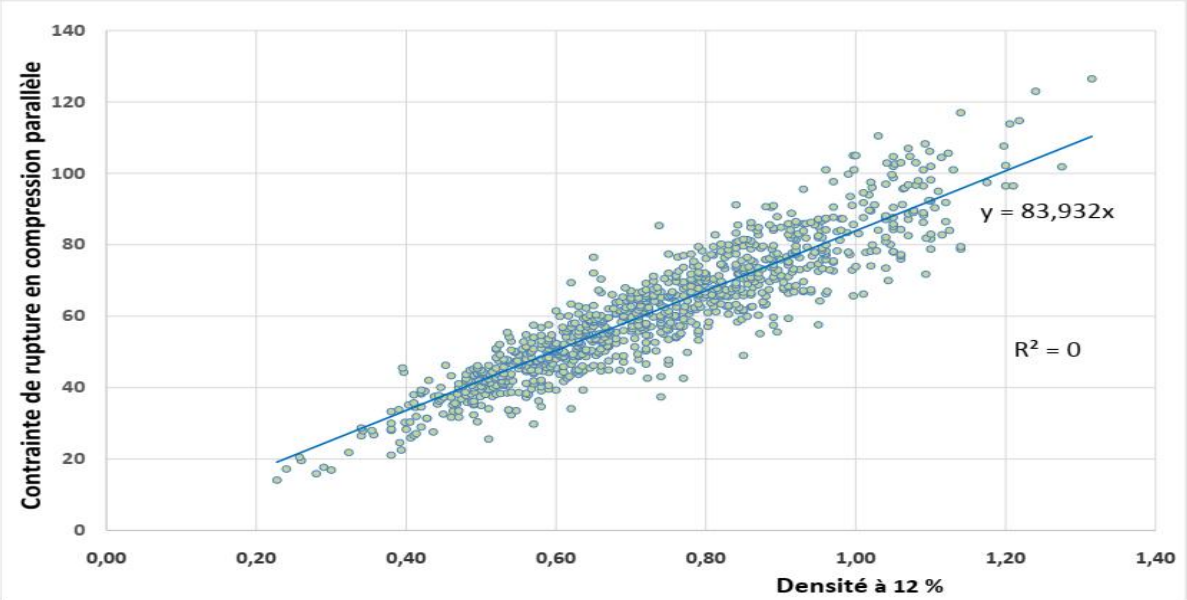


Figure 18. Relation entre contrainte de rupture en compression et densité (Cirad, 2021).

II.8. Durabilité naturelle du bois

En tant que biomatériau, le bois est susceptible d'être altéré par des agents de dégradation abiotiques et biotiques tels que les bactéries, les champignons lignivores et les insectes. Au delà de la connaissance des propriétés physico-mécaniques du bois, l'étude de la durabilité naturelle du bois est très importante car cette caractéristique est prépondérante pour déterminer les possibilités d'utilisation d'un bois en milieu extérieur exposé.

La durabilité naturelle du bois est définie comme étant la résistance intrinsèque du bois aux attaques des agents biologiques de détérioration sans traitement chimique ou physique de protection préalable (Dulbecco et Luro, 2001).La durabilité naturelle d'un arbre est la résultante des effets du patrimoine génétique d'un individu et des conditions environnementales dans lesquelles il s'est développé (Nascimento *et al*., 2013).Quelle que soit l'essence, l'aubier est toujours considéré comme non durable. Lorsque l'on qualifie la durabilité d'un bois, il s'agit de la durabilité du duramen d'une essence (EN 350, 2016).

Les bois présentant des thylles ou les bois à forte densité et à fort taux de lignine peuvent être plus durables, mais c'est la présence et la concentration en extractibles qui déterminent une durabilité naturelle globalement élevée (Thévenon, 2015).Les composés montrant une activité antifongique et termicide sont le plus souvent des composés phénoliques tels que les flavonoïdes, stilbènes, quinones et tanins. Certains terpènes comme les acides résiniques ou les tropolones présentent des propriétés biocides (Haluk et Roussel, 2000).

Pour évaluer la durabilité naturelle, on peut réaliser des essais de champ (bois au contact du sol).Ce type d'essai présente l'avantage d'être réalisé en plein air, prenant en compte les facteurs environnementaux. L'inconvénient de cette méthode est que les essais durent très longtemps.

Il existe des essais en laboratoire basés sur des pertes de masses d'échantillons de bois exposés à l'attaque des différents agents d'altération du bois. Dans ce cas, les résultats sont obtenus assez rapidement (seize semaines pour les champignons lignivores et huit semaines pour les termites) (EN 350, 2016).

II.8.1. Agents de détérioration

Les êtres vivants susceptibles de dégrader le bois sont de trois types (Fougerousse, 1960) :

- Les micro-organismes ;
- Les insectes, responsables de la piqûre ou vermoulure ;
- Certains animaux (térébrants marins), appartenant aux mollusques et aux crustacés.

II.8.1.1. Les champignons lignivores

Ces champignons causent la dégradation irréversible de toutes les propriétés (physiques, mécaniques et chimiques) du bois. Il existe trois types de pourriture : la pourriture brune dite cubique, la pourriture blanche dite fibreuse et la pourriture molle.

II.8.1.1.1. La pourriture brune

La pourriture brune est causée par des champignons de la classe des basidiomycètes. Ces champignons attaquent particulièrement le bois des résineux. C'est la cellulose qui disparait et il ne subsiste que la lignine.

Ils se développent à un taux d'humidité moyen se situant entre 30 % et 50 % et une température entre 23 °C et 25 °C (Dirol et Déglise, 2001). Après attaque, le bois prend une couleur brune et on observe un délitage cubique (figure 19). La couleur brune du bois est typique de la lignine non dégradée. La mérule (*Serpula lacrymans*), le coniophore des caves (*Coniophora puteana*) et les lenzites (*Gloeophyllum* spp.) sont les champignons de pourriture cubique les plus commun (Thévenon, 2015).

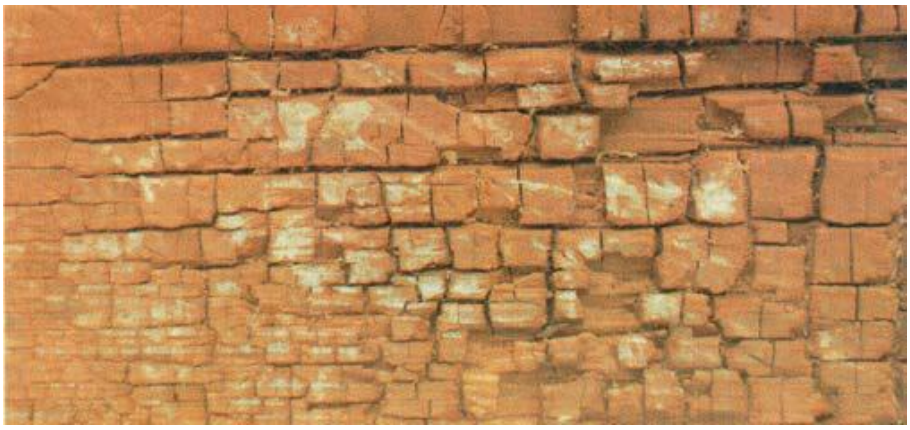


Figure 19. La mérule : aspect du bois dégradé en « petits cubes » (Chapelet *et al*., 1991).

II.8.1.1.2. La pourriture molle

La pourriture molle est causée par les champignons de la classe des deutéromycètes et ascomycètes. Ce type de champignon dégrade les bois qui sont soumis à une humidité élevée. Cette pourriture se rapproche beaucoup de la pourriture brune car les agents responsables de cette pourriture dégradent la cellulose mais dégradent moins la lignine (figure 20). Elle peut apparaître lorsque le bois est mis en contact avec le sol (poteaux en bois utilisés pour le transport d'électricité) ; elle dégrade particulièrement les bois feuillus (Mbang, 2004) et se développe à un taux d'humidité d'environ 60 % mais à température variable (Dirol et Déglise 2001).

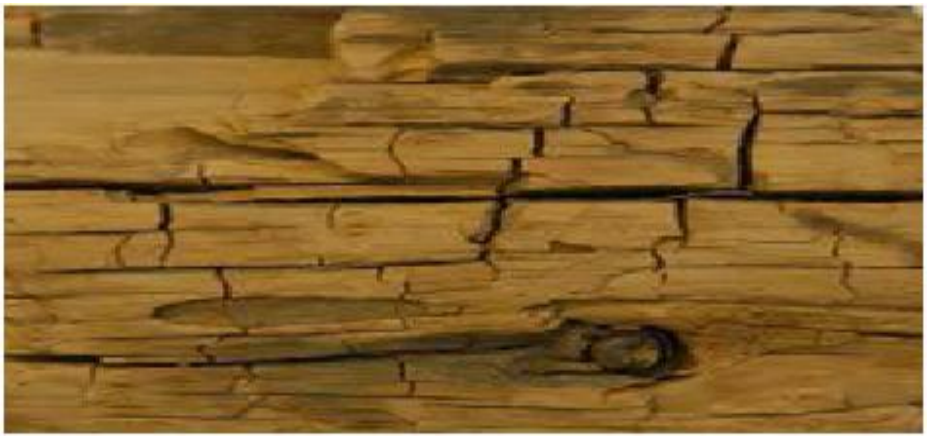


Figure 20. Observation macroscopique d'un bois altéré par la pourriture molle (Colling, 2002).

II.8.1.1.3. La pourriture blanche

La pourriture blanche est causée par les champignons de la classe des basidiomycètes et ascomycètes (Anke *et al*., 2006). Elle attaque plus particulièrement les bois feuillus.

La lignine et la cellulose sont dégradées simultanément (bois ramolli, blanchâtre et se décompose en fibrilles) (figure 21). Ces champignons se développent à un taux d'humidité supérieur à 40 % avec une température de 28 °C (Dirol et Déglise, 2001). La vitesse de dégradation varie selon les espèces et selon l'essence (Skyba *et al*., 2013).

Selon la nature du polymère attaqué, deux types de dégradation peuvent être distingués (Kirk and Cullen, 1998) : la ≪ dégradation simultanée ≫ où la cellulose, les hémicelluloses et la lignine vont être dégradées en même temps (comme pour *Trametes versicolor*) et la ≪ dégradation sélective ≫où les hémicelluloses et la lignine vont être dégradées en premier lieu provoquant un processus de délignification (comme pour *Ceriporiopsis subvermispora*). Il existe également des champignons comme *Heterobasidion annosum* capables d'induire les deux types de dégradation. Certains champignons de pourriture blanche font des associations mutualistes avec des bactéries pour dégrader les extractibles hydrophobes (Dorado *et al*., 2001).

Figure 21. Attaque du bois par la pourriture fibreuse (Colling, 2002).

II.8.1.2. Les champignons lignicoles

Ces champignons appartiennent à la classe des Ascomycètes, Ils se nourrissent de substances de réserve du bois, tels que l'amidon, présent dans l'aubier des résineux et des feuillus. Ils ne dégradent pas les constituants cellulaires, et les propriétés mécaniques du bois ne sont pas altérées. Ils provoquent uniquement une coloration et un désordre esthétique (Findlay, 1967). Ils comprennent les moisissures, les champignons de bleuissement et les échauffures.

II.8.1.2.1. Les moisissures

Les moisissures se développent en surface des bois humides ce qui provoque des taches colorées superficielles, généralement de couleur bleu-verdâtre éliminables par brossage après séchage (Damay, 2014).

II.8.1.2.2. Les champignons de bleuissement

Ces champignons se développent exclusivement à la surface du bois et se nourrissent des substances de réserves telles que l'amidon contenu dans l'aubier, sans altérer les propriétés mécaniques du bois (Raysal, 2004).

II.8.1.2.3. Les échauffures

Les échauffures, désordre tout d'abord esthétique qui peut évoluer en pourriture fibreuse provoquant alors une dégradation de la matière et des pertes de propriétés mécaniques (Thévenon, 2015). Elles se présentent sous forme de tâches plus ou moins petites et blanchâtres, jaunâtres, rougeâtres ou brunâtres suivant la nature du bois ou l'espèce de champignon. Ce sont des champignons basidiomycètes appartenant en général au genre *Stereum,* qui se développent à un taux d'humidité très élevé, supérieur à 80 %, avec une température optimale entre 25 et 28 °C (Courtecuisse et Duhem, 1994).

II.8.1.3. Les bactéries

Les bactéries principalement anaérobies se trouvent souvent dans les bois saturés d'eau, immergés ou en contact avec le sol. La dégradation des bois est très lente, moins destructrice que celle due aux champignons et se développent dans des conditions très particulières.
Les bactéries creusent de véritables tunnels dans la paroi S2. Elles n'ont qu'un effet très modéré sur les propriétés mécaniques du bois (Thévenon, 2015).

II.8.1.4. Les insectes xylophages

Il existe deux types d'insectes xylophages :

II.8.1.4.1. Les insectes de bois frais

Ils envahissent surtout les arbres malades ou les bois abattus lorsque l'humidité du bois dépasse 30 %. Les différents bostryches en font partie (Colling, 2002). Les insectes adultes creusent des galeries plus ou moins ramifiées et profondes (diamètre de 1 à 3 mm) pour y pondre. Les larves, issues des œufs, commencent leur développement dans des bois dont le taux d'humidité est encore élevé (Thévenon, 2015).

II.8.1.4.2. Les insectes de bois sec

Ils sont particulièrement dangereux pour le bois mis en œuvre dans la construction, peuvent dégrader le bois mis en œuvre dont l'humidité est comprise généralement entre 7 et 18 %.

Les plus connus sont le capricorne de maison, les bostryches, l'hespérophane, les lyctus, les vrillettes et les termites (Thévenon, 2015).

Les termites sont des insectes sociaux vivant en colonies organisées en différentes castes. Ce sont les agents les plus destructeurs du bois sec, parfois surnommés fourmis blanches (figure 22). Ils se nourrissent de la cellulose du bois et de tout autre matériau (papier, carton). Il existe environ 281 genres et 2 600 espèces de termites (Abe *et al.*, 2000).

Ils sont répartis en trois catégories : les termites souterrains (famille des Rhinotermitidae, genre *Reticulitermes*, *Heterotermes* et *Coptotermes*), les termites de bois sec (famille des Kalotermitidae) et les termites arboricoles (genre *Nasutitermes*).Ils appartiennent à la classe des insectes et à l'ordre des isoptères (Thévenon, 2015;Korb, 2007). Ils se rencontrent surtout dans les pays chauds où certaines espèces construisent de grands nids en terre mâchée, les termitières, caractéristiques des plateaux tropicaux (Inward *et al*., 2007).

Figure 22. Photographies de termites ; de gauche à droite : ouvrier, soldat (Chapelet *et al*., 1991).

II.8.1.5. Térébrants marins

Lorsque le bois est immergé dans l'eau salée, il peut être attaqué par des foreurs marins (tarets ou térébrants marins) qui peuvent causer des dégradations importantes. Ces organismes sont des mollusques (tarets, pholades) ou des crustacés (*Limnoria*) ; les tarets sont les plus destructifs (Raysal, 2004).

II.8.2. Classes de durabilité naturelle

Elles sont définies par la norme EN 350 (2016) qui est un guide des principes d'essai et de classification de la durabilité naturelle du bois massif et des matériaux dérivés. La durabilité est classée en fonction des différents agents responsables des attaques biologiques. Une échelle de cinq niveaux pour les champignons lignivores et trois niveaux pour les termites est ainsi définie.

II.8.2.1. Durabilité vis-à-vis des champignons lignivores

La classification de la durabilité des champignons lignivores repose sur la perte de masse médiane la plus grande déterminée pour toutes les éprouvettes d'essai exposées à chacun des champignons d'essai. La durabilité vis-à-vis des champignons lignivores doit être déterminée à l'aide de la norme XP CEN/ TS 15083-1 pour les basidiomycètes et de la norme XP CEN/TS 15083-2 pour les champignons de pourriture molle. Le tableau 8 ci-dessous présente les classes de durabilité (DC) du bois vis-à-vis des attaques fongiques (basidiomycètes).

Tableau 8. Classes de durabilité (DC) du bois vis-à-vis des attaques fongiques (Basidiomycètes) selon XP CEN / TS 15083–1(2006).

Classe de durabilité	Description	Perte de masse (PM) en %
DC 1	Très durable	PM ≤ 5
DC 2	Durable	5 < PM ≤10
DC 3	Moyennement durable	10 <PM ≤15
DC 4	Faiblement durable	15 <PM ≤30
DC 5	Non durable	30 <PM

PM : perte de masse médiane (en %) obtenue avec le champignon le plus virulent parmi les champignons testés.

II.8.2.2. Durabilité vis-à-vis des termites

La résistance naturelle des bois vis-à-vis des termites est quantifiée par l'examen visuel de chaque éprouvette d'essai et classer tout signe d'attaque en fonction de sa localisation, son étendue et sa profondeur. Les procédures d'essai décrites dans l'EN 117 (2013) permettent d'évaluer les attaques sur une échelle de 0 à 4.Le tableau 9 présente les classes de durabilité du bois vis-à-vis des attaques de termites d'après les évaluations de l'EN 117(2013).

Tableau 9. Classes de durabilité du bois vis-à-vis des attaques de termites d'après les évaluations de l'EN 117(2013).

Classe de durabilité	Description	Note
DC D	Durable	≥ 90 % « 0 ou 1 »et au maximum 10 % «2»*
DCM	Moyennement durable	< 50 % « 3, 4»
DC S	Non durable	≥50 % «3, 4»

* 90 % des éprouvettes d'essai notées 0 ou 1, un maximum de 10 % des éprouvettes d'essai notées 2, et 0 % notées « 3 et 4»

Deuxième partie
Étude expérimentale

Chapitre III
Matériel et méthodes

III.1. Objectif des recherches

L'objectif principal des recherches engagées consiste à déterminer l'influence des facteurs stationnels sur les propriétés du bois de *Juniperus oxycedrus*. A cet égard, nous avons analysé l'influence de la variabilité des conditions climatiques et édaphiques sur les caractéristiques dendrométrique, physique, mécaniques, chimiques ainsi que la durabilité naturelle du bois vis-à-vis des champignons basidiomycètes et des termites, dans une perspective de valorisation de cette espèce pour des applications à haute valeur ajoutée.

III.2. Origine du matériel végétal

Deux stations très différentes par leurs conditions édaphiques et climatiques et où le genévrier oxycèdre est bien représenté ont été choisies : la station de Moulay Slissen dans la région de Sidi bel Abbès et la station de Medroussa dans la région de Tiaret (figure 23). Afin de mettre en évidence l'influence des conditions de croissances locales sur les propriétés du bois, ces deux provenances ont été choisies principalement du fait de leurs conditions écologiques spécifiques qui impactent la croissance des arbres (altitude, climat et nature du sol). Compte tenu du manque des données climatiques sur les lieux de prélèvement, nous avons présenté les caractéristiques climatiques à partir des wilayas de nos sites. Les caractéristiques climatiques des deux régions d'étude sont déterminées à partir des données météorologiques pour la période 1999 - 2019.

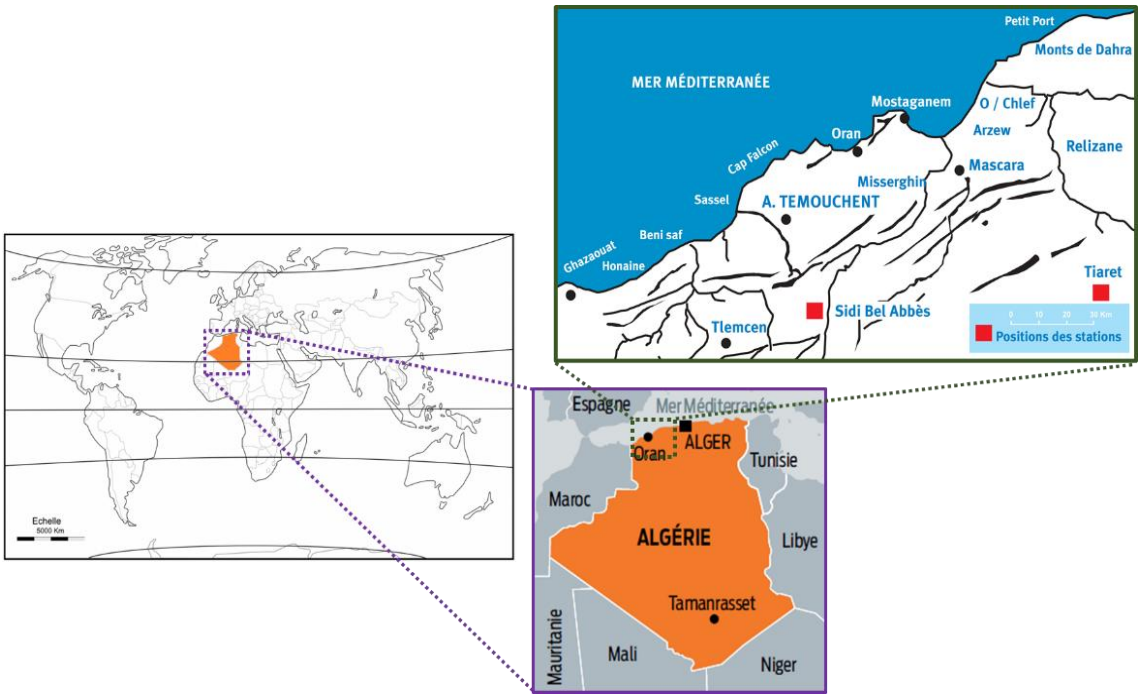


Figure 23. Localisation des deux régions de prélèvement des échantillons de *Juniperus oxycedrus* dans le Nord-Ouest de l'Algérie (Boudouaya *et al.*, 2015).

*** Wilaya de Sidi Bel Abbès**

La wilaya de Sidi Bel Abbès borde la partie méridionale occidentale du Tell algérien, située au nord-ouest du pays. Elle occupe une position centrale stratégique et s'étend sur environ 15 % de l'espace régional soit environ 9150 km^2 (Kechar *et al*., 2016). Il s'agit d'une zone de type agro-sylvo-pastorale présentant une large gamme de richesses naturelles. Elle est réputée pour son patrimoine forestier qui fait d'elle l'une des wilayas les plus boisées du pays (Bouguenaya, 2014).Elle appartient à l'étage bioclimatique semi-aride à tendance continentale avec des hivers humides et froids, des étés secs et chauds, et des saisons intermédiaires courtes (Bennabi *et al*., 2012).

Sidi Bel Abbès affiche une température annuelle moyenne de 17,3 °C (moyenne minimum de 9 °C en janvier et moyenne maximum de 27.2 °C en août). Sur l'année, la précipitation moyenne est de 427 mm, avec une amplitude de 61 mm entre le mois le plus sec et le mois le plus humide (Web master).

Le massif forestier occupe une superficie de 205 672 hectares regroupant d'importants massifs forestiers dont les plus importants sont situés sur les monts de Dhaya :

- Forêt domaniale de Zegla : 57558 ha
- Forêt domaniale de Slissen : 16155 ha
- Forêt domaniale de Toumiet : 15316 ha
- Forêt domaniale de Bouyetas : 14565 ha
- Forêt domaniale de Touazizine : 13221 ha
-Forêt domaniale de Beni Lmathar : 13179 ha

(CFS, 2020)

Les formations forestières sont reparties comme suit : forêts (32 %), maquis arboré (24 %) et maquis (44 %).Les espèces forestières sont le pin d'Alep (96,6 %), les Eucalyptus (1,9 %) et l'ensemble Chêne vert -Thuya (1,5 %)(CFS, 2021).Les espèces du maquis sont le Chêne kermès, le Genévrier oxycèdre, le Lentisque, le Thuya, et le Chêne vert (DGF, 2008). La figure 24 représente la carte de végétation des formations forestières de la wilaya de Sidi Bel Abbès.

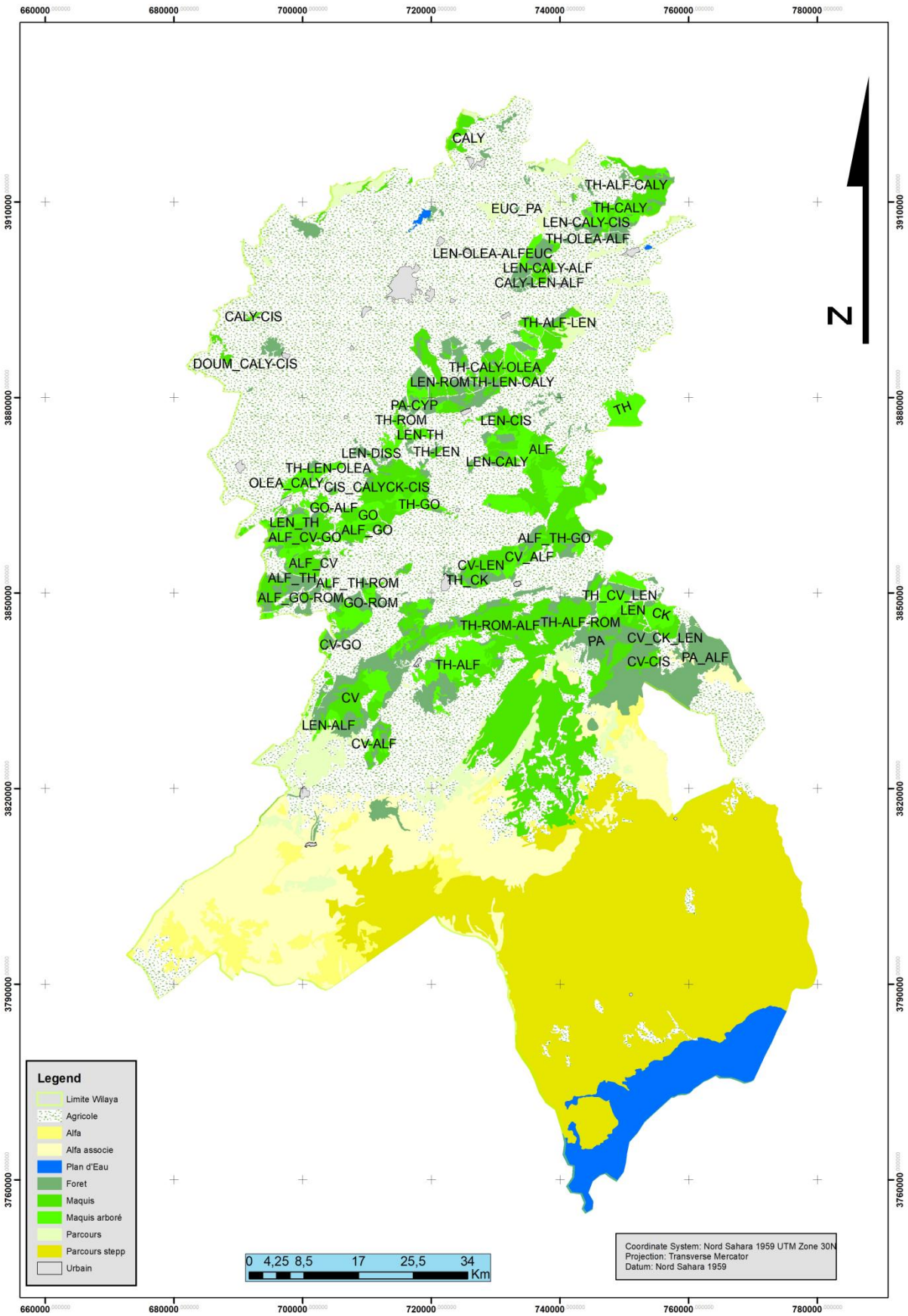


Figure 24. Carte de végétation des formations forestières de la wilaya de Sidi Bel Abbès (IFN, 2006).

***Wilaya de Tiaret**

Le deuxième lieu de prélèvement des spécimens de *Juniperus oxycedrus* est la wilaya de Tiaret, située au nord-ouest du pays, et qui couvre une superficie de 20 399 km^2.Elle constitue une zone de contact entre le Tell oranais et le Tell algéro-constantinois, d'une part, et entre le Tell méditerranéen et les hautes plaines steppiques, d'autre part. Ce territoire bien contrasté est constitué de zones montagneuses forestières au nord, de plaines agricoles sur les piémonts et d'espaces steppiques plus au sud (Miara *et al*., 2018).Il appartient à l'étage bioclimatique semi-aride inférieur, avec des hivers rigoureux et des étés chauds et secs (Achir et Hellal, 2016).

Tiaret affiche une température annuelle moyenne de 15,5 °C (moyenne minimum de 6,2 °C en janvier et moyenne maximum de 26,9 °C en juillet). La précipitation annuelle moyenne est de 472 mm, avec une moyenne minimum de 9 mm en juillet et une moyenne maximum de 57 mm en mars (Web master)

Le massif forestier occupe une superficie de154 200 ha, soit 8 % de la superficie totale de la wilaya. Il est réparti en quatre principaux grands massifs:

-Le massif des Sdamas Chergui

-Le massif des Sdamas Gharbi

-Le massif des forêts de Tiaret

-Le massif de Nador

(CFT, 2018).

Les principales essences forestières sont le Pin d'Alep, le Chêne vert, le Thuya, les Eucalyptus, et le Genévrier oxycèdre (figure 25).

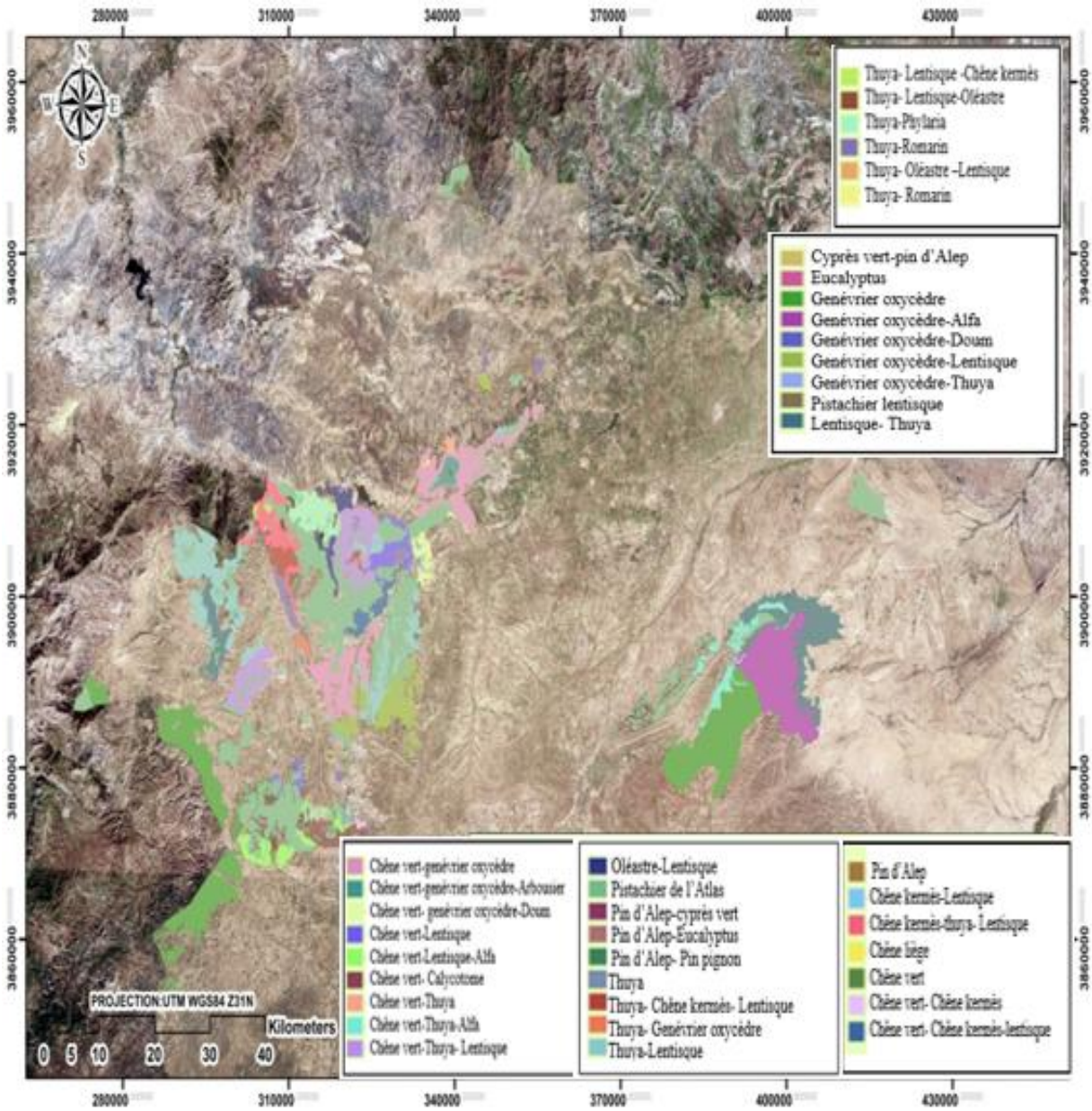


Figure 25. Carte de végétation des formations forestières de la wilaya de Tiaret (CFT, 2018).

III.3. Caractéristiques des sites de prélèvement

L'analyse de la composition floristique et le prélèvement du sol au niveau de la rhizosphère (soit 30 cm en moyenne) ont été réalisées dans chacune des deux stations. L'analyse physico-chimique du sol a été effectuée au sein du laboratoire du sol de la Division Agrosystème ouest de l'INRAA à Sidi Bel Abbès. Des analyses physicochimiques (texture, conductivité électrique, pH, calcaire total, calcaire actif et matière organique) réalisées selon les méthodes décrites par Aubert (1978) ont mis en évidence des différences entre les natures des sols des deux stations étudiées.

III.3.1. Station de Moulay Slissen

La commune de Moulay Slissen est située à 46 km au sud du chef-lieu de la wilaya. Elle couvre une superficie de 192 km^2.La forêt de Moulay Slissen fait partie du grand massif du Télagh, situé à 5 km à l'ouest du chef lieu de la commune de Mouley Slissen. Notre station d'étude fait partie de la forêt domaniale de Moulay Slissen. Elle se situe à 890 m d'altitude (34º 46´ 11´´ de latitude nord et 0º 47´ 48´´ W de longitude est).Dans cette station, l'essence principale est le Pin d'Alep (*Pinus halepensis*). Le *Juniperus oxycedrus* est considéré comme une essence secondaire. La strate herbacée est dominée par l'Alfa (*Stipa tenacissima*).Le sol est caractérisé par une texture de type limono-sableux, peu calcaire, non salé, pauvre en matière organique, avec un pH légèrement alcalin. La figure 26 représente le type de sol profond rencontré dans la station de Mouley Slissen.

Figure 26. Type de sol profond dans la station de Moulay Slissen (photo Ouaar, 2018).

III.3.2. Station de Medroussa

La commune de Medroussa est située à 25 km au sud-ouest du chef-lieu de la wilaya. Elle couvre une superficie de 219 km².La forêt domaniale de Medroussa fait partie de la forêt de Sdamas Chergui et s'étend sur une superficie de 9396 ha. Elle est située à 4 km au nord-ouest du chef lieu de la commune de Medroussa. Notre station d'étude qui fait partie de la forêt domaniale de Medroussa se situe à1037m d'altitude (35º 11´ 22´´ de latitude nord et 1º 09´ 06´´ de longitude est).Cette station est caractérisée par la présence de *Juniperus oxycedrus* avec quelques sujets de Chêne Kermès (*Quercus coccifera*).Cette formation à dominance arbustive est représentée par le Pistachier lentisque (*Pistacia lentiscus*) et le Filaire à feuilles étroites (*Phillyrea augustifolia*).La strate herbacée est composée essentiellement de Ciste épineux (*Calycotome intermedia*) et de Romarin (*Rosmarinus officinalis*).Le sol est

caractérisé par une texture de type limoneux, caillouteux, fortement calcaire, non salé, très pauvre en matière organique et avec un pH légèrement alcalin. La figure 27 représente le type de sol caillouteux rencontré dans la station de Medroussa.

Figure 27. Type de sol caillouteux dans la station de Medroussa (photo Ouaar, 2018).

III.4. Les critères de sélection des arbres

Le choix s'est porté sur des arbres non fourchus, bien venants, aux troncs sans défaut avec un diamètre compris entre 12 et 21cm (arbres considérés comme mature) et d'une hauteur comprise entre 2,70 et 4 m. Dans chacune des deux régions, **nous avons sélectionné quatre arbres** en abattant chacun à 40 cm au-dessus du sol. Cette hauteur a été sélectionnée pour faciliter la technique d'abattage manuel. Sur chaque arbre des deux peuplements, nous avons mesuré la circonférence à la base (en cm) et la hauteur totale de l'arbre. L'âge moyen des arbres a été estimé entre 73 et 130 ans. Le tableau 10 présente les données dendrométriques des arbres.

Tableau 10. Données dendrométriques des arbres.

Provenance	Exposition	Numéro d'arbre	Âge (ans)	Hauteur d'un tronc (m)	Diamètre (cm)
Sidi Bel Abbès (région de Moulay Slissen	Nord	1	120	1,8	21,02
		2	130	1,5	20,06
		3	73	1,7	12,80
		4	80	1,6	14,01
Tiaret (région de Medroussa)	Nord-ouest	1	78	1,5	13,37
		2	78	1,4	13,50
		3	128	1,5	18,80
		4	92	1,7	15,28

Pour simplifier l'écriture, nous utiliserons les symboles "S" et "T" pour indiquer respectivement la provenance Sidi Bel Abbès et Tiaret, les chiffres de 1 à 4 pour désigner les arbres.

III.5. Age du bois et largeur moyenne des cernes

L'âge des arbres a été déterminé à la loupe binoculaire simple sur les tranches de bois découpées transversalement dans chaque plateau, en comptant le nombre d'accroissements annuels depuis la moelle jusqu'à l'écorce (figure 28).Une deuxième lecture plus approfondie et systématique a été effectuée sur sections transversales numérisées après ponçage.

Figure 28. Comptage manuel des cernes à la loupe binoculaire (photo Ouaar, 2018).

La largeur moyenne des cernes, qui est un bon indicateur de la vitesse de croissance, a été déterminée par la mesure de la largeur du plus grand nombre de cernes sur un rayon tracé sur la section rapportée au nombre de cernes présents sur l'axe de mesure.

III.6. Mesure des proportions d'aubier

La proportion d'aubier a été déterminée sur des tranches de bois de 1cm sur tous les individus de l'échantillonnage pour lesquels ont été réalisées les lectures de cernes. La limite entre l'aubier et le duramen est bien distincte à l'œil nu (Figure 29). Pour chaque tranche, les rayons complets de la moelle à l'écorce et les largeurs d'aubier ont été mesurés à l'aide d'une règle au 1 mm près. En conséquence, le pourcentage d'aubier(P) sur chaque tranche est déduit suivant la formule suivante :

$P = \frac{RA}{RT}$X100

Avec

RA : largeur d'aubier rapporté au rayon

RT: rayon de la moelle jusqu'à l'écorce (rayon total)

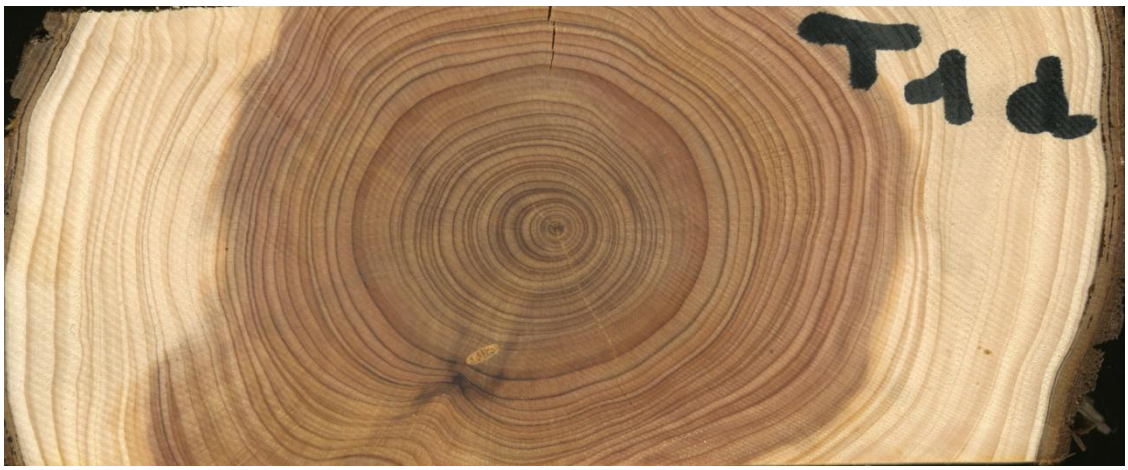


Figure 29. Tranche de Genévrier oxycèdre pour la détermination du pourcentage d'aubier (photo Ouaar, 2018).

III.7. Préparation des éprouvettes

Compte tenu du faible diamètre des arbres et de la structure irrégulière du bois, les essais sont réalisés sur des éprouvettes de dimensions plus petites que les dimensions standards pour les essais physico-mécaniques, soit 18 x 18 mm de section au lieu de 20 x 20 mm, et de dimension 25 x 10 x 5 mm suivant les directions L, R, T pour l'étude de la durabilité naturelle vis-à-vis des termites et des champignons. Les délignures et éprouvettes déclassées sont utilisées pour la détermination des taux de constituants chimiques.

Dans chacun des arbres abattus, nous avons prélevé un billon de 50 cm. Pour chaque billon, un plateau central diamétral d'épaisseur 5 cm a été débité à l'aide d'une tronçonneuse dans l'entreprise Transbois (Sidi Bel Abbès).Les plateaux ont été stockés sous abri pendant un mois avant d'être transportés au Cirad (Montpellier, France). Au Cirad, ces plateaux ont été débités en ébauches d'éprouvettes à l'aide d'une scie à ruban après que l'emplacement de chaque éprouvette ait été repéré et marqué sur la section transversale de son plateau d'origine. Un tel marquage permet de que les sections d'échantillons soient bien orientées radialement et tangentiellement, condition nécessaire pour assurer la validité des mesures (sections transversales des pièces sur la figure 30). Le nombre d'ébauches d'éprouvettes usinées dans chaque plateau dépend du diamètre des billons donc des arbres.

Figure 30. Ebauches d'éprouvettes (photo Ouaar, 2019).

Ces ébauches ont été conditionnées ensuite en enceinte climatique, à 20 ± 2 °C et 65 ± 5 % d'humidité relative (HR) pendant trois semaines, jusqu'à stabilisation de leur masse. Après la stabilisation, ces ébauches ont été usinées en barreaux de 18 x 18 mm^2 de section (R x T) et de longueur égale à la longueur du plateau, ceci pour les mesures de module d'élasticité longitudinal. Les éprouvettes destinées aux mesures de retrait transversal (retrait radial et retrait tangentiel) et de compression axiale ont été prélevées dans les éprouvettes de module d'élasticité longitudinal après essai (figure 31). Elles ont été triées afin d'éliminer celles qui

présentaient des défauts internes apparus après usinage. Pour la préparation des éprouvettes d'essai de durabilité naturelle vis-à-vis des champignons et des termites, les échantillons ont été découpés dans le duramen sous forme de lattes rabotées afin d'obtenir des éprouvettes de dimension 25 mm x 10 mm x 5 mm suivant les directions L, R, T.

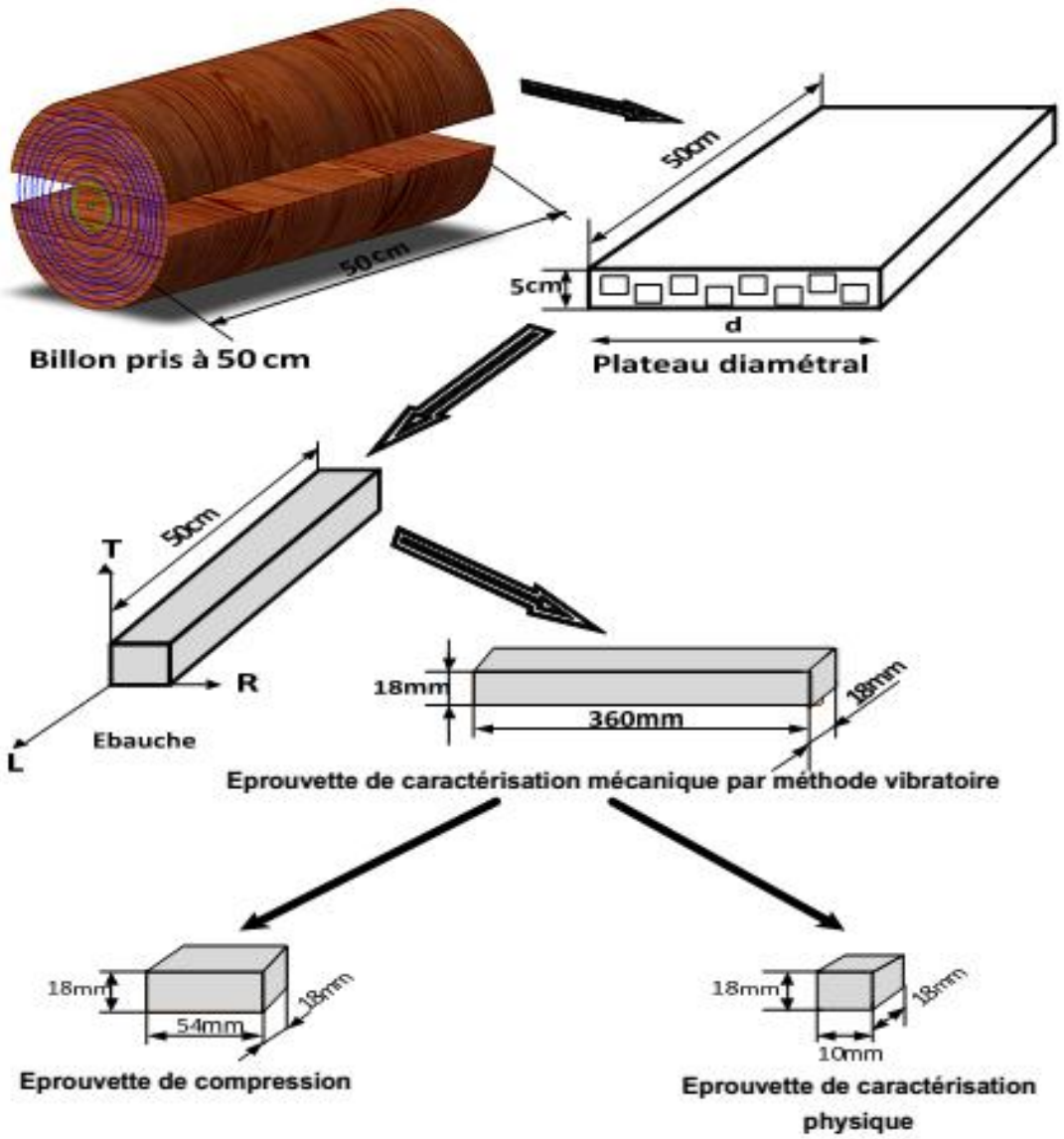


Figure 31. Schémas synoptique de découpage des éprouvettes des essais physiques et mécaniques.

III.8. Evaluation de la durabilité naturelle et de la composition en extractibles

L'étude a été réalisée sur des échantillons de bois prélevés sur deux arbres de même âge (environ 130 ans) issus des deux provenances (arbres S2 pour provenance Sidi Bel Abbès et T3 pour provenance Tiaret).Dans chaque arbre ont été prélevées 100 éprouvettes de duramen

de dimensions 25 mm x 10 mm x 5 mm (selon les directions longitudinale L, radiale R et tangentielle T). Parmi ces 100 éprouvettes, 70 ont été sélectionnées pour les essais fongiques et 10 pour les essais de résistance vis-à-vis des termites. Le reste des échantillons a été broyé puis tamisé, avec une granulométrie comprise entre 0,2 et 0,5 mm pour la détermination des fractions extractibles, et une granulométrie comprise entre 750 et 800 µm pour le dosage des polyphénols totaux. Avant chaque protocole d'essais, les échantillons (éprouvettes et poudres) ont été stockés et conditionnés en enceinte climatique, à 20 ± 2 °C et 65 ± 5 % d'humidité relative (HR).

III.8.1. Extraction et caractérisation des fractions extractibles

Les échantillons sous forme de poudres ont été séchés en étuve à 103 ± 2 °C jusqu'à stabilisation de leur masse (m_1). La procédure suivie est similaire à celle de Rowell *et al.* (2005). Les poudres de bois ont subi une extraction au soxhlet à l'eau distillée pendant 9heures, puis avec une solution toluène/éthanol (2:1, v/v, 9 h)[Carlo Erba Reagents - Val de Reuil, France](figure 32). Après chacune des extractions, les échantillons sont séchés à 103 ± 2 °C pendant 48 h, puis pesés (m_2 après extraction à l'eau ; m_3 après extraction toluène/éthanol). En parallèle, les extraits récupérés sont concentrés par évaporation à sec à l'aide d'un évaporateur rotatif (Rotavapor R-200 Büchi, Switzerland : 40 °C - 7,2 MPa pour les extraits à l'eau ; 40 °C - 9,5 MPa pour les extraits toluène/éthanol).

Les taux d'extractibles sont déterminés par les formules suivantes :

$$\text{Ext.}_{eau}\ (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \qquad (1)$$

$$\text{Ext.}_{tol/eth}\ (\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times 100 \qquad (2)$$

avec :

Ext. $_{eau}$: taux d'extraits à l'eau en %, sur base anhydre ;

Ext. $_{tol/eth}$: taux d'extraits à la solution toluène/éthanol (2:1, v/v) en %, sur base anhydre;

m_1 : masse anhydre initiale en grammes ;

m_2 : masse anhydre après extraction à l'eau en grammes ;

m_3 : masse anhydre après extraction à la solution toluène/éthanol en grammes ;

Figure 32. Essai d'extraction des extractibles (photo Ouaar, 2018).

Les compositions chimiques des différentes fractions d'extractibles ainsi récupérées ont été analysées par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC/MS).

Ces analyses ont été réalisées sur un chromatographe en phase gazeuse TRACE™ 1300 (Thermo) équipé d'une colonne TG5-MS (5% phenyl methyl siloxane) 30 m x 0,25 mm i.d., épaisseur de film 0,25 µM (Thermo).

Le spectromètre couplé à la chaîne chromatographique est un DSQII (Thermo) équipé d'une source EI a 70eV. Le spectre de masse est enregistré entre 50 et 650 Da (m/z unité équivalente).Les injections sont effectuées en mode split 1/350.

Les caractéristiques de l'analyse sont les suivantes :

* Volume injecté : 1 µl

* Gaz porteur : hélium, avec une vitesse linéaire de 1,2ml/min

L'identification des composés a été réalisée par comparaison de leur spectre de masse avec ceux de la librairie (NIST2017 v2.3 / Xcalibur data system) associée à l'équipement.

III.8.2. Extraction et dosage des polyphénols totaux

III.8.2.1. Extraction des polyphénols totaux

Pour chaque arbre, une quantité de 50 mg de duramen broyé (granulométrie 750-800 µm) est mélangée avec, soit 1,8 ml de solution de méthanol (CH_3OH) concentré à 80 % [Carlo Erba - Val-de-Reuil, France], soit 1,8 ml de solution d'acétone (C_3H_6O) concentré à 80 % [Carlo Erba - Val-de-Reuil, France], dans un tube Eppendorf 2 ml. Les mélanges sont ensuite placés dans un bain à ultrasons et laissés à soniquer pendant une heure, tout en étant secoués toutes les dix minutes. Les tubes sont ensuite laissés à macérer pendant une heure à 4 °C à l'aide d'un agitateur rotatif (20 rpm). Après centrifugation, le surnageant contenant les polyphénols

est récupéré à l'aide d'une pipette équipée d'un cône à filtre à charbon actif, puis placé dans un tube à hémolyse.

Une deuxième extraction identique sur le culot est réalisée pour extraire des polyphénols supplémentaires. Les surnageants de ces deux extractions successives sont recueillis dans le même tube à hémolyse. Un volume de 500 µl de surnageant est ainsi récolté, puis évaporé à sec pendant trois heures au concentrateur sous vide [Thermo Scientific Savant Speed Vac™, Thermo Fischer, United-states]. L'extraction a été réalisée selon le protocole de Boizot et Charpentier (2006).Les résidus secs sont ensuite solubilisés dans 250 µl de méthanol pur [Carlo Erba - Val-de-Reuil, France], puis stockés à 4 °C jusqu'au dosage des polyphénols totaux.

III.8.2.2. Dosage des polyphénols totaux

Le dosage des polyphénols totaux au réactif de Folin-Ciocalteu [Folin-Ciocalteu's phenol reagent 2N, Sigma-F 9252, Saint Quentin Fallavier] a été réalisé selon la méthode décrite par Singleton et Rossi(1965). En milieu alcalin, les polyphénols réagissent avec le mélange phosphomolybdique/phosphotungstique du réactif de Folin-Ciocalteu pour former un complexe bleu visible à 735 nm. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de polyphénols présents dans l'extrait de bois. La teneur en composés phénoliques est déterminée à partir d'une gamme étalon d'acide gallique : 8 points de concentration de 0 à 20 $\mu g.ml^{-1}$;1,5 ml de solution pour chaque point de la gamme d'étalonnage en tubes Eppendorf.

Les extraits préalablement récoltés sont dilués avec de l'eau ultra pure [50µl extrait : 50µl eau]. Dans un tube Eppendorf, un volume de 500 µl de réactif de Folin-Ciocalteu (dilué 10 fois dans de l'eau ultra pure) est ajouté à 100 µl d'extrait préalablement dilué dans de l'eau ultra pure [50:50 ; v:v]. 400 µl de solution de carbonate de sodium (Na_2CO_3, 75 $g.l^{-1}$) sont ajoutés. Les tubes sont ensuite agités et placés pendant 5 minutes à 40 °C dans une étuve. Le contenu de chaque tube est déposé en triplicata à raison de 250 µl par puits sur une plaque de micro-titration à fond plat (Greiner) (Boizot et Charpentier, 2006).

L'absorbance est lue à 735 nm par un spectrophotomètre lecteur de plaques (Multiskan Spectrum Thermo) contre le blanc de la réaction. La quantité de polyphénols totaux (Q) contenue dans la poudre extraite est calculée selon la formule suivante et exprimée en mg d'équivalent acide gallique par gramme de matière sèche :

$$Q = \left(\frac{C_m}{MS}\right) \times \left(\frac{V_e}{V_s}\right) \times \left(\frac{V_r}{V_i}\right) \times F \qquad (3)$$

avec :

Q : quantité de polyphénols totaux en mg d'équivalent acide gallique par g de matière sèche ;

Cm : concentration massique en µg d'équivalent acide gallique par ml ;

MS : masse de matière sèche pesée au départ en mg ;

Ve : volume de solvant utilisé pour l'extraction en ml ;

Vs : volume de surnageant prélevé pour l'évaporation sous vide en ml ;

Vr : volume de reprise du résidu sec après évaporation en µl ;

Vi : volume utilisé pour le dosage en µl ;

F : facteur de dilution (=2).

III.8.3. Durabilité naturelle vis-à-vis des champignons et des termites

III.8.3.1. Durabilité naturelle vis-à-vis des champignons

Les essais fongiques ont été effectués en adaptant les spécifications requises par la norme XP Cen/TS 15083-1 (2006) sur des éprouvettes de duramen de dimensions 25 mm x10 mm x 5 mm (L,R,T). Deux champignons lignivores de type pourriture cubique ont été utilisés : *Rhodonia placenta*(RP) ((Fries) Cooke sensu J. Eriksson, strain FPRL 280) et *Coniophora puteana*(CP) ((Schumacher ex Fries) Karsten, strain BAM Ebw.15) (Boudouaya *et al.*, 2015 ; Bopenga, 2020).

Pour chaque provenance, trente éprouvettes de duramen (conditionnées à 20 ± 2 °C et 65 ± 5 % HR) ont été soumises à *Coniophora puteana* et à *Rhodonia placenta.* Dix éprouvettes de calcul de teneur en humidité ont également été utilisées pour déterminer les masses anhydres des éprouvettes testées vis-à-vis des champignons (m_4). Huit éprouvettes de Hêtre [*Fagus sylvatica* L.] et huit éprouvettes d'aubier de Pin sylvestre [*Pinus sylvestris* L.] de mêmes dimensions ont été utilisées comme témoins de virulence pour les deux champignons de pourriture cubique. Ces éprouvettes de contrôle de virulence ont été séchées à 103 ± 2 °C, jusqu'à stabilisation de leur masse anhydre (m_4), avant d'être soumises aux essais fongiques. Toutes les éprouvettes ont été stérilisées deux fois à la vapeur d'eau avant essai.

Des flacons en verre (720 ml) ont été remplis de 72 ml de milieu de culture, composé de 40 ± 0,5 g de malt en poudre et de 20 ± 0,5 g d'agar-agar pour 1 litre d'eau distillée. Les flacons fermés ont été ensuite stérilisés à l'autoclave (121 °C - 1 bar) pendant 20 minutes .Lorsque les milieux de culture sont refroidis et gélifiés (après 24h), les flacons sont inoculés avec 2 disques de mycélium de 1 cm de diamètre, provenant d'une culture de champignon âgée de 2 semaines, puis placés en chambre climatique (22 ± 2 °C et 70 ± 5 % HR) jusqu'à ce que le mycélium recouvre l'ensemble de la surface du milieu de culture (2 semaines).

Dans chaque dispositif, 4 éprouvettes d'une même essence de bois sont déposées sur des supports métalliques préalablement stérilisés à l'autoclave (figure 33 a) afin de limiter la

reprise excessive d'humidité. Les dispositifs sont ensuite placés à l'obscurité en enceinte climatique (22 ± 2 °C et 70 ± 5 % HR) pendant 8 semaines (figure 33 b).

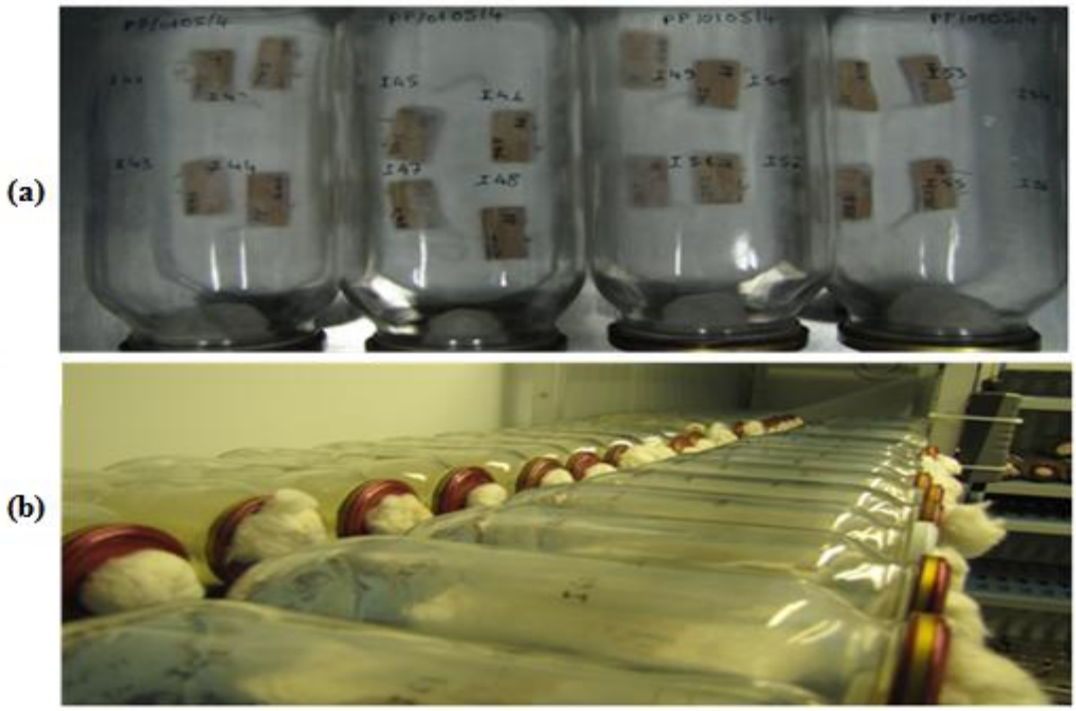


Figure 33. Exposition des éprouvettes de bois aux champignons (a) et incubation des éprouvettes dans une enceinte climatique pendant 8 semaines(b) (photo Thévenon, 2019).

A la fin de la période d'incubation (figure 34), les éprouvettes de bois sont retirées des dispositifs d'essais, nettoyées avec une brosse douce, et pesées immédiatement afin de déterminer leur masse humide (m_5) (figure 35).

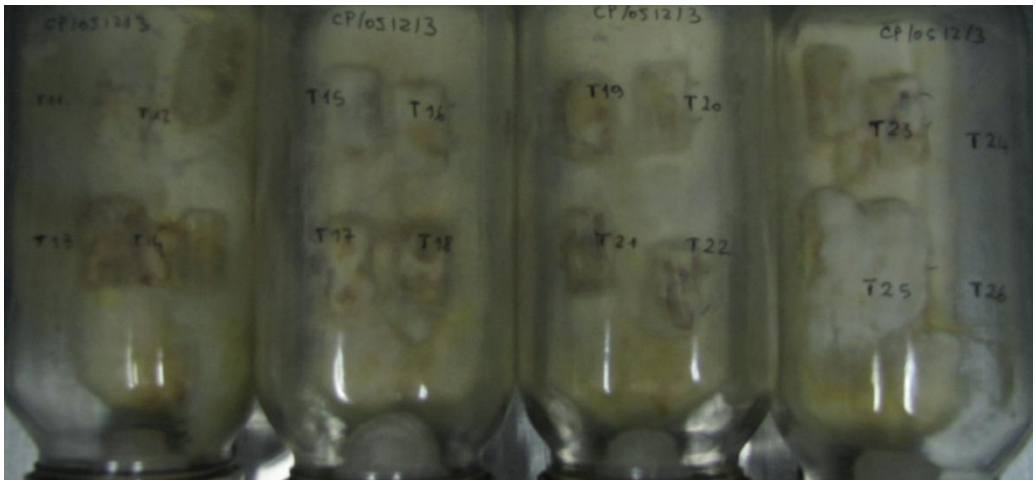


Figure 34. Eprouvettes de bois après 8 semaines d'incubation dans une enceinte climatique (photo Thévenon, 2019).

Figure 35. Nettoyage des éprouvettes avec une brosse douce (photo Thévenon, 2019).

Les échantillons sont ensuite séchés à l'étuve à 103 ± 2 °C pendant 24 h, puis pesés afin de déterminer leur masse anhydre finale (m_6) (figure 36).

L'humidité en fin d'essai (H) et la perte de masse des échantillons (PM) sont déterminées par les formules suivantes :

$$H(\%) = \frac{(m_5 - m_6)}{m_6} \times 100 \qquad (4)$$

$$PM\ (\%) = \frac{(m_4 - m_6)}{m_4} \times 100 \qquad (5)$$

avec :

H : teneur en humidité des éprouvettes exposées aux champignons, en grammes ;

PM : perte de masse des éprouvettes exposées aux champignons, en grammes (sur base anhydre) ;

m_4 : masse anhydre initiale, en gramme ;

m_5 : masse humide après exposition fongique, en gramme;

m_6 : masse anhydre après exposition fongique, en gramme.

Selon la norme XP CEN / TS 15083–1(2006), les valeurs médianes des pertes de masses ainsi déterminées permettent de déterminer la classe de durabilité naturelle des bois testés.

Figure 36. Pesée des éprouvettes après exposition fongique (photo Thévenon, 2019).

III.8.3.2. Durabilité naturelle vis-à-vis des termites

Les essais de résistance aux termites ont été réalisés par une méthode de test rapide (screening test) de non-choix en boîte de Pétri, adaptée de la norme EN 117 (2013). Pour chaque provenance de bois, 10 éprouvettes de duramen de dimension 25 mm x10 mm x 5 mm (L, R, T), préalablement conditionnées en enceinte climatique (20 ± 2 °C et 65 ± 5 % HR), ont été testées vis-à-vis de l'attaque de termites de l'espèce *Reticulitermes flavipes* (ex. *santonensis*).

Une quantité de 30 g de sable de Fontainebleau humide (4 volume de sable pour 1 volume d'eau) a été placée sur la périphérie de la boite de Pétri de 9 cm de diamètre. Dans chaque dispositif d'essai, 50 termites ouvriers, 1 soldat et 1 nymphe ont été introduits. L'échantillon de bois à tester est placé au centre de la boîte, sur une grille en plastique afin d'éviter le contact direct avec le plastique et de limiter l'absorption d'humidité. Les dispositifs sont placés dans l'obscurité en enceinte climatique à 27 ± 2 °C et à une humidité relative supérieure à 75 %, pendant 4 semaines (figure 37). Des contrôles réguliers des dispositifs d'essais (suivis des comportements des termites et réhumidification du sable si nécessaire) ont été réalisés deux fois par semaine.

Dans ces mêmes conditions, 5 éprouvettes d'aubier de Pin sylvestre [*Pinus sylvestris* L.], de dimensions 25 mm x10 mm x 5 mm (L, R, T), ont été testées en tant que témoins de virulence (figure 38).

A la fin de l'essai, les taux de survie des termites sont déterminés. Les éprouvettes sont nettoyées à l'aide d'une brosse douce, séchées à l'air libre pendant 24 h puis une cotation visuelle leur est attribuée, en fonction des critères définis dans la norme EN 117 (2013), avec une adaptation des critères à la taille des éprouvettes d'essai (Bedounguindzi *et al.*, 2020).

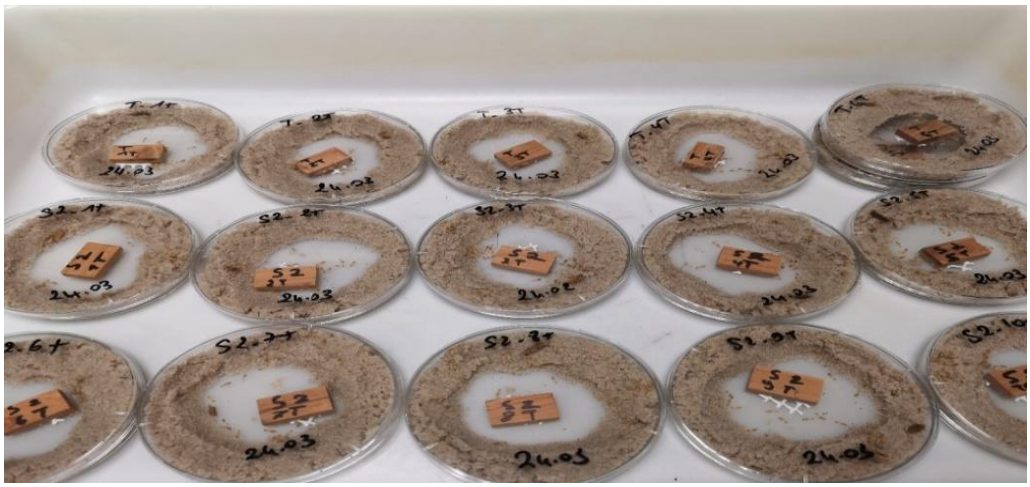


Figure 37. Exposition des éprouvettes de bois aux termites (photo Thévenon, 2019).

Figure 38. Boîte de Pétri contenant un échantillon témoin (photo Thévenon, 2019).

III.9. Dosages des macromolécules

Le dosage des macromolécules (lignines, cellulose et hémicelluloses) et des extractibles totaux a été réalisé à l'unité d'Amélioration Génétique et Physiologie Forestières de l'INRA Val de Loire d'Orléans. Les dosages ont été réalisés à partir du duramen de quatre échantillons issus des deux provenances (arbres T1, T3, S1, S2).Les échantillons du bois ont été broyés puis tamisés à l'aide d'un broyeur centrifuge équipé d'un tamis de 750 µm. La poudre de granulométrie comprise entre 75µm et 800µm a été utilisée pour les analyses.

III.9.1. Dosage des extractibles totaux

Cette étape permet d'extraire les composés solubles de la poudre de bois qui interfèrent lors du dosage des lignines et de la cellulose. On obtient ainsi les résidus pariétaux sur lesquels seront effectués les dosages de lignines et cellulose. Les échantillons ont été placés dans des sachets thermosoudables Ankom F57 de porosité 25 µm contenant environ 1g de poudre. Ces sachets ont été ensuite soudés à l'aide d'un soude-sac. Ces sachets ont été placés en étuve à 103 °C pendant une nuit puis pesés après refroidissement dans un dessiccateur. Trois sachets ont été extraits par échantillon. Huit sachets d'échantillons au maximum ont été introduits dans un erlenmeyer de 2 litres afin de subir une extraction avec sept bains successifs et alternés d'éthanol 95 % à 80 °C (1 L) et d'eau ultra-pure à 100 °C (1L). Une fois le solvant à ébullition, on compte 30 min d'extraction. Après extraction, les sachets ont été récupérés avec une pince et placés à l'étuve à 105 ˚C pendant une nuit, puis pesés après refroidissement dans

un dessiccateur. Les taux d'extractibles dans le bois ont été évalués par pesée différentielle des poudres avant et après extraction (INRA, 2019)

III.9.2. Dosage de la lignine Klason et de la lignine acide-soluble

La cellulose et l'hémicellulose des résidus pariétaux sont dégradées par attaque acide ce qui permet de récupérer la lignine insoluble Klason et la lignine acido-soluble. Une quantité de 300 mg de poudre de bois préalablement extraite a été placée dans un flacon avec 5 ml d'acide sulfurique à 72 % et laissée sous agitation pendant 2 h à température ambiante. Ce mélange a été ensuite dilué dans de l'eau ultra-pure (équivalent de 193,5 g) pour avoir une solution d'acide sulfurique à 3 %. Les flacons ont été ensuite placés dans un autoclave à 120 °C pendant une heure ce qui permet d'éclater les cellules (hydrolyse acide à chaud). La solution de chaque flacon a été filtrée sur creuset-filtre. Le filtrat a été récupéré pour le dosage de la lignine soluble par spectromètre. Les résidus solides ont été lavés avec 300 ml d'eau ultra-pure. Les creusets ont été ensuite placés à l'étuve à 105 °C pendant une nuit puis pesés. Les résultats des dosages sont exprimés en pourcentage de lignine Klason par rapport à la masse sèche de la poudre de bois. Le dosage des lignines solubles a été effectué par spectrométrie ultra-violet à 205 nm en utilisant une cuve en quartz. Une dilution au 1/20 du filtrat récupéré a été réalisée. Trois mesures d'absorbance successives ont été réalisées pour chaque échantillon (INRA, 2019). La figure 39 présente le protocole de dosage de la lignine Klason et de la lignine acide-soluble.

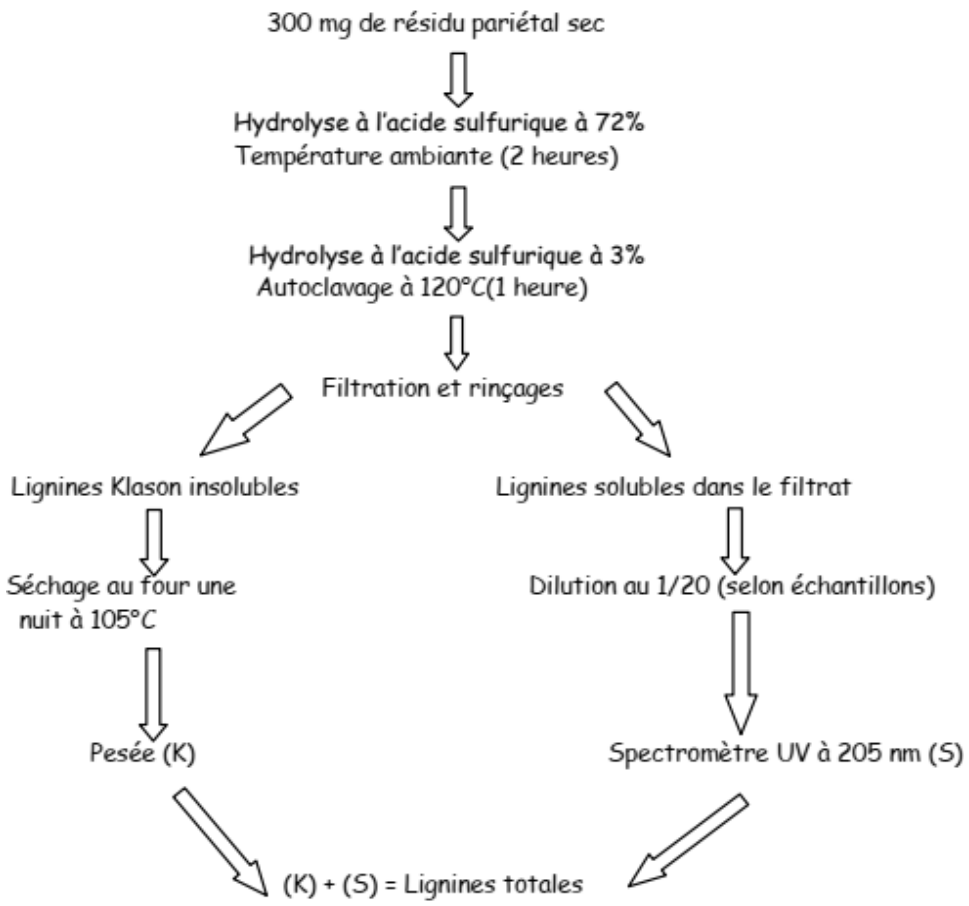


Figure 39. Schémas de dosage de la lignine Klason et de la lignine acide-soluble.

III.9.3. Dosage de l'holocellulose

Les résidus pariétaux subissent une délignification à chaud dans une solution de chlorite de sodium dans un tampon acétate pour obtenir le résidu holocellulose (cellulose + hémicellulose).Une quantité de 1g de poudre préalablement extraite a été placée dans un ballon de 250 ml. Ensuite, 80 ml de la solution de tampon acétate ainsi que 2 ml de solution de chlorite de sodium $NaCl0_2$ à 27 % ont été ajoutés dans un ballon. Ce ballon a été ensuite placé dans un bain-marie avec agitation à 76 ˚C pendant 4 heures en ajoutant toutes les heures 2 ml de solution de chlorite de sodium (soit 3 ajouts).Le mélange a été ensuite filtré dans un creuset- filtre par filtration sous vide, puis le résidu obtenu a été lavé avec 200 ml d'eau ultra-pure jusqu'à décoloration complète (blanc). Un deuxième lavage a été effectué deux fois en ajoutant 15 ml d'acétone pour éliminer les composés aromatiques issus de la dégradation de la lignine. Les creusets et la fraction holocellulose obtenus ont été mis ensuite à l'étuve à 105 ˚C pendant une nuit puis pesés. Les résultats des dosages sont exprimés en pourcentage d'holocellulose par rapport à la masse sèche de la poudre de bois ((INRA, 2019).

III.9.3.1. Dosage de l'α-cellulose

Le dosage de α-cellulose a été réalisé à partir du résidu récupéré de l'holocellulose. Ce constituant représente la phase insoluble de la cellulose en milieu alcalin. Une quantité de 800 mg d'holocellulose a été placée dans un ballon de 100 ml contenant 5 ml de solution NaOH à 17,5 %.Ce ballon a été placé sur un agitateur à température ambiante pendant 5 minutes. La même opération a été réalisée deux fois avec 2,5 ml de solution NaOH à 17,5 % toutes les 5 minutes, puis une troisième fois avec 2,5 ml de NaOH 17,5 % (soit un volume total de 12.5 ml) pendant 30 minutes. Le contenu est ensuite dilué avec 16, 5ml d'eau ultra-pure et maintenu au repos pendant 1 heure. Le mélange a été filtré sur des creusets filtres en présence de 50 ml de NaOH à 8,3 %. Le résidu α- cellulose a été lavé successivement avec de l'eau ultra-pure et 7,5 ml d'acide acétique à 10 %. Il est ensuite séché à l'étuve à 105 ˚C puis pesé. Les résultats des dosages sont exprimés en pourcentage de l'α-cellulose par rapport à la masse sèche de la poudre de bois. L'hémicellulose est calculée par différence entre l'holocellulose et l'alpha-cellulose (INRA, 2019).

III.10. Analyse minéralogique des cendres

III.10.1. Principe

Les échantillons ont été minéralisés par voie sèche suivant la méthode par double calcination.
La calcination à 500 °C permet la destruction de la matière organique sous forme de vapeur d'eau, d'oxydes de carbonate et d'azote. Les éléments minéraux liés à la matière organique restent dans les cendres sous forme d'oxydes ou de carbonates. L'analyse des éléments minéraux (potassium, calcium, magnésium, fer, sodium, phosphore) a été faite après élimination de la silice. La silice est insolubilisée par HCl et après filtration des éléments minéraux solubles, le résidu insoluble est traité à chaud par l'acide fluorhydrique qui volatilise la silice sous forme de fluorure de silicium. Les minéralisats ont ensuite été dosés par ICP-AES sur un Agilent 720 (Cirad, 2010).

III.10.2. Mode opératoire

Les essais ont été réalisés sur des disques prélevés sur les billons issus des huit arbres des deux provenances. Ils ont été broyés et homogénéisés puis séchés à 65 °C pendant 16 h. Une quantité de 2 grammes de broyat a été placée dans une capsule en platine préalablement séchée et pesée. L'échantillon et la capsule sont ensuite placés dans un four à moufles à 500 ºC pendant au moins 1h30. Le taux de cendres correspond au rapport entre la masse de cendres et la masse de broyat sec (le % de matière sèche **(%MS**) est déterminé sur mesure de

matière sèche à 105°C sur échantillon séché à 65°C). Après refroidissement, les cendres ont été humectées avec quelques gouttes d'eau et un volume de 2 ml de HCl à 37 % dilué au demi (1/2) a été additionné. Le mélange a été ensuite filtré sur filtre sans cendre avec de l'eau pure tiède, en recueillant la solution dans une fiole de 50 ml. Le filtre et son résidu ont été placés dans la capsule en platine, puis calciné pendant 30 min à 500 °C. On ajoute au résidu siliceux quelques goutes d'eau pure et 4 ml d'acide fluorhydrique (HF) à 40 %. Le mélange est ensuite évaporé à sec sur plaque chauffante à 100°C; la silice est éliminée. Le taux de silice de l'échantillon est déterminé ensuite par différence pondérale avant et après le traitement à l'acide fluorhydrique (Cirad, 2010).

Pour réaliser la détermination des éléments minéraux solubilisés, on reprend le résidu par 1 ml de HCl à 37 % dilué au demi. La filtration de cette solution a été effectuée avec de l'eau pure dans la même fiole de 50 ml. Les éléments minéraux solubilisés ont ensuite été dosés à l'aide d'un spectromètre d'émission atomique par plasma couplé par induction (ICP-AES).C'est une technique qui est utilisée pour la détermination de la plupart des éléments du tableau périodique, avec une limite de détection appréciable ($\mu g.L^{-1}$) (Cirad, 2010).

La quantification a été réalisée par étalonnage externe uniquement, en analysant une gamme de solutions de concentrations connues pour les éléments recherchés. Les solutions étalons ont été préparées à l'aide de solutions mono-élémentaires certifiées, et dans la matrice des échantillons. Pour juger de la validité de l'étalonnage, nous avons contrôlé : (a)que les intensités obtenues pour chaque élément étaient du bon ordre de grandeur ; (b) que le coefficient de corrélation était satisfaisant ; (c) que l'écart relatif entre concentration théorique et mesurée était inférieur à 5 %, avec une tolérance jusqu'à 10 % pour l'avant dernier point et 15 % pour la concentration la plus faible.

Après la vérification et validation de l'étalonnage, l'analyse des échantillons a été réalisée. Les intensités obtenues pour les éléments recherchés sont alors projetées sur les courbes d'étalonnage de chaque élément pour être traduites en concentrations massiques.

Lorsqu'un échantillon traverse le plasma, le détecteur réalise 3 mesures successives de l'intensité pour chaque élément recherché. Le résultat final correspond à la moyenne de ces 3 répliques. Ainsi, la concentration de chaque élément est considérée comme correcte lorsque le coefficient de ces 3 mesures doit être inférieur à 5 %.Le Tableau 11 montre les différentes longueurs d'onde qui ont été utilisées pour l'analyse.

Tableau 11. Longueurs d'onde (en nm) utilisées pour le dosage des éléments par ICP-AES.

Elément	Longueur d'onde (nm)
P	214,914
K	404,721 ou 769,897
Ca	430,253
Mg	285,213
Na	589,592
Fe	259,940

III.11. Propriétés physiques et mécaniques

III.11.1. Retraits transverses et point de saturation des fibres (PSF)

Un même protocole expérimental est mis en œuvre pour les mesures de retraits transverses et de point de saturation de fibre (PSF). Pour chaque provenance, le PSF a été déterminé sur 46 éprouvettes de dimensions 18 mm x 18 mm x 10 mm (selon les directions radiales R, tangentielle T, et longitudinale L) provenant des 6 arbres S1, S3, S4, T1, T2, T4. Avant de réaliser les mesures, les arêtes des éprouvettes sont ébavurées en les ponçant légèrement avec du papier de verre. Les éprouvettes sont marquées à l'aide d'un repère circulaire au centre de chaque face RL et TL afin que le palpeur du capteur soit toujours positionné au même endroit (figure 40).

Figure 40. Eprouvettes de mesures des retraits linéaires et du PSF (photo Ouaar, 2019).

Les PSF sont déterminés à partir de l'évolution de la variation surfacique des éprouvettes en fonction de leur taux d'humidité, les éprouvettes étant stabilisées en enceinte climatique successivement à des taux d'humidité différents.

Dans un premier temps, ces éprouvettes sont saturées dans l'eau distillée pendant trois jours. Elles ont été soumises à trois cycles de vide-pression dans un autoclave. Après saturation, ces

éprouvettes sont stabilisées à 85 % d'humidité relative et 30 °C (humidité d'équilibre théorique de 18 %) pendant 15 jours, puis à 65 % d'humidité relative et 20 °C (humidité d'équilibre théorique de 12 %) pendant 7 jours, puis à 30 % d'humidité relative de l'air et 20 °C (humidité d'équilibre théorique de 6 %) pendant 7 jours, et enfin à l'état anhydre dans un four réglé à 55 °C pendant 4 jours. L'état anhydre est approché par un séchage doux pour limiter la perte de masse liée au départ des produits volatils. Après chaque stabilisation, les mesures de la masse et les dimensions dans la direction radiale et tangentielle de chaque éprouvette sont effectuées à l'aide d'une balance de précision ± 0,001 g et un comparateur de précision de ±0,001 mm, respectivement. Le comparateur et la balance sont reliés à un ordinateur, le logiciel d'acquisition permet l'enregistrement des données mesurées. Sur la mesure en cours représentée sur la figure 41, la direction verticale de mesure correspond à la direction radiale "théorique" de l'éprouvette et la direction horizontale à la direction tangentielle "théorique" de l'éprouvette. L'acquisition des données se fait directement sur ordinateur.

Figure 41. Comparateur utilisé pour la mesure des dimensions suivant les directions R et T ; sur la photo, mesure suivant la direction R (photo Ouaar, 2019).

Une correction doit être appliquée aux valeurs de retrait pour toutes les éprouvettes dont les cernes ne sont pas parallèles aux cotés du fait du mode de prélèvement dans les billons de très faible diamètre et de forme irrégulière. L'inclinaison des cernes a été quantifiée à l'aide d'un rapporteur et transcrite sur un papier blanc de support.

Le retrait réel radial est déterminé selon la formule de Keilwerth :

$RR=[Tm-(Rm.\cos^2 (angle) /\sin^2 (angle))]/ [\sin^2 (angle)-(\cos^4 (angle)/\sin^2 (angle))]$

Avec :

RR : dimension réelle dans la direction radiale (mm)

Rm : dimension mesuré dans la direction radiale (mm)

TR : dimension réelle dans la direction tangentielle (mm)

Tm : dimension mesurée dans la direction tangentielle (mm)

L'erreur sur le calcul en tangentiel est compensée par celle sur le calcul en radial. Le retrait réel tangentiel (TR) est déterminé selon la formule suivante ;

TR= (Rm+Tm)- RR

La formule de Keilwerth permet d'avoir les mêmes résultats des valeurs de PSF.

Le retrait total R (Rr pour le retrait radial ou Rt pour le retrait tangentiel) est déterminé par la formule suivante :

$$R(\%) = \frac{(\mathrm{Ds} - \mathrm{Do})}{\mathrm{Ds}} \times 100$$

Ds et D_0 sont respectivement les dimensions des échantillons dans la direction considérée à l'état saturé et à l'état anhydre.

Pour chaque taux d'humidité, la variation surfacique par rapport à l'état saturé de chaque éprouvette est déterminée par la formule suivante :

V= Ss-Sh

Avec :

V : variation surfacique par rapport à l'état saturé pour l'humidité h d'équilibre du bois (mm^2)

Ss : la surface de l'échantillon à l'état saturé (mm^2)

Sh : la surface de l'échantillon à l'humidité h (mm^2)

La mesure de la masse à l'issue de chaque stabilisation permet de déterminer le taux d'humidité réel de l'éprouvette connaissant à l'issue du cycle de stabilisation sa masse anhydre.

Les mesures de dimensions et de masse effectuées à l'état saturé puis respectivement à 18 %, 12 %, 6 % et 0 % de taux d'humidité théorique après stabilisation quatre points de la courbe. Le PSF correspond à l'ordonnée à l'origine de la droite de régression Hi = f(Vi) tel que le montre pour exemple la figure 42.

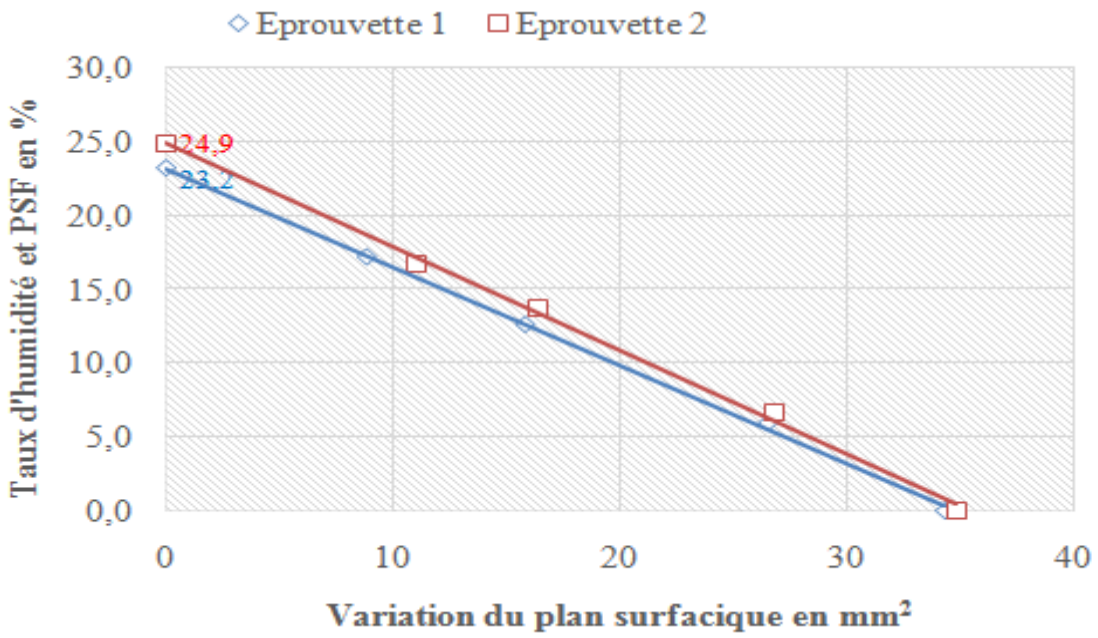


Figure 42. Exemple de détermination du PSF de deux éprouvettes de *Juniperus oxycedrus* par calcul de l'ordonnée à l'origine des courbes [Taux d'humidité] = f [Variations surfaciques]

III.11.2.Détermination du module d'élasticité longitudinal par méthode vibratoire (méthode BING®)

III.11.2.1. Méthode Bing©

Le module d'élasticité longitudinal a été déterminé à l'aide de la méthode vibratoire « Bing » (*Beam Identification by Non Destructive Grading*) (photo 24).La méthode a été mise au point par le Cirad. Elle repose sur l'interprétation des fréquences propres d'une poutre à partir de sa réponse à une excitation impulsionnelle, appliquée à une de ses extrémités, de façon à solliciter simultanément tous les modes propres de vibration en utilisant les modèles développés par Bernoulli (modèle le plus simple) et/ou Timoshenko (modèle plus élaboré)(Brancheriau,2013).

III.11.2.2. Mode opératoire

Lors d'essais conventionnels, les caractéristiques mécaniques du bois sont mesurées sur des éprouvettes de dimension standard 360 x 20 x 20mm^3(L, R, T).

Dans notre étude, comme indiqué précédemment, les barreaux d'essais sont de plus faible dimension du fait du format des billons. Les essais ont été ainsi réalisés sur des éprouvettes de 18 x 18 mm de section, et de longueur comprise entre 11 et 36 cm, en fonction de la longueur sans défaut disponible. La présence de défauts (nœuds, entre-écorce) modifie les propriétés

mécaniques du bois. Pour chacune des deux provenances, les essais ont été réalisés sur 29 éprouvettes provenant de deux arbres (arbres S3, S4, T2, T4).

La détermination du module d'élasticité et de cisaillement nécessitent la prise en compte des dimensions géométriques et de la masse de l'éprouvette à une humidité théorique de 12 % après stabilisation.

La largeur et l'épaisseur des éprouvettes ont été mesurées en 3 positions sur la longueur du barreau à l'aide d'un pied à coulisse (marque Mitutoyo, 500 séries ABS CD-20C), de précision ±0,02 mm. Les 3 mesures sont ensuite moyennées.

La longueur des éprouvettes est mesurée à l'aide d'une règle métallique millimétrée.

Les éprouvettes sont pesées sur une balance Sartorius (modèle BP 3100 S) de précision ±0,001 g.

Pour la mesure vibratoire, chaque éprouvette est placée sur deux supports élastiques de faible rigidité, la direction tangentielle de l'éprouvette correspondant à la direction verticale de mis en vibrations.

Les éprouvettes sont mises en vibration par simple percussion à l'une de leurs extrémités.

Un microphone installé verticalement au-dessus de l'autre extrémité permet d'enregistrer le signal transmis. Ce signal est traité par la Transformée de Fourier Rapide (FFT).

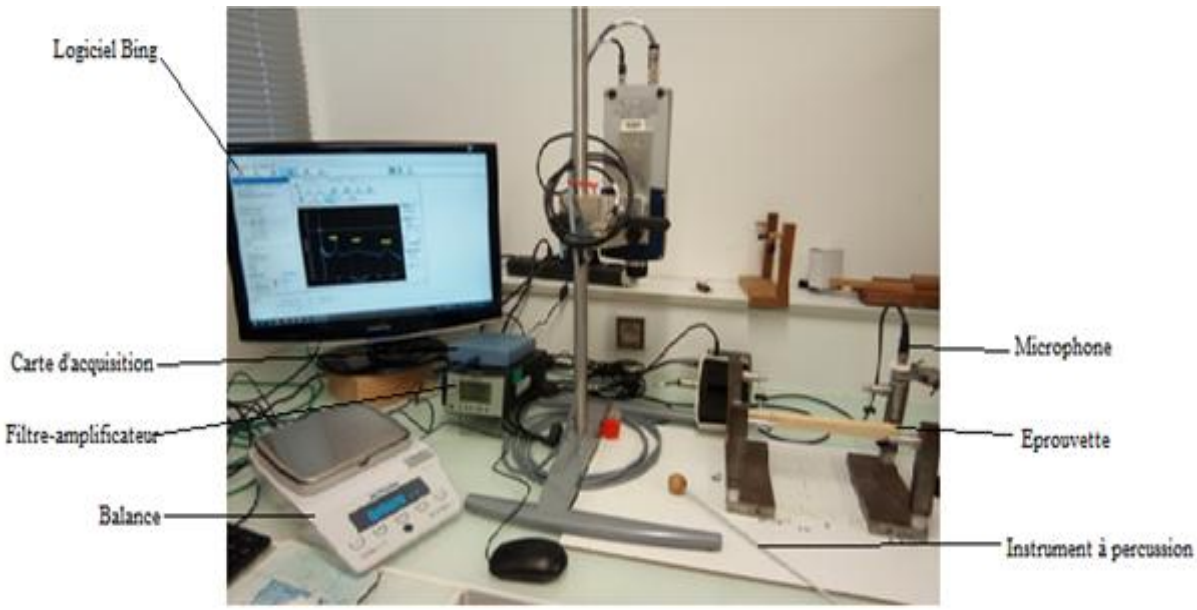


Figure 43. Dispositif de mesure Bing (photo Ouaar, 2019).

Le logiciel BING® calcule les deux caractéristiques mécaniques à partir de la masse et des trois dimensions de l'éprouvette préalablement mesurées, et des fréquences propres. La masse volumique des bois est déterminée simultanément au module d'élasticité longitudinal.

Les fréquences propres sont identifiées par leur plus grande amplitude (figure 44).

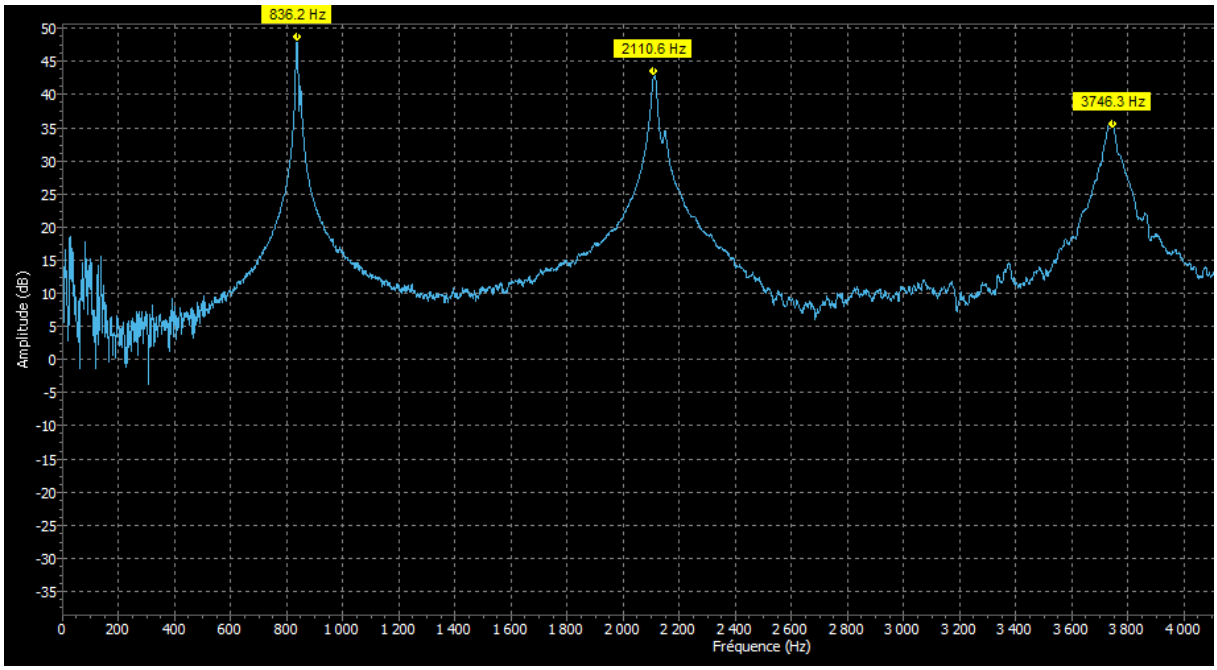


Figure 44. Exemple d'un signal analytique associé aux modes de fréquence pour un échantillon de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus*.

III.11.3.Essai de rupture en compression axiale

La contrainte de rupture en compression parallèle aux fibres est la valeur de pression obtenue lorsque l'échantillon cède sous l'action d'une force de compression progressivement croissante. L'essai de compression a été réalisé sur des éprouvettes de section18 mm x 18 mm x54 mm(R, T, L) et dont la longueur est égale à trois fois le côté de la section pour éviter le phénomène de flambement. Il a été effectuée suivant la norme française NF B 51-007.Pour chacune des deux provenances, les essais ont été réalisés sur 23 éprouvettes provenant de deux arbres (arbres S3, S4, T2, T4). Les mesures ont été réalisées après stabilisation des éprouvettes à 20 °C et 65 % d'humidité relative de l'air (taux d'humidité d'équilibre théorique de 12 %).

Les essais ont été réalisés sur une machine universelle (Adamel Lhomargy, modèle DY36) d'une capacité maximale de 100 kN, et une vitesse de déplacement de la traverse de 0,01 mm/s. Chaque éprouvette testée est placée entre les deux plateaux de la machine d'essai, un des deux plateaux étant rotulé. Un effort continu est appliqué à vitesse constante de déplacement jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La machine d'essais est pilotée par un ordinateur qui permet l'acquisition des données (charge, déplacement) (figure 45).

La contrainte de rupture en compression axiale (σ_c) de chaque éprouvette est calculée par la formule suivante :

$$\sigma_c \text{ (MPa)} = \frac{P}{a*b}$$

avec :

P: charge maximale en newton

a et b: dimensions en millimètre de la section transversale de l'éprouvette.

Figure 45. Essai de compression axiale (photo Ouaar, 2019).

Au cours de l'essai, le programme d'acquisition de la machine établit une courbe représentant le déplacement en fonction de la force appliquée sur chaque éprouvette. Les résultats d'essai sont obtenus automatiquement à partir des courbes d'essai (figure 46).

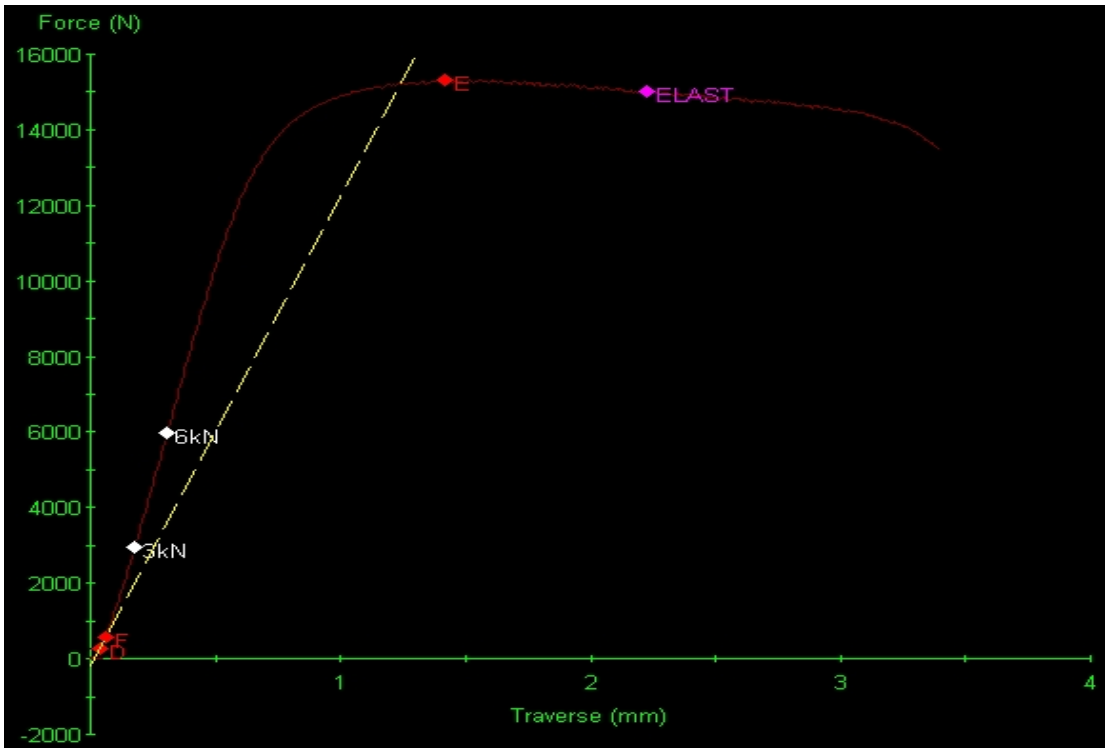


Figure 46. Exemple de courbe force-déplacement pour un échantillon de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus*.

III.12. Méthode d'analyse statistique des données

L'analyse statistique est réalisée avec le logiciel XLSTAT-2014.Les tests statistiques ont été réalisés pour un seuil de signification de 5 %. Les résultats des pourcentages d'aubier ont fait l'objet d'une analyse de variance (ANOVA). Ces analyses permettent de mettre en évidence l'effet provenance et l'effet âge des arbres sur le pourcentage du bois d'aubier. La durabilité naturelle vis-à-vis des deux champignons, les retraits linéaires transversaux totaux et le PSF ont été analysés avec le test U Mann Whitney pour déterminer les différences significatives entre les deux provenances. Des corrélations entre la masse volumique et les propriétés mécaniques du bois sont réalisés avec la matrice de Pearson. Pour la composition chimique, la densité, le module d'élasticité longitudinal et la contrainte de rupture en compression axiale, l'effet provenance a été aussi étudié à l'aide d'un test de Student.

Chapitre IV
Résultats et discussions

IV.1.Variation de la largeur moyenne des cernes

IV.1.1 Résultats

Pour l'étude de la variation de la largeur moyenne des cernes selon la provenance, les huit arbres étudiés ont été regroupés en trois classes selon l'âge des arbres : classe1 (73 – 78 ans), classe 2 (80 – 92 ans), classe 3 (120 – 130 ans).Les largeurs moyennes de cernes associées aux mêmes classes d'âge sont différentes en fonction de la provenance (figure 47).

La largeur moyenne des cernes des arbres de Sidi Bel Abbès âgés de 120 ans et de 130 ans (0, 91 mm et 0,79 mm) et des arbres âgés de 73 ans et de 80 ans (0,88 mm pour les deux âges) est supérieures à celle des arbres de Tiaret âgés de 128 ans (0,74 mm) et des arbres âgés de 78 ans et de 92 ans (0,83 mm et 0,87 mm, 0,82 mm).Pour les deux provenances, nous avons remarqué que la largeur moyenne des cernes diminue avec l'âge de l'arbre, sauf pour l'arbre S1 âgé de 120 ans pour lequel une largeur moyenne de cernes élevée est observée.

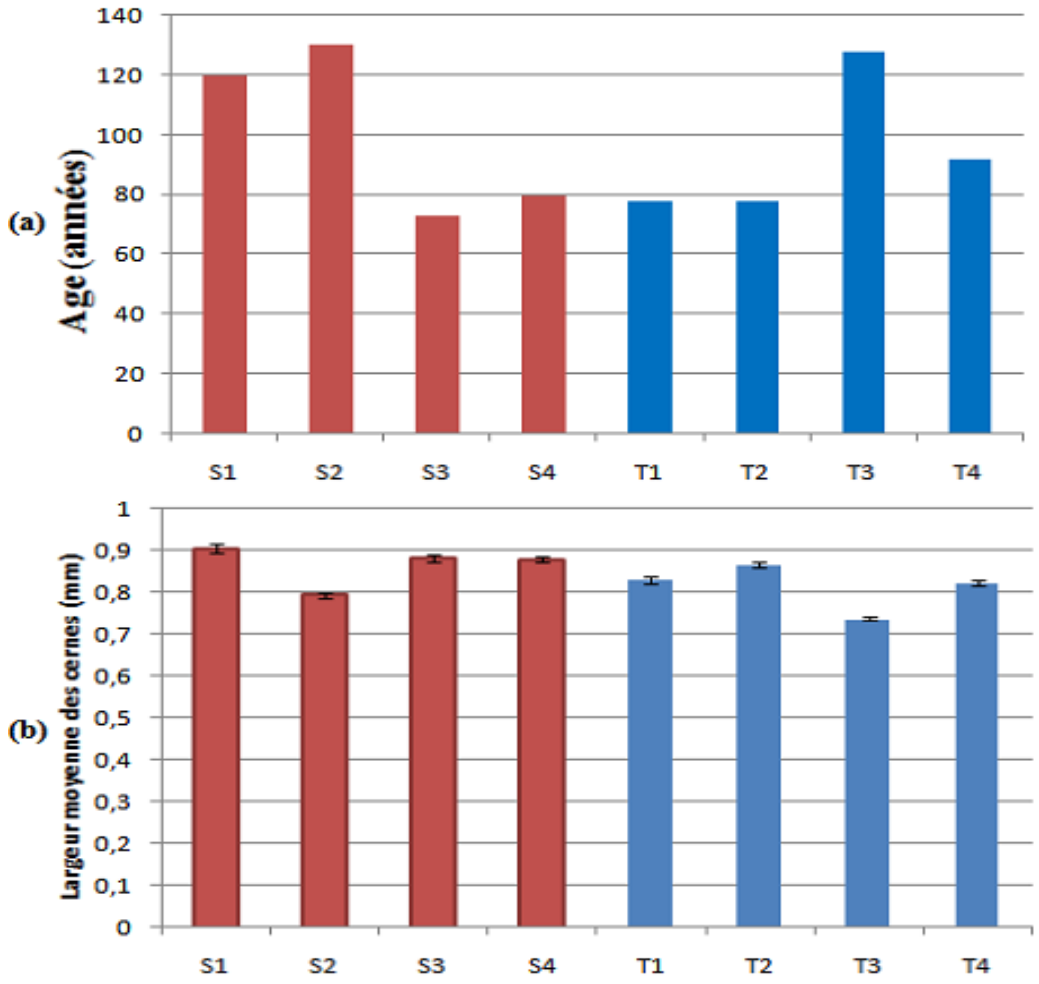


Figure 47. Interactions entre âge (a) et largeur moyenne des cernes (b) des arbres de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* des deux provenances.

IV.1.2. Discussion

La largeur moyenne des cernes est un paramètre fondamental à prendre en compte pour l'aménagement durable d'une forêt. Elle permet d'estimer la vitesse de croissance radiale et le temps nécessaire pour atteindre le diamètre d'exploitation (Ait Si Saïd, 2017). Nos résultats montrent que les arbres ayant bénéficié de conditions de croissance plus favorables (Sidi Bel Abbès) présentent des largeurs moyennes supérieures à celles de Tiaret, résultat mis en évidence dans d'autres études portant sur la relation conditions de croissance – largeur de cerne. Ainsi, les travaux de Sarmoum *et al*.(2016) ont montré que pour le pin d'Alep (*Pinus halepensis*), l'impact des conditions climatiques sur la croissance est modulé par les facteurs stationnels, en particulier le substrat. La construction du cerne dépend directement des précipitations qui renouvellent le stock d'eau dans le sol, et de l'intensité de l'évapotranspiration déterminée par la température et les caractéristiques édaphiques du sol, notamment la réserve utile (Nicault *et al*., 2001). En effet, les cernes des arbres sont larges lorsque les conditions de croissance sont favorables, et étroits lorsqu'elles sont défavorables (Bouslimi, 2014). D'autre part, les largeurs des cernes diminuent avec l'âge cambial de l'arbre (Nepveu, 1994 ; Sarmoum *et al*., 2016). Les travaux de Hlaing *et al*.(2014)sur le Teck (*Tectona grandis*)ont montré que la largeur moyenne des cernes peut être influencée par l'âge, les précipitations, la température ainsi que les facteurs environnementaux spécifiques du site.

IV.2.Proportion d'aubier

IV.2.1. Résultats

L'analyse statistique révèle que les pourcentages d'aubier des arbres de même classe d'âge sont significativement différents en fonction de la provenance. La figure 48 met en évidence ces différences, les lettres A, B, et C sur le graphique 48 b indiquent le degré de signification ou de non-signification. Les proportions d'aubier des arbres de Sidi Bel Abbès sont significativement inférieures à celles de Tiaret pour les mêmes classes d'âge. Les proportions d'aubier des arbres de Sidi Bel Abbès âgés de 120 ans et 130 ans (13,2 % et 12,2 %) et des arbres âgés de 73 ans et 80 ans (19,4 % et 16,6 %) sont significativement inférieures respectivement à celles des arbres de Tiaret âgés de 128 ans (20,5 %) et âgés de 78 ans et 92 ans (26,4 % et 28,2 %, 25,8 %) (figure 48). On note aussi un effet âge sur le pourcentage du bois d'aubier à l'intérieur d'une même station. Les proportions d'aubier des arbres de Sidi Bel Abbès âgés de 120 ans et130 ans sont significativement inférieures à celles des arbres âgés de 73 ans et 80 ans. De même, la proportion d'aubier de l'arbre de Tiaret âgé 128 ans est significativement inférieure à celle des arbres âgés de 78 ans et 92 ans.

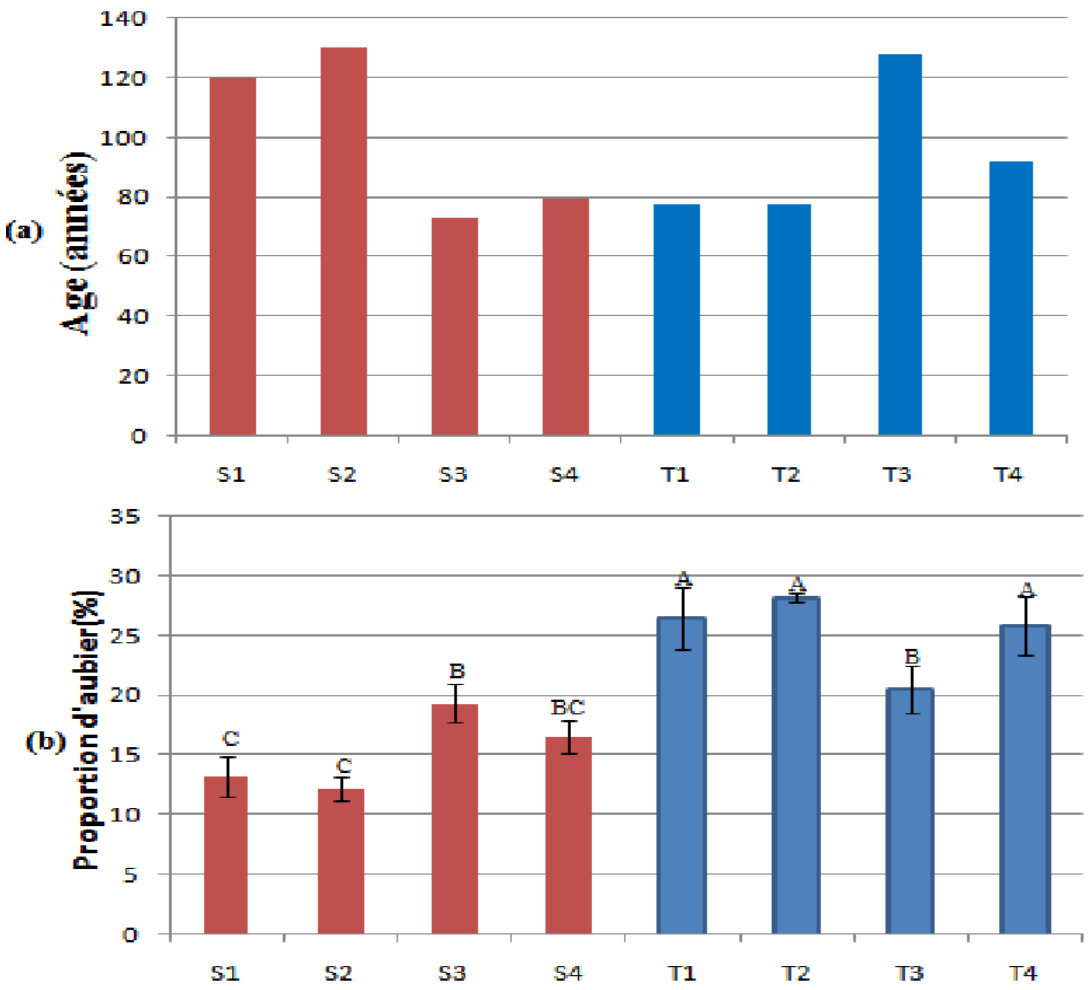


Figure 48. Interactions entre âge (a) et proportion d'aubier (b) des arbres de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* des deux provenances.

IV.2.2. Discussion

Un des principaux objectifs de cette étude est d'analyser la relation entre les proportions d'aubier et la provenance des bois. En effet, la proportion d'aubier est un facteur important à prendre en compte car il conditionne souvent les possibilités d'emploi du bois quels qu'en soient les usages. La mesure de la proportion d'aubier permet entre autres d'évaluer le volume de bois utilisable par le scieur car cet aubier doit être éliminé, sa durabilité étant inférieure à celle de duramen. Il est ainsi généralement purgé au moment de l'exploitation des grumes (Polge, 1984), lors du sciage, ou lors de la seconde transformation. En revanche, la production de bois à faible proportion de duramen est recherchée par les industries papetières, faible proportion favorisée par une croissance rapide et une récolte précoce (Rabhi *et al*., 2014), car le duramen contient des extractibles qui doivent être éliminés lors de la fabrication du papier. D'après les résultats obtenus, les proportions de l'aubier les plus élevés sont celles obtenues pour les bois de Tiaret dont les conditions de croissance moins favorables qu'à Sidi Bel

Abbès ; plus le taux de croissance est élevé, plus le pourcentage d'aubier est faible. La qualité de la station et l'impact des traitements sylvicoles favorisent le taux de croissance ce qui affecte positivement la proportion de duramen et négativement la proportion d'aubier (Du *et al.* 2011; Gominho et Pereira, 2005; Miranda *et al.*, 2006). Cependant, sur le Teck (*Tectona grandis*), Moya et Perez (2008) ont montré que les sites associés à un taux de croissance élevé présentent des pourcentages élevés d'aubier. Ainsi, Lebourgeois (1999) a montré chez les chênes sessile et pédonculé *(Quercus petraea* Liebl. et *Quercus robur* L.) que les proportions d'aubier les plus élevées sont observées sur les arbres présentant un taux de croissance élevé. Ces résultats sur le Teck et les Chênes montrent que la relation entre croissance et proportion d'aubier est aussi dépendante de l'essence considérée.

La proportion d'aubier était plus faible chez les arbres âgés. L'âge de l'arbre affecte négativement la proportion d'aubier et positivement la proportion de duramen. En effet, l'activité cambiale diminue avec le vieillissement de l'arbre contrairement à la croissance du duramen (Giroud, 2005 ; Rabhi *et al*., 2014). Les travaux de Giroud (2005) sur le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) et Bouslimi(2014) sur le Thuya occidental (*Thuja occidentalis*) ont montré que les proportions d'aubier sont dépendantes de l'âge de l'arbre et que les arbres âgés présentent des proportions très faibles. En effet, l'augmentation de la vitesse de duraminisation avec l'âge est expliquée par l'augmentation des besoins de soutien mécanique de l'arbre (Hazenberg et Yang, 1991).

IV.3.Quantification et caractérisation des extractibles

IV.3.1.Taux d'extractibles

Les rendements en extraits sont significativement différents en fonction de la provenance du bois et du solvant utilisé (figure 49 et tableau 12).Les taux d'extractibles les plus élevés ont été obtenus au mélange toluène-éthanol (14,17 % et 9,84 %) par rapport à l'eau (1,35 % et 1,19 %) pour les bois provenant de Sidi Bel Abbès et Tiaret respectivement. Le taux d'extractibles totaux du bois provenant de Sidi Bel Abbès est plus élevé que celui provenant de Tiaret (respectivement 15,52 % contre 11,03 %).

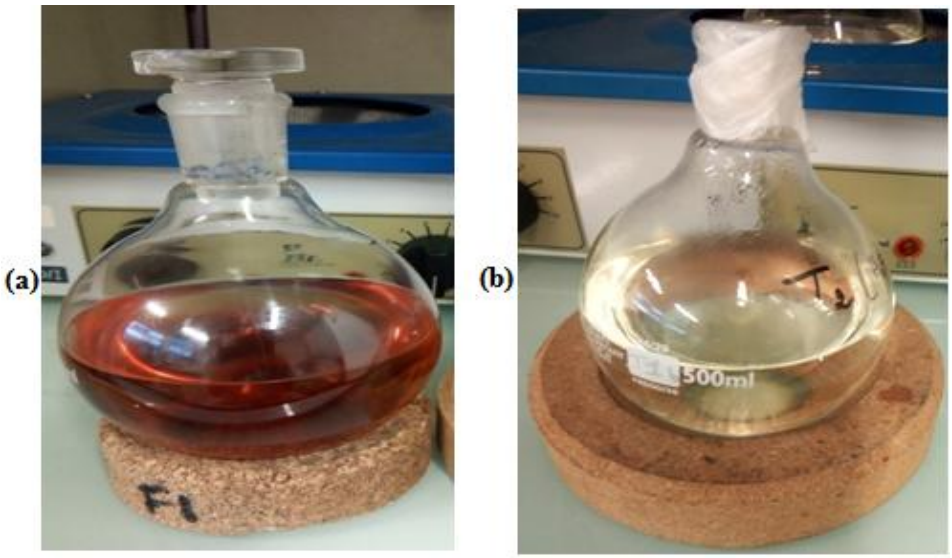


Figure 49. Extraits du duramen des bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* (a) extraits au toluène-éthanol ;(b) extraits à l'eau (photo Ouaar, 2018).

Tableau12. Taux d'extractibles du bois de duramen de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances étudiées.

Solvant	Taux d'extractibles (%)	
	Sidi Bel Abbès	**Tiaret**
Eau	1,35 ± 0,06	1,19 ± 0,02
Toluène/éthanol (2/1, v/v)	14,17 ± 0,87	9,84 ± 0,79
Total	15,52 ± 0,83	11,03 ± 0,81

IV.3.2.Composition chimiques des fractions extractibles

IV.3.2.1.Extractibles à l'eau : résultats

Les figures 50 a et 50 b présentent les chromatogrammes issus des analyses GC-MS des fractions extractibles à l'eau des duramens des bois des deux provenances. Les familles chimiques majoritairement identifiées dans ces extraits aqueux sont les sesquiterpénoïdes, les acides gras et les stérols. Le groupe des sesquiterpénoïdes obtenus pour la provenance de Sidi Bel Abbès est dominé par l'alloaromadendrene oxyde-(2) (temps de rétention (tr) 7,24min), tandis que le bois provenant de Tiaret est dominé par l'aromadendrene oxyde-(2) (tr 8,56 min) (tableau 13). Pour les deux provenances, les acides gras majoritairement présents dans les extraits aqueux sont l'acide tridécanoïque (tr 7,07 min), l'acide butanoïque (tr 6,57 min) et l'acide acétique (tr 6,82 min). Le campestérol (tr 4,61) est l'élément qui représente en majorité la famille des stérols ; il est présent en quantité plus importante dans le duramen des bois de Tiaret que dans les bois de Sidi Bel Abbès (tableau 13).

IV.3.2.1.Extractibles au toluène-éthanol : résultats

Les figures 50 c et 50 d présentent les chromatogrammes issus des analyses GC-MS des fractions extractibles à la solution toluène/éthanol des duramens des bois des deux provenances. Une importante quantité de molécules a été identifiée pour cette extraction.

Les sesquiterpènes et les sesquiterpénoïdes représentent la fraction majeure pour les deux provenances des bois et sont majoritairement représentés par le naphtalène (tr 2,47min), le cubénol (tr 3,37min et 3,52min), le ç-élémène (tr 2,96min) et l'α-calacorène (tr 2,66 min).

On remarque également que l'épicédrol (tr 5,06) est présent uniquement dans les extraits des bois de Sidi Bel Abbès. La composition en sesquiterpènes et sesquiterpénoïdes des extraits au toluène/éthanol est différente en fonction de la provenance des bois, mais reste très similaire en termes de quantité de molécules.

Par ailleurs, on constate l'absence de composés phénoliques pour les deux extraits et une présence minime d'acide rétinoïque (tr 15,81) (tableau 13).

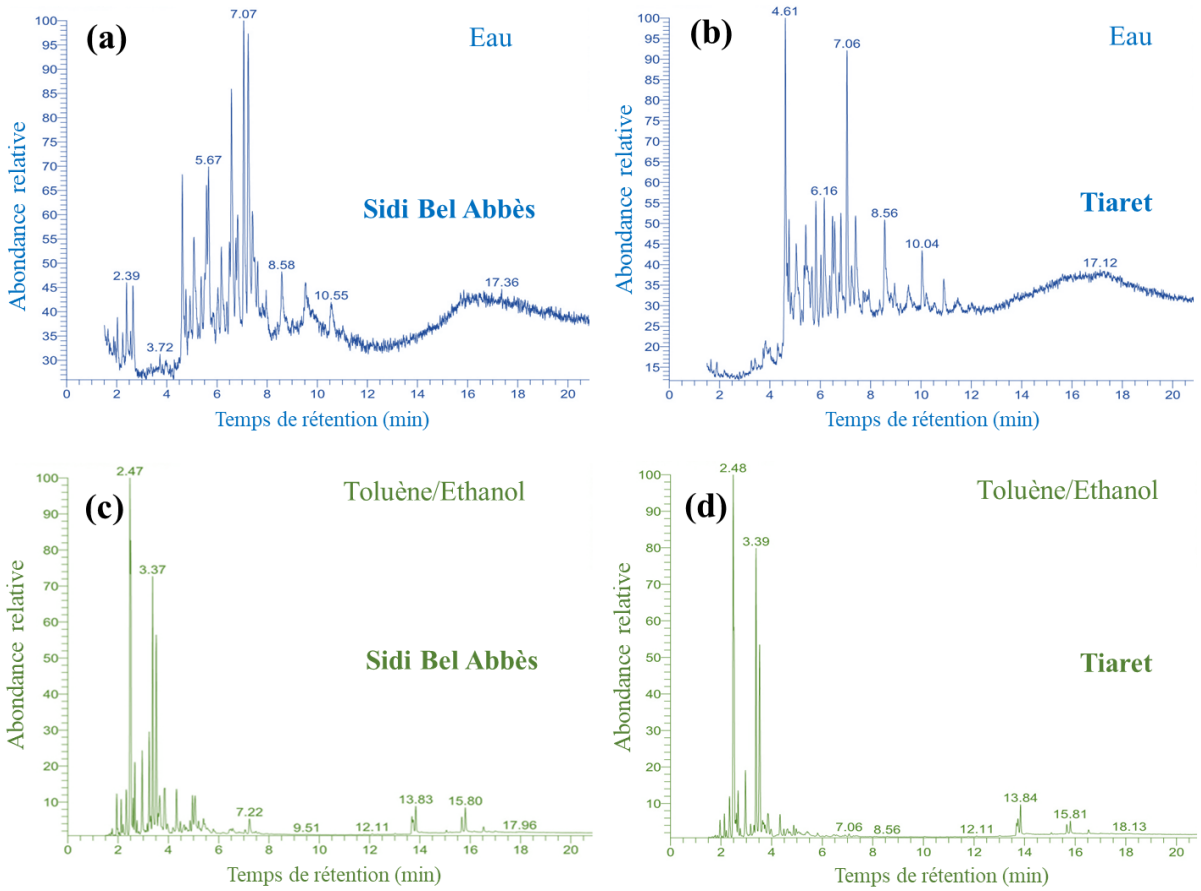


Figure 50. Chromatogrammes issus des analyses GC-MS des extraits du duramen des bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* : (a) extraits à l'eau du bois de Sidi Bel Abbès ; (b) extraits à l'eau du bois de Tiaret ; (c) extraits au mélange toluène/éthanol du bois de Sidi Bel Abbès ; (d) extraits au mélange toluène/éthanol du bois de Tiaret.

Tableau 13. Composition chimique des extraits du bois de duramen de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* des deux provenances étudiées.

Extraits à l'eau			
Temps de rétention (rt en minutes)	**Composés**	**Aire des pics (en %)**	
		Sidi Bel Abbès	**Tiaret**
2,39	Terpinolène	2,41	0
2,64	Acid nanodecanoic ethyl ester	2,62	0
3,72	Caryophyllène	0,1	1,05
4,61	**Campestérol**	**5,87**	**12,43**
5,08	Acide Isovalerique phenethyl ester	7,25	3,09
5,67	2,5 Dimethoxyphenol	4,81	2,74
6,17	Iso-furano-germacrene	4,23	6,10
6,57	Acide butanoïque	7,82	3,09
6,82	Acide acétique	3,88	4,56
7,07	**Acide tridecanoïque**	**12,08**	**11,01**
7,24	**Alloaromadendrene oxide-(2)**	**9,97**	**2,16**
8,56	**Aromadendrene oxide-(2)**	**2,01**	**5,43**
10,55	Aromadendrene oxide-(1)	1,83	1,73
Autres composés minoritaires ou non identifiés		35,12	46,61

Extraits à la solution Toluène/Ethanol			
Temps de rétention (rt en minutes)	**Composés**	**Aire des pics (en %)**	
		Sidi Bel Abbès	**Tiaret**
2,12	Caryophyllène	1,59	1,39
2,47	**Naphtalène**	**27,49**	**32,68**
2,66	**α-Calacorène**	**3,25**	**2,72**
2,96	**ç-Elemène**	**4,38**	**4,63**
3,24	**Epicedrol**	**5,06**	**0**
3,37	**Cubenol**	**12,83**	**19,22**
3,52	**Cubenol**	**12,13**	**15,75**
3,65	Aromadendrene oxide-(1)	2,70	0,77
4,32	Aromadendrene oxide-(1)	2,79	1,56
7,22	Aromadendrene oxide-(1)	1,12	0
13,83	Ingenol	1,62	2,32
15,81	Acide Rétinoïque	1,54	1,01
Autres composés minoritaires ou non identifiés		23,5	17,95

IV.3.2.2. Commentaires sur les compositions chimiques en fractions extractibles

L'analyse des taux et de la nature des extraits selon le solvant utilisé a révélé une variabilité importante des résultats obtenus selon la provenance des bois, avec notamment une variabilité de rendement d'extraction nette dans le cas des extractions éthanol/toluène. Les bois ayant bénéficié de conditions de croissance plus favorables (Sidi Bel Abbès) présentent de façon significative des taux d'extractibles plus élevés pour les deux solvants utilisés. La différence de polarité des solvants explique la différence en quantité et en nature des extraits. Le mélange toluène/éthanol est généralement utilisé pour extraire les extractibles lipophiles et hydrophiles. Les travaux de Saha Tchinda (2015) ont montré que le taux d'extractibles varie d'un solvant à l'autre et d'une essence à l'autre, et qu'aucun des solvants utilisés ne peut extraire seul tous les extractibles du bois ; les solvants non-polaires permettent l'extraction majoritairement des substances apolaires (huiles, graisses, terpènes) tandis que les solvants polaires solubilisent les composés polaires tels que les polyphénols.

Les sesquiterpènes et les sesquiterpénoïdes sont les composés majoritairement identifiés dans les extractibles obtenus. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Marongiu *et al*. (2003) qui ont montré que la composition chimique de l'huile essentielle du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* est dominée par les sesquiterpènes et les sesquiterpénoïdes, plus précisément le δ-cadinène, le1-epi-cubénol, et le cubénol qui en sont les principaux composants. De même, les résultats de l'étude d'Elaieb *et al*.(2020)ont révélé la présence de certains acides gras et de stérols comme le sitostérol dans les extractibles à l'acétone du chez certaines espèces d'Eucalyptus.

Loizzo *et al*. (2007) ont aussi mis en évidence des différences dans la nature et la composition des extractibles selon la provenance des bois. Ils ont montré que la composition chimique de l'huile essentielle du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* provenant de Liban est caractérisée par le δ–cadinène(14,5 %) et le cis-thujopsène (9,2 %) comme composés majoritaires, suivis de α-muurolène (4,9 %), cadalène (3,7 %), eremophilène (2,5 %) et α-cédrol (2,2 %), alors que celle provenant de Sardaigne (Marongiu *et al*., 2003) est composée de δ –cadinène (14 %), 1-epi-cubénol (12,5 %), cubénol (10,5 %), α -muurolol (4,8 %), α -cadinol (3,6 %) et α -humulene (3,2 %).

Les travaux d'Anda *et al*. (2019) ont montré aussi que les taux d'extractibles du duramen de Teck (*Tectona grandis*) provenant de trois localités de sud-est du Mexique varient en fonction de la provenance du bois et du solvant utilisé.

IV.4.Dosage des polyphénols totaux

IV.4.1. Résultats

Les teneurs en polyphénols totaux des bois de deux provenances ont été déterminées en milligramme d'équivalent de l'acide gallique par gramme de matière sèche (mg EAG / g) en se référant à la courbe d'étalonnage établie préalablement.

D'après les résultats obtenus, la teneur en polyphénols totaux des bois extraits au méthanol et provenant de Sidi Bel Abbès (8,46 ±0,30mg EAG/g MS) est significativement supérieure à celle de Tiaret (7,28 ± 0,23 mg EAG/g MS) (figure 51).Pour les deux provenances, les teneurs en polyphénols totaux extraits à l'acétone sont légèrement inférieures à celles obtenues avec le méthanol, mais cet écart n'est pas significatif. Cependant, la teneur en polyphénols totaux extraits à l'acétone de la provenance Sidi Bel Abbès (7,99 ± 0,19 mg EAG/g MS) est supérieure à celle de la provenance Tiaret (7,07 ± 0,30 mg EAG/g MS) (figure 51).

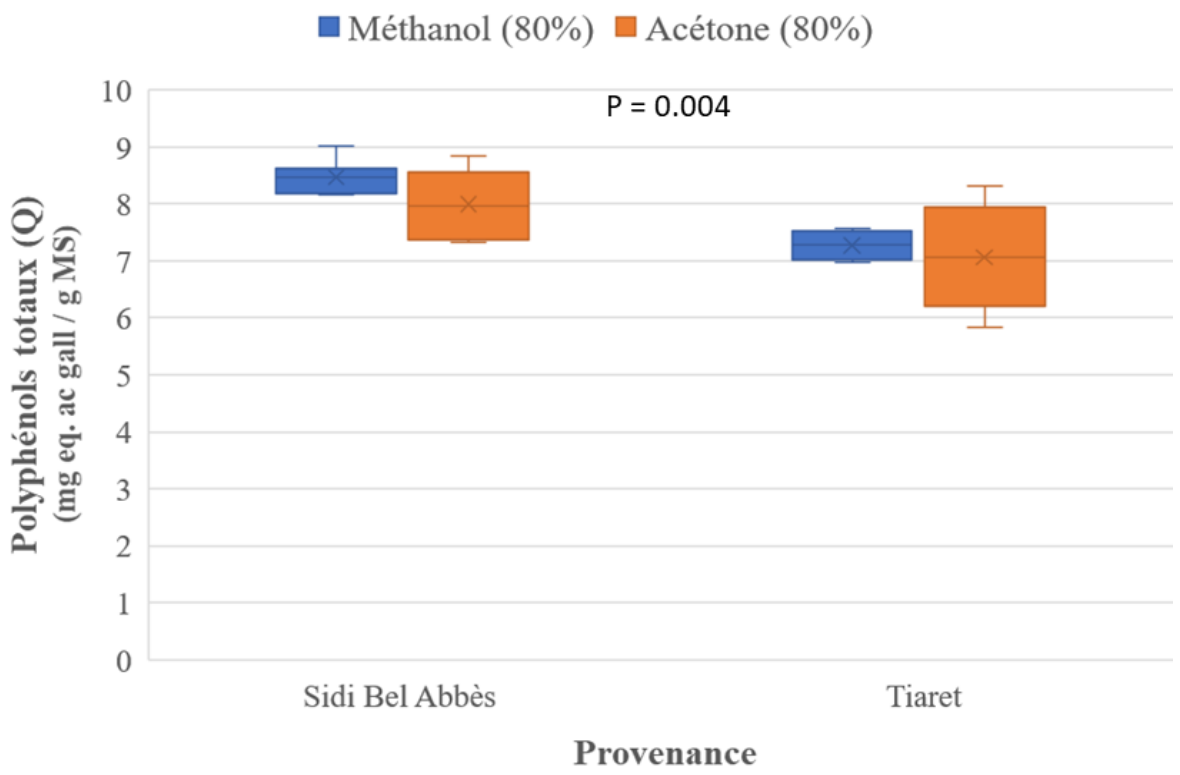


Figure 51. Comparaison des teneurs en polyphénols totaux par extraction au méthanol et à l'acétone pour les deux provenances.

IV.4.2. Discussions

Les polyphénols totaux ont été extraits par sonication puis macération à partir de méthanol ou d'acétone à 80 %. L'intérêt de cette technique par ultrasons pour améliorer les rendements en polyphénols totaux a été démontré par Bourgou *et al*. (2016) et Boggia *et al*. (2016).

Les résultats obtenus sont difficilement comparables à ceux disponibles dans la littérature car la structure et la proportion d'extractibles peuvent varier selon l'espèce mais aussi selon la partie de l'arbre considérée (aubier ou duramen), l'âge de l'arbre, et les conditions environnementales et saisonnières (Chaouche *et al*., 2013 ;Thévenon, 2015).

L'évaluation du contenu en composés phénoliques dans différents organes et tissus des arbres est considérée comme un indicateur très pertinent de changements dus aux variations des conditions environnementales (Boizot et charpentier, 2006). Rabhi *el al*. (2014) ont constaté que l'étude de la dynamique spatio-temporelle des polyphénols dans le duramen et de l'aubier chez le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti), en particulier en relation avec sa durabilité naturelle, permet de caractériser typologiquement ces deux types de bois. En effet, ces composés peuvent avoir évolués en relation avec leurs propriétés physiologiques et écologiques spécifiques pour l'adaptation des plantes à leur environnement de croissance (Holopainen *et al*., 2018). Thulasidas et Bhat (2007) ont montré que l'humidité d'un site semble influencer la concentration des extractibles du bois de Teck ; les taux d'extractibles et les teneurs en tectoquinone et naphthoquinone des bois provenant de la zones sèche sont supérieures à celles des bois de la zone humide.

La méthode d'extraction et le solvant utilisé influencent aussi la teneur en polyphénols (Bourgou *et al*., 2016).Dans le cas présent, les différences observées entre les deux provenances étudiées concernent aussi bien les teneurs en polyphénols totaux (teneurs plus élevées pour les bois de Sidi Bel Abbès pour les deux solvants) que la nature de ces polyphénols (différences entre les deux solvants utilisés).

Les travaux de Rebey *et al*. (2016) sur des graines de fenouil (*Foeniculum vulgarae*) ont montré que les teneurs en polyphénols totaux varient en fonction de la provenance et de la nature des solvants d'extraction. De même, les travaux de Moumene (2016) qui a quantifié les composés phénoliques extraits à partir de trois solvants (méthanol, éthanol et eau distillée) de trois échantillons d'*Allium* mettent en évidence une différence de rendement entre les solvants. En effet, les solvants les moins polaires sont généralement utilisés pour extraire les phénols lipophiles, tandis que les solvants polaires sont considérés comme appropriés pour extraire les phénols hydrophiles (Bouzid, 2015).

IV.5.Durabilité naturelle vis-à-vis des champignons et des termites

IV.5.1.Durabilité naturelle vis-à-vis des champignons

IV.5.1.1. Résultats

Compte tenu des pertes de masse enregistrées après 8 semaines d'exposition sur des échantillons témoins de Hêtre (32,40 ± 0,88 % pour *Coniophora puteana,* 32,73 ± 0,90 % pour *Rhodonia placenta*) et d'aubier de Pin sylvestre (29,02 ± 0,08 % pour *Coniophora puteana,* 37,62 ± 0,06 % pour *Rhodonia placenta),* la démonstration de la virulence des champignons permet de valider les essais fongiques (figure 52).

Par ailleurs, les taux d'humidité finale des éprouvettes de virulence après 8 semaines d'incubation doivent être supérieurs à 20 % selon les préconisations de la norme de référence : les résultats des mesures montrent qu'ils varient de 21,29 à 78,43 %.Ces taux d'humidité permettent donc le développement d'une attaque fongique. La figure 53 présente des éprouvettes de bois des deux provenances après exposition à *Coniophora puteana*.

Figure 52. Dégâts de *Coniophora puteana* sur les éprouvettes d'aubier de Pin sylvestre et Hêtre (photo Thévenon, 2019).

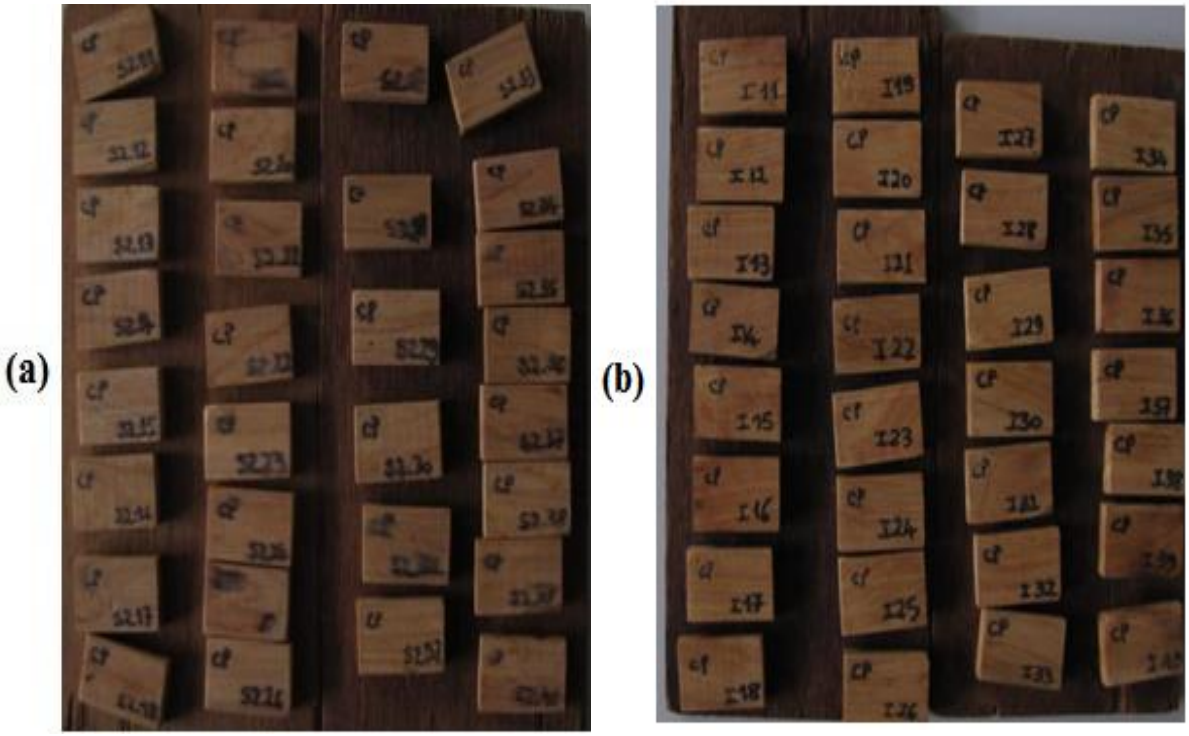


Figure 53. Eprouvettes de bois des deux provenances après exposition à *Coniophora puteana ;* (a) bois de Sidi Bel Abbès ; (b) bois de Tiaret (photo Thévenon, 2019).

L'étude statistique n'a révélé aucune différence significative entre les deux provenances pour l'espèce *Coniophora puteana*. En revanche, on observe une différence très significative pour l'espèce *Rhodonia placenta* (figure 54).

Le test de durabilité naturelle vis-à-vis des deux champignons de pourriture brune a montré que la perte de masse médiane est toujours inférieure à 5 % après 8 semaines d'incubation pour les deux provenances. En conséquence, d'après la norme XP Cen TS 15083-1 (2006), le bois de cette essence peut être classé comme très durable (classe de durabilité 1, notée CD1).

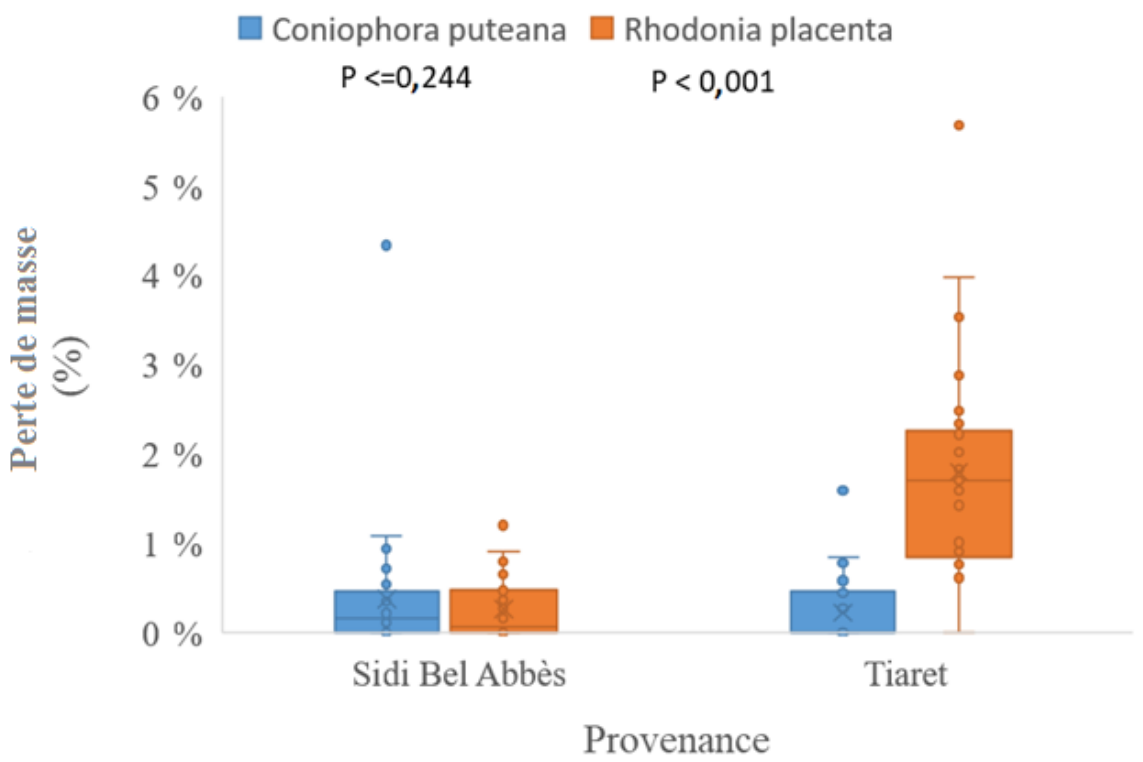


Figure 54. Comparaison des pertes de masse (en %) dues aux deux champignons pour les échantillons des deux provenances.

IV.5.1.2. Discussions

La durabilité naturelle des bois provenant de Sidi Bel Abbès vis-à-vis de *Rhodonia placenta* (champignon causant la plus forte perte de masse chez les témoins de Pin) est plus élevée que celle du bois provenant de Tiaret, avec une dispersion moindre des résultats obtenus.

Cette différence pourrait être attribuée aux variations de la teneur et de la composition en extractibles entre les deux provenances. La question reste cependant posée quant à la nature des constituants chimiques concernés.

Pollet *et al*.(2013) démontrent que la durabilité naturelle peut varier en fonction de l'espèce de champignon utilisée, de l'origine génétique de l'arbre et de la zone de croissance de l'arbre. Néanmoins, sur le Pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica*), Boudouaya *et al*. (2015) ont montré que les pertes de masse du bois de deux arbres de même âge, de deux régions différentes du point de vue bioclimatique, ne présentent aucune différence significative pour le même type de bois.

Dans leurs travaux sur la durabilité naturelle du bois de plusieurs essences tropicales vis-à-vis de champignons lignivores en relation avec la présence d'extractibles, Déon et Schwartz (1988) ont montré que les pertes de masse apparues comme négligeables sur des éprouvettes non extraites deviennent très élevées après extraction par une gamme de solvants de polarité

croissante (extractions en parallèle sur des éprouvettes jouxtant les éprouvettes non extraites).Ils montrent aussi que la nature chimique et les teneurs en extraits permettent d'expliquer les variabilités de la résistance naturelle des essences étudiées.

Selon Schultz et Nicholas (2000), les extractibles protègent le bois de cœur contre les agents fongiques par une double fonction : les extractibles présentent à la fois une activité fongicide et une activité antioxydante ; en effet, les champignons de pourriture blanche et brune utilisent un certain type de radicaux libres pour perturber les parois cellulaires (Pietarinen *et al*., 2006). Les travaux de Mazari (2009) ont montré que la fraction d'acétate d'éthyle des flavonoïdes obtenue à partir des feuilles de *Juniperus oxycedrus* présente une capacité plus importante de piégeage du radical libre DPPH, proche de celle de l'acide ascorbique. De même, Al-Snafi(2018) montre également que le principal composant du goudron de *Juniperus oxycedrus* est le cadinène et que cette plante présente des effets antimicrobiens, cytotoxiques, antioxydants. En effet, une résistance élevée aux attaques de champignons lignivores peut être liée à la présence de substances antifongiques telle que les sesquiterpènes et les polyphénols totaux (Broda, 2020).

Fidah *et al*. (2016) ont montré que le pouvoir antifongique de l'huile essentielle du bois de Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) pourrait être attribué à sa richesse en cétones sesquiterpeniques, principalement les atlantones. Les travaux d'Ouadou(2017) ont montré aussi que le traitement avec de l'huile de soja peut améliorer la durabilité des bois de Chêne zeen (*Quercus canariensis*) et de Chêne afarès (*Quercus afares*) contre la pourriture blanche (*Coriolus versicolor*)et la pourriture brune (*Coniophora puteana*).De même, Mun et Prewitt (2011) ont constaté que la résistance du bois de cœur du Genévrier de Virginie (*Juniperus virginiana*) à l'attaque des champignons est attribuée aux sesquiterpènes tels que le cédrol et le thujopsène. En effet, les terpènes jouent un rôle de protection multiple contre les champignons et, en cas de blessure, contre les agressions extérieures (insectes et bactéries) (Fouquet, 2009).

Plusieurs auteurs ont aussi mis en évidence le rôle des extractibles phénoliques sur la durabilité naturelle du bois. Boizot et Charpentier (2006) ont montré que l'accumulation de polyphénols solubles dans le bois, et plus particulièrement dans le duramen, explique son niveau de durabilité naturelle. Aloui *et al*. (2004) et Niamké *et al*. (2011) ont démontré que la présence des polyphénols totaux est positivement corrélée à la durabilité naturelle du bois vis-à-vis des champignons lignivores pour deux espèces de Chêne (*Quercus robur* et *Q. petraea*) et pour le Teck (*Tectona grandis*).

Les travaux de Flora(2018) ont montré également que la variation des polyphénols totaux du duramen de l'Angélique (*Dicorynia guianensis*) permet d'expliquer la variabilité de la durabilité naturelle du duramen de cette espèce. Le mécanisme de la toxicité des phénols sur les champignons est basé sur l'inactivation des enzymes fongiques qui contiennent le groupement SH dans leur site actif (Farag *et al.,* 1989 ; Celimene *et al.,* 1999 ; Cowan, 1999).
Par ailleurs, Fidah(2016) a attribué la supériorité de l'activité antifongique des huiles essentielles de la loupe de Thuya (*Tetraclinis articulata*) à la synergie d'effets du thymol ou de 3 tera-butyl-4-méthoxyphénol avec certaines terpénoïdes. De même, Schultz *et al*. (1995) ont constaté que la durabilité naturelle très élevée du duramen du Mûrier rouge (*Morus rubra*) et du Robinier faux-acacia (*Robinia pseudoacacia*) n'est pas due à un constituant unique mais à l'action combinée (synergie) de plusieurs composés. Ce type d'action combinée mise en évidence sur certaines espèces peut très probablement être généralisé; les composants impliqués varient selon les espèces étudiées d'où la complexité de la mise en évidence de ce type d'action et la nécessité d'une recherche espèce par espèce. En effet, la fixation des terpènes phénoliques sur les groupes amine et hydroxylamine des protéines membranaires microbiennes permet d'entrainer une altération de la perméabilité et une fuite des constituants intracellulaires (Ultee *et al.,* 1999 ; Knowles *et al.,* 2005 ; López-Malo *et al.,* 2005).
La combinaison des différentes structures, leurs proportions relatives ainsi que leurs interactions (synergisme ou antagonisme) sont à l'origine de la diversité de leurs activités biologiques (Rice-Evans *et al*., 1996).

IV.5.2. Durabilité naturelle vis-à-vis des termites

IV.5.2.1. Résultats

Les résultats obtenus sur les éprouvettes de témoins de virulence (aubier de Pin sylvestre) attestent la validité des essais de résistance aux termites (taux de survie supérieur à 50 % (81,6 ± 8,4 %) et cotation visuelle de 4 correspondant à une forte attaque) (figure 55)
Quelle que soit la provenance du bois de duramen de *Juniperus oxycedrus,* après 4 semaines d'exposition aux termites (*Reticulitermes flavipes*), les taux de survie des termites sont nuls (sauf pour 1 échantillon provenant de Tiaret où il reste 1 termite vivant) et les cotations visuelles des éprouvettes sont de 0 (aucune attaque, excepté pour 2 éprouvettes provenant de Tiaret qui présentent une cotation visuelle de 1 traduisant une tentative d'attaque)(figure 56 et figure 57).
Lors des suivis réguliers des dispositifs d'essais, il a également été remarqué que les termites restaient bien à distance des éprouvettes de bois de *Juniperus oxycedrus* durant les 4 semaines

d'exposition aux termites, indiquant un effet répulsif du bois. La mise en évidence de cet effet répulsif corrobore les connaissances empiriques sur le bois de cette espèce utilisé à des fins domestiques pour son effet répulsif sur différents insectes.

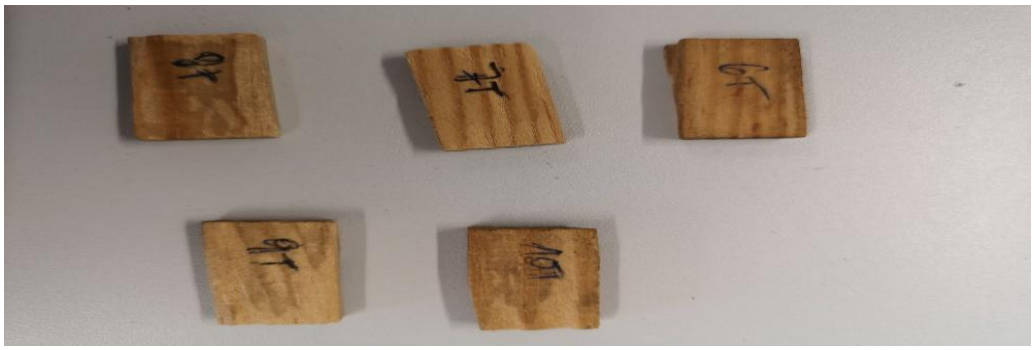


Figure 55. Etat des éprouvettes de Pin sylvestre après exposition aux termites (photo Thévenon, 2019).

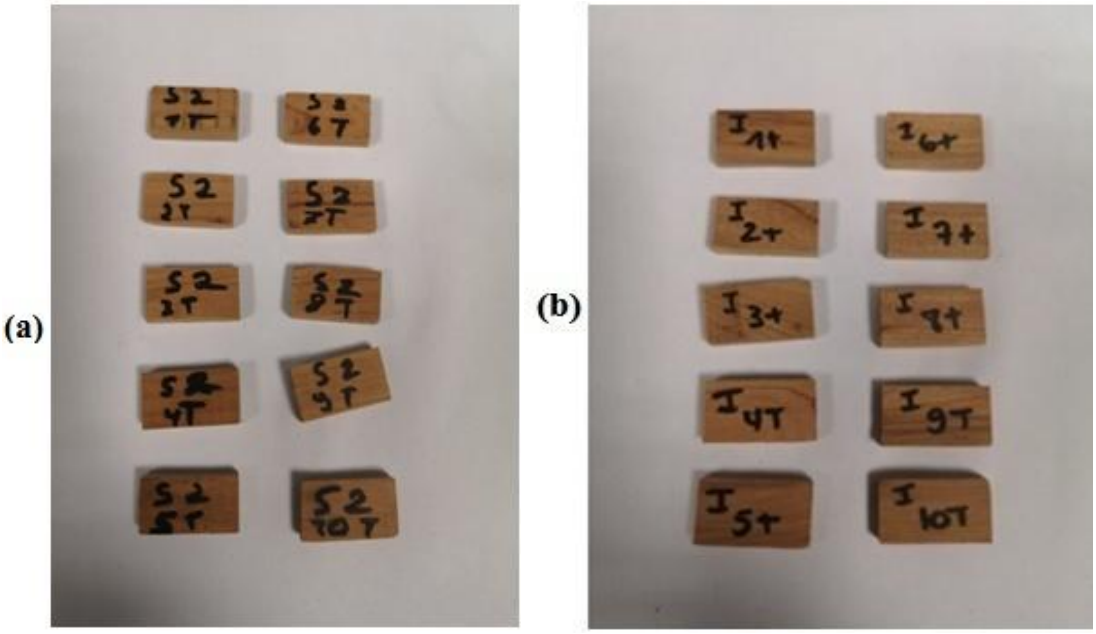


Figure 56. Etat des éprouvettes après exposition aux termites : (a) bois de Sidi Bel Abbès ; (b) bois de Tiaret (photo Thévenon, 2019).

Figure 57. Echantillon 7 T avec cotation visuelle 1(la trace ponctuelle révèle une tentative d'attaque) (photo Thévenon, 2019).

IV.5.2.2. Discussions

Les essais de résistance aux termites montrent qu'aucune des deux provenances n'est sensible aux attaques de l'espèce *Reticulitermes flavipes* et que le bois présente un caractère répulsif. Certaines espèces de genévriers ont de très bonnes propriétés anti-termites, antibactériennes et antifongiques (Mun et Prewitt, 2011).

Athanassiou *et al*. (2013) ont montré que les huiles essentielles de baies de *Juniperus oxycedrus* ssp. *oxycedrus* associées avec un gel de silice présentent un effet insecticide important vis-à-vis le *Sitophilus oryzae.* Cette résistance est généralement attribuée à la présence dans le bois de certains composés chimiques comme les sesquiterpènes et les sesquiterpénoïdes qui sont particulièrement abondants dans le bois de l'espèce étudiée.

Angelier(2008) montre ainsi que les sesquiterpènes contenus dans le bois de Teck ou de Cyprès (*Cupressus sempervirens*) éloignent les termites. De même, les travaux de Sharma *et al*. (1994) ont montré que les terpénoïdes présentent des propriétés toxiques et répulsives contre l'espèce de termites *Odontotermes brunneus*. En outre, Syofuna *et al*. (2012) ont montré que l'amélioration de la résistance aux termites est probablement due à la combinaison chimique des différents composants de l'extraction du bois car les différents composés obtenus par les différents solvants d'extraction montrent une efficacité différente vis-à-vis de la résistance aux termites. On retrouve ainsi le même type d'actions combinées mises en évidence lors d'études sur le déterminisme de la durabilité naturelle de bois de différentes espèces.

Dans de nombreux pays, des bois de cupressacées sont utilisés en construction et pour d'autres types d'applications du fait de leur durabilité naturelle élevée vis-à-vis des termites, des insectes et des champignons (Haluk et Roussel, 2000). La présence de composés extractibles de type tropolone est à l'origine de l'excellente résistance du bois vis-à-vis des termites, des insectes et des champignons.

IV.6. Variabilité des macromolécules du bois

IV.6.1. Résultats

L'analyse des résultats révèle que la teneur en composés extractibles des bois provenant de Sidi Bel Abbès (11,15 ± 0,98 %) est très significativement supérieure à celle de Tiaret (7,67 ± 0,57 %) avec une faible dispersion des valeurs pour les deux provenances (respectivement 8,79 % et 7, 43 %).

La teneur en α-cellulose des bois provenant de Tiaret (32,48 ± 0,2 %) est très significativement supérieure à celle de Sidi Bel Abbès (30,13 ± 0,54 %) avec une faible dispersion des valeurs (respectivement 0,61 % et 1,78 %).

En revanche, pour la teneur en lignine totale (Klason et acide-soluble), aucune différence significative n'a été observée entre les bois provenant de Sidi Bel Abbès et Tiaret (respectivement 30,71 ± 2,48 % contre 31,67 ± 1,01 %) avec une faible dispersion des valeurs (respectivement 8,08 % et 3,19 %).

Pour la teneur en hémicellulose, comme pour les lignines, aucune différence significative n'a été observée entre les bois de Sidi Bel Abbès et de Tiaret (respectivement 26,59 ± 1,81 % contre 27,51 ± 0,85 %) avec une faible dispersion des valeurs pour les bois des deux provenances (respectivement 6,8 % et 3,08 %).

La figure 58 illustre ces comparaisons de taux de constituants chimiques du bois entre les deux provenances.

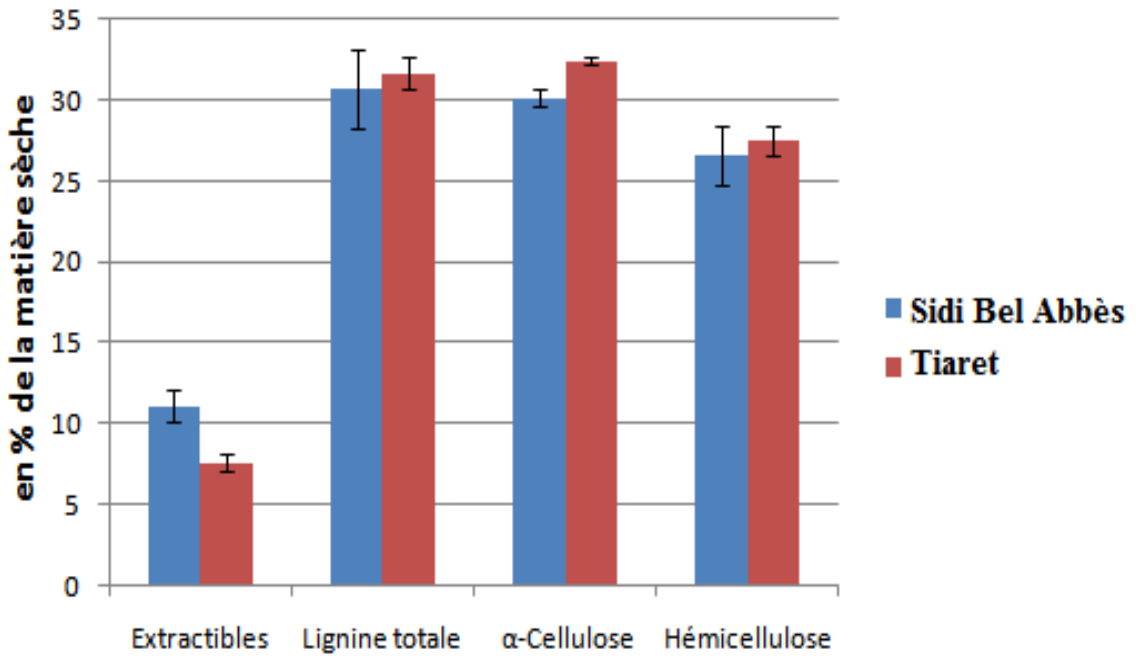


Figure 58. Comparaison des teneurs en extractibles totaux, lignine totale (Klason et acide-soluble), α-cellulose et hémicellulose du bois de duramen de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances.

IV.6.2. Discussions

Les quatre principaux constituants chimiques du bois sont la cellulose, les hémicelluloses, les lignines et les extractibles. La connaissance de la composition chimique du bois et de la répartition entre ses principaux constituants permet de faire le lien avec les autres propriétés technologiques du matériau (Gérard *et al*., 2019).

Les constituants chimiques tels que la lignine Klason et l'holocellulose, ainsi que les extractibles totaux, sont des caractéristiques importantes à prendre en compte pour évaluer la qualité des bois et définir leurs potentialités d'utilisations (Malik et Abdelgadir, 2015).

Bouslimi(2014) a montré que la variabilité des propriétés mécaniques du bois de Thuya occidental *(Thuja occidentalis)* s'explique par les variations de sa composition chimique. Il a constaté que le module de rupture est corrélé à la teneur en hémicelluloses, mais il est faiblement corrélé à la teneur en cellulose. En revanche, le module élasticité est fortement corrélé à la teneur en cellulose. En effet, la teneur en cellulose impacte directement les caractéristiques mécaniques du bois, en relation avec son degré élevé de polymérisation. Les parties amorphes de la cellulose apportent au bois sa flexibilité et ses parties cristallines confèrent sa rigidité (Thévenon, 2015).

Wimmer et Lucas (1997) ont montré qu'une faible teneur en calcium était liée à une plus faible proportion de lignine dans le bois d'Epicéa (*Picea abies*) ce qui entraînait des variations de la dureté et de l'élasticité du bois.

Par ailleurs, la composition chimique du bois joue un rôle important dans sa dégradation par les champignons et les termites (Elaieb *et al*., 2020).

De même, les caractéristiques de la pâte à papier élaborée à partir du bois sont affectées par les variation de ses constituants chimiques ; ainsi, plus la teneur en cellulose et en hémicellulose (le tout constituant l'holocellulose) est élevée et plus le rendement en pâte est élevé (Gao *et al*., 2011).

La proportion relative des différents constituants chimiques du bois dépend de la nature (feuillus ou résineux) et de l'espèce du bois (Arnoul Jarriault, 2015). En général, le bois des résineux se caractérise par une teneur plus élevée en cellulose (40-44%), une teneur plus élevée en lignine (25-31 %) et une teneur plus faible en hémicelluloses (25-29 %) que celui des feuillus (Thévenon, 2015). Cependant, le bois de genévrier présente une composition chimique spécifique ; son rapport « lignine/cellulose » le situe dans une position intermédiaire entre les conifères et les feuillus (Zubov *et al*., 2012). Le bois de genévrier se caractérise par une teneur faible en cellulose (38-41 %) et une teneur élevée en lignine (30-32 %) ce qui explique son hydrophobie et sa résistance au stress hydrique (Bogolitsyn *et al*., 2015).

La teneur en macromolécules du bois varie entre le duramen et l'aubier (Bouslimi, 2014). Les travaux de Gao *et al*.(2011) sur le cèdre déodar(*Cedrus deodara*)ont montré que les teneurs en holocellulose et en cellulose sont plus élevées dans l'aubier alors que la teneur en lignine est plus élevée dans le duramen.

La méthode d'extraction et le solvant utilisé influencent aussi la teneur en macromolécules du bois ; les teneurs en lignine et en holocellulose ont été mesurées par rapport à la teneur en extractibles totaux contenus dans la matière sèche. Il faut noter que la teneur en extractibles varie selon le solvant utilisé et la méthode d'extraction. Il est donc nécessaire de préciser qu'il y a une différence de la teneur en extractibles totaux entre les deux séries d'expérimentations ; Le type d'extraction des extractibles réalisé pour le dosage des macromolécules du bois (lignines, cellulose et hémicelluloses) et qui utilisé l'éthanol et l'eau comme solvant d'extraction présente en général un pourcentage faible en extractibles totaux. De même, les cendres sont non solubilisées et doivent se retrouver dans les résidus secs à la fois pour les lignines et pour la holocellulose après attaques acides et alcalines.

Nos résultats montrent que la provenance du bois n'a pas influencé significativement la teneur en lignine et en hémicellulose alors que les teneurs en cellulose et en composés extractibles varient significativement selon la provenance du bois.

Ces résultats sont spécifiques à l'espèce et aux provenances étudiées.

Sur l'épinette (*Picea abies)*, Sandak *et al*.(2015) ont mis en évidence des différences significatives entre les provenances étudiées pour la teneur en lignine et en hémicelluloses, mais aucune différence significative pour la teneur en cellulose. Ils ont de même mis en évidence une corrélation positive entre l'altitude du site et la teneur en lignine (r= 0,73). D'autre part, Rigatto *et al*. (2004) ont montré que des bois de Pin taeda (*Pinus taeda*) provenant de sites à taux de croissance élevé présentent des teneurs plus faibles en cellulose et en holocellulose et des teneurs plus élevées en lignine et extractibles.

Il apparait ainsi que l'impact des conditions de croissance sur les taux de constituants chimique du bois est variable en fonction des espèces étudiées.

IV.7.Etude comparative de la composition minérale des cendres

IV.7.1. Résultats

L'étude statistique n'a révélé aucune différence significative entre les deux provenances pour la composition minérale des cendres (calcium, phosphore, potassium, magnésium, sodium, fer). Ainsi, aucune différence significative n'a été observée pour le taux de cendres entre les bois de Sidi Bel Abbès et de Tiaret (respectivement 0,77 ± 0,28 % contre 0,41 ± 0,15 %). On remarque également que quelle que soit la provenance du bois, le calcium est toujours l'élément le plus représenté, suivi du potassium et du magnésium alors que les teneurs en phosphore, en sodium et en fer sont très faibles. Les coefficients de variation pour le taux de cendre et les teneurs en éléments minéraux sont élevés (supérieurs à 18 %) (tableau 14).

La teneur en silice est inférieure à 0,46 % sur la matière sèche. Lorsque la teneur en silice est très faible ou nulle, il peut arriver que la différence de masse déterminée soit négative. Cela s'explique par l'incertitude de mesure liée aux manipulations et à l'incertitude même de la mesure sur la balance(le taux de silice est déterminé par gravimétrie et non par dosage comme les autres éléments). Nous indiquons alors la valeur la plus faible (= valeur-plancher) que nous pouvons déterminer, soit 0,46 %, en précisant que la teneur est certainement inférieure à ce seuil. Nous avons déterminé cette valeur en réalisant des essais sur des blancs de minéralisation, soit des capsules vides, sans prise d'essai, qui ont suivi les mêmes étapes qu'un échantillon.

Tableau 14. Taux de cendres et teneurs en éléments minéraux (Ca, K, Mg, Na, Fe, P) du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* par rapport à la matière sèche pour les deux provenances étudiées

Provenance	Statistique	Taux de cendres(%)	Ca(%)	K(%)	Mg(%)	Na(%)	Fe(%)	P(%)
Sidi Bel Abbès	Moyenne	0,77	0,17	0,04	0,02	0,004	0,0051	0,0037
	Écart-type	0,28	0,088	0,009	0,01	0,0018	0,0048	0,0009
	CV	36,3	50,5	20,8	51,1	45,6	93,7	25,5
Tiaret	Moyenne	0,41	0,16	0,04	0,01	0,004	0,0058	0,0045
	Écart-type	0,15	0,047	0,022	0,002	0,0014	0,0037	0,0013
	CV	37,4	29,8	52,4	18	35,3	65	28,7

IV.7.2. Discussion

La teneur en cendres et la composition chimique de ces cendres sont des caractéristiques à prendre en compte lorsque des choix technologiques sont à faire en matière de valorisation énergétique de la ressource. La valorisation énergétique optimale des ressources ligneuses dépend effectivement du taux de cendres, les essences à faible production de cendres étant notamment recherchées (Mouras *et al*., 2015). En raison de leur pH élevé, les cendres sont particulièrement bénéfiques en apport dans les sols acides. Elles sont utilisées comme alternative aux engrais potassiques classiques sur sol acide (Kebli *et al*., 2017). Cependant, la présence d'éléments métalliques, même sous forme de trace, constitue un facteur limitant leurs potentialités d'utilisation. Le taux de silice est également un paramètre important à connaitre car il impacte directement l'usinabilité des bois (Thévenon, 2015).

D'après les résultats obtenus, aucune différence significative n'a été observée pour le taux de cendres et la composition minérale des cendres entres les bois de deux provenances.

Cependant, la composition en éléments minéraux des bois varie en fonction de l'essence et surtout du lieu de croissance de l'arbre (Chekdhidh, 2014).Dans les arbres, le bois est généralement l'organe qui présente la plus faible concentration en éléments minéraux (Tsutsumi *et al*., 1968; Woodwell *et al*.,1975).Gérard *et al*.(2019) indiquent que les teneurs en cendres de 15 espèces résineux sont comprises entre 0,3 % et 0,8 %. Le taux de cendres des bois de *Juniperus* étudiés se situent bien dans cette fourchette.

La comparaison des taux de composés minéraux nous a permis de constater le taux de calcium élevé pour les deux provenances, suivi du potassium et du magnésium. Montès (1999) a montré que dans les différents organes du Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera*), le calcium est toujours l'élément le plus représenté, suivi de l'azote, du potassium et du magnésium. En effet le calcium est impliqué dans le mécanisme de polymérisation de la lignine dans la paroi cellulaire (Westermark, 1982).Le potassium et le calcium sont nécessaires pour le métabolisme des arbres et interviennent dans différents processus physiologiques relatifs à la croissance (Fromm, 2010).Chekdhidh (2014) a montré que le calcium, le magnésium et le potassium représentent à eux seuls 80 % de la composition des cendres du bois.

Les teneurs en composés minéraux des différents échantillons sont associées à des coefficients de variation élevés qui peuvent être expliqués par les différences de proportions d'aubier et de duramen entre les différents échantillons. En effet, le bois lui-même n'est pas homogène en termes de concentration en éléments minéraux (Clément et Janin, 1976). Chez le Mélèze européen (*Larix decidua*) et laricin (*Larix laricina*), Myre et Camiré (1994) ont observé trois types de distribution des éléments minéraux de l'aubier vers le duramen : taux d'éléments minéraux décroissant, croissant et constant. Ils ont constaté que l'aubier présente les plus fortes concentrations en éléments mobiles (P et K) et les plus faibles concentrations en éléments très peu mobiles (Ca et Mg), à l'inverse de ce qu'ils observent dans le duramen.

IV.8. Retraits transverses et point de saturation des fibres

IV.8.1. Résultats

Les bois étudiés présentent un retrait radial total moyen (compris entre 3,8 % et 6,5 %), un retrait tangentiel total faible (inférieur à 6,5 %) et un point de saturation faible (inferieur à 25 %).

L'analyse statistique des données montre que le retrait radial total, le retrait tangentiel total et le point de saturation des fibres sont significativement différents en fonction de la provenance du bois (figure 59).Le retrait radial total des bois de Tiaret (4, 60 ± 0,22 %) est très

significativement plus élevé que celui de Sidi Bel Abbès (4,28 ± 0,40 %) avec une dispersion plus faible pour Tiaret que pour Sidi Bel Abbès (coefficient de variation respectivement de 4,78 % contre 9,5 %).

De même, le retrait tangentiel total des bois de Tiaret (5,95 ± 0,29 %) est très significativement plus élevé que celui de Sidi Bel Abbès (5,7 ± 0,31 %) avec une dispersion des valeurs équivalente pour deux provenances (respectivement 4,96 % contre 5,46 %).

Pour le point de saturation des fibres, la tendance observée est l'inverse de celle observée pour les deux retraits linéaires transverses. On observe que le point de saturation des fibres des bois de Tiaret (22,88 ± 1,61 %) est très significativement plus faible que celui de Sidi Bel Abbès (23,83 ± 1,13 %) avec une dispersion des valeurs plus élevée pour Tiaret que pour Sidi Bel Abbès (respectivement 7,06 % contre 4,77 %).

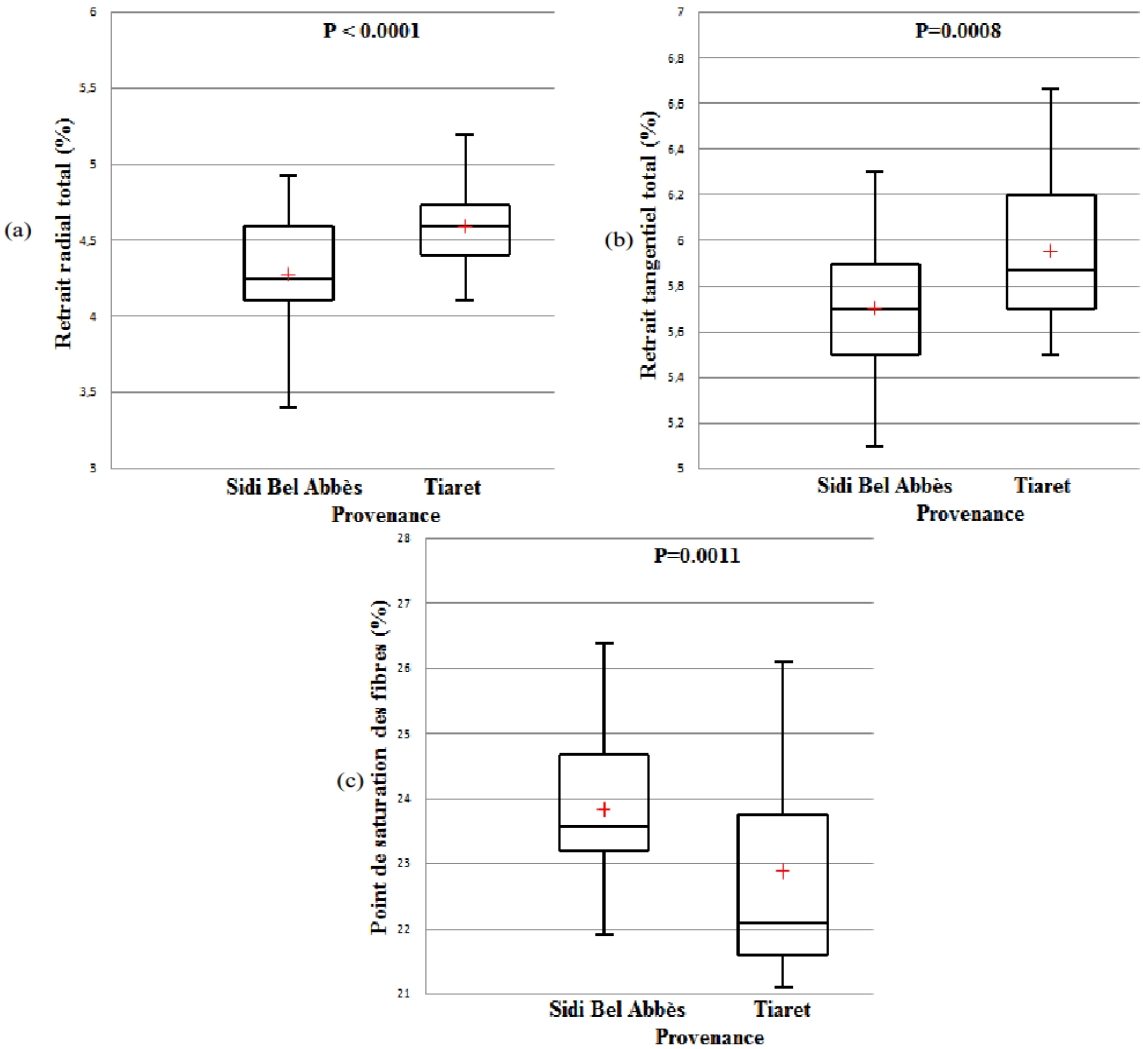


Figure 59. Distributions du retrait radial total (a), du retrait tangentiel total (b), et du point de saturation des fibres(c) du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances.

IV.8.2. Discussions

Une bonne connaissance des variations de la teneur en humidité du bois est un facteur clé dans la détermination des propriétés de stabilité et pour déterminer le choix d'une essence de bois spécifique pour un emploi donné (Elaieb *et al*., 2019). La stabilité dimensionnelle d'un bois est de première importance pour l'industrie forestière (Eastin *et al*. 2001). Elle constitue un critère indispensable dans la sélection des essences ; les bois présentant des retraits de séchage faibles seront toujours privilégiés, ceci d'autant plus pour les emplois à forte valeur ajoutée (Rajemison, 2013).

Les bois de la provenance Sidi Bel Abbès présentent de façon significative des valeurs plus faibles de retrait radial et tangentiel que ceux de Tiaret.

En revanche, le point de saturation des fibres des bois de Tiaret est faible que celui des bois de Sidi Bel Abbès. Cette tendance inverse de celle observée pour les retraits s'expliquerait par la présence des composés volatiles éliminés lors de séchage et sans effets sur le retrait du bois.

La différence de teneur en extractibles entre les deux provenances (teneur plus élevée pour Sidi Bel Abbès) pourrait expliquer les résultats observés pour les retraits. Une corrélation négative entre taux d'extractibles et retraits de séchage a été mise en évidence sur plusieurs essences, notamment feuillues (Kokutse *et al*., 2010 ; Brémaud, 2006 ; Chafe 1987).

En effet, les extractibles agissent comme charge ou comme agents de remplissage des pores et même de blocage des voies d'accès à l'intérieur des membranes (Derbal, 2016 ; Hernández, 1989). Chez le bois de la Bagasse (*Bagassa guianensis*), Bossu *et al*.(2016) ont expliqué un plus faible retrait de séchage et un plus faible PSF dans le duramen que dans l'aubier par la teneur élevée en extractibles dans le duramen. Choong et Achmadi (1991) ont montré sur plusieurs bois tropicaux que l'élimination des extraits à l'eau chaude ou par des solvants organiques conduit à une augmentation des retraits de séchage. De même, Popper *et al*. (2006) ont constaté chez certains bois africains que la teneur en extrait éthanol-toluène du bois est d'autant plus élevée que le taux d'humidité d'équilibre est faible.

L'effet des extractibles sur les retraits et le point de saturation des fibres est dû non seulement à la quantité de composés extractibles présente dans le bois mais aussi et surtout à leur nature chimique (Traoré, 2009). Hernandez (2007) a ainsi montré chez certains bois tropicaux que les extractibles solubles dans le cyclohexane n'ont pas contribué au gonflement du bois. Il a constaté que ces extraits sont localisés dans les cavités cellulaires et n'ont pas occupé les sites de sorption.

Plusieurs auteurs ont étudié la stabilité dimensionnelle des bois en fonction de leurs provenances. Dougabka *et al*. (2021 b) ont montré chez *Faidherbia albida* que les bois de la zone sahélienne où les conditions de croissance sont difficiles présentent des valeurs de retrait tangentiel total et de point saturation des fibres plus faibles que ceux de la zone soudanienne alors que les valeurs de retrait radial total sont identiques dans les deux zones. De même, Maatoug(2003) sur le Thuya du Maghreb (*Tetraclinis articulata* Vahl.Masters) a mis en évidence que les valeurs de retraits les plus faibles sont obtenues pour les bois de la station associée à la plus faible vitesse de croissance des peuplements. Néanmoins, sur le Vène (*Pterocarpus erinaceus*), Traoré (2009) a montré que les retraits du bois provenant de deux régions différentes du point de vue bioclimatique (zone soudanienne et zone guinéenne) ne présentent aucune différence significative. Cette constance des valeurs de retrait pourrait être attribuée à la teneur élevée en extraits qui pourrait masquer l'effet direct des modifications anatomiques liées aux conditions de croissance.

IV.9. Variabilité de la masse volumique

IV.9.1. Résultats

L'analyse statistique des données a montré que la masse volumique des bois provenant de Tiaret (718,5 ± 25,9 kg/m^3) est très significativement supérieure à celle de Sidi Bel Abbès (680,7 ± 34,9 kg/m^3), avec une faible dispersion des valeurs pour les bois des deux provenances (respectivement 5,13 % et 3,61 %) ce qui confirme la relative homogénéité des bois dans chaque station. D'après la norme NF B 51-005 (1985), le bois de cette essence peut être ainsi classé comme un bois mi-lourd (masse volumique moyenne comprise entre 650 et 800) (figure 60).

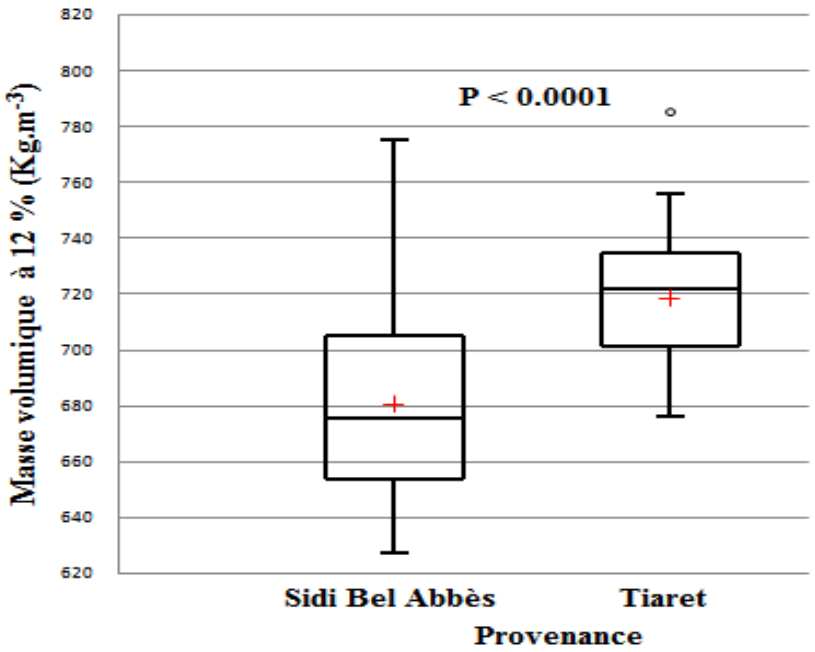


Figure 60. Distribution de la masse volumique de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances étudiées.

IV.9.2. Discussions

La masse volumique du bois est une caractéristique complexe qui est affectée par l'épaisseur de la paroi cellulaire, la proportion des différents types de tissus et le pourcentage de lignine, de cellulose et d'extractibles (Valente *et al*., 1992).Cette variabilité est le résultat des changements de diamètre et de longueur des cellules, de l'épaisseur de la paroi cellulaire et des changements dans les proportions des différents types de cellules dans l'arbre (Caceres Cuadros, 2016).

La différence de masse volumique entre les deux provenances peut s'expliquer par la différence de conditions de croissance des arbres : les bois de Tiaret présentent des masses volumiques plus élevées que ceux de Sidi Bel Abbés dont les conditions de croissance sont plus favorables (largeur de cernes les plus élevées).Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Maatoug *et al*. (2004 b) sur le Thuya de Maghreb (*Tetraclinis articulata* Vahl.Masters) qui ont montré que sur la station de Tiaret dont l'altitude est élevée, le sol riche en calcaire et le climat semi-aride, les largeurs moyennes de cernes sont les plus faibles associées à une vitesse de croissance lente, d'où un bois de densité plus élevée.

Kasraoui (2011) a constaté aussi chez le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) que la diminution de la masse volumique est faible comparativement à l'augmentation de la croissance des arbres. En effet, la faible densité du bois est observée sur des sites présentant des paramètres de croissance favorables (Cutter *et al*. 2004). Chez des conifères, Koga *et al*. (2002) et

Boudouaya (2015) montrent que la densité du bois est négativement corrélée à la largeur moyenne de cerne, l'augmentation du taux de croissance entrainant une diminution de la proportion de bois final et en conséquence une densité plus faible. Cependant, l'influence des facteurs écologiques sur la relation entre la densité du bois et croissance varie selon les essences étudiées (Maatoug, 2003). Même si de nombreuses études ont porté sur l'influence des conditions de croissance (climat, sol, altitude) sur la densité du bois, l'effet de ces conditions de croissance n'est pas toujours très clair (Caceres Cuadros, 2016).Polge (1966), un des précurseurs français en matière d'étude des relations croissance - qualité des bois, avait montré que les facteurs les plus importants dans les variations de densité du bois sont les facteurs climatiques qui conditionnent l'approvisionnement en eau.

Dougabka *et al*. (2021b) ont constaté chez *Faidherbia albida* de provenance Tchadienne qu'une densité plus élevée est observée sur les bois provenant de la zone sahélienne où les conditions de croissance sont les plus difficiles liées au déficit de précipitations. En effet, plus les précipitations sont importantes, plus le taux de croissance des arbres est élevé ce qui se traduit par une diminution de la masse volumique et donc de la qualité du bois (Fei et Ruan, 2001).

La qualité du sol est aussi considérée comme un des facteurs limitant la croissance des arbres. La richesse du sol en différents éléments nutritifs (macro et oligo-éléments) influe sur la croissance des arbres. Ce facteur constitue en effet, avec le climat, un critère déterminant dans le choix du type de sylviculture (Hamada, 2016). Keller *et al*.(1976) ont montré chez le hêtre (*Fagus sylvatica*) que la densité la plus élevée est observée sur les sols les plus fertiles et tous les facteurs qui réduisent la fertilité des stations, qu'ils soient climatiques, chimiques ou physiques, contribuent à une diminution de la densité du bois. Rigatto *et al*. (2004) ont démontré que les caractéristiques physiques du bois de Pin taeda (*Pinus taeda*) sont étroitement liées aux propriétés physiques et chimiques du sol, les bois provenant de sites à taux de croissance élevé, généralement les sites les plus argileux, présentent des faibles valeurs de densité.

Les travaux de Polge (1969) ont révélé aussi chez le Pin Maritime (*Pinus pinaster*) que l'augmentation de la croissance par des fertilisants diminuerait la densité du bois. Toutefois, Mörling (2002) n'a montré aucun effet significatif de la fertilisation sur la densité moyenne des cernes du bois de Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*).

L'altitude est un facteur physiographique important qui influe aussi sur la croissance et le développement des plantes ; la structure anatomique des bois peut ainsi montrer de grandes variations suivant les niveaux d'altitude (Keleş, 2020). En effet, la pression atmosphérique et

la température de l'air diminuent lorsque l'altitude augmente (Körner, 2007). Zobel et van Buijtenen (1989) ont montré que le bois d'arbres provenant d'altitudes élevées a une densité plus faible que ceux d'altitudes plus basses. Cependant, l'effet de l'altitude sur la densité du bois peut être variable et diffère selon les espèces, feuillues ou résineuses. Bakhshi (2003) a montré chez le Cyprès que la densité et certaines propriétés mécaniques du bois augmentent avec l'élévation d'altitude. Par contre, Slavko *et al*.(2003) ont constaté que la densité du bois de Hêtre(*Fagus sylvatica*) diminue avec l'augmentation de l'altitude. D'autre part, Kiaei et Samariha(2011) ont constaté que la densité du bois de *Pinus eldarica* Medwen altitude intermédiaires est supérieure aux autres classes d'altitude.

IV.10. Variabilité du module d'élasticité longitudinal

IV.10.1. Résultats

L'analyse statistique des données a montré que le module d'élasticité longitudinal des bois provenant de Tiaret (6704 ± 801 MPa) est très significativement supérieur à celui de Sidi Bel Abbès (5354 ± 608 MPa), avec une dispersion des valeurs relativement faible pour les deux provenances (respectivement 11,94 % et 11,36 %), ce qui confirme l'homogénéité du bois dans chaque station. D'après la norme NF B 51-008 (1987), le module d'élasticité longitudinal de cette essence peut être considéré comme faible (seuil à 10000 MPa) (figure 61).

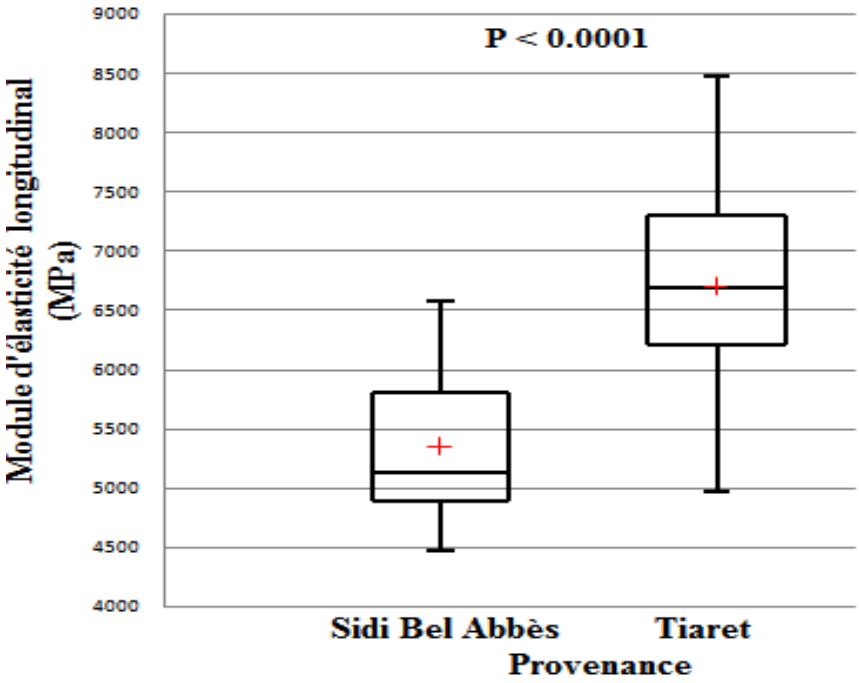


Figure 61. Distribution du module d'élasticité longitudinal de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances.

IV.10.2.Corrélation entre la densité et le module d'élasticité longitudinal

L'analyse statistique des données n'a révélé aucune corrélation significative entre la densité et le module d'élasticité longitudinale du bois pour les deux provenances (figure 62).

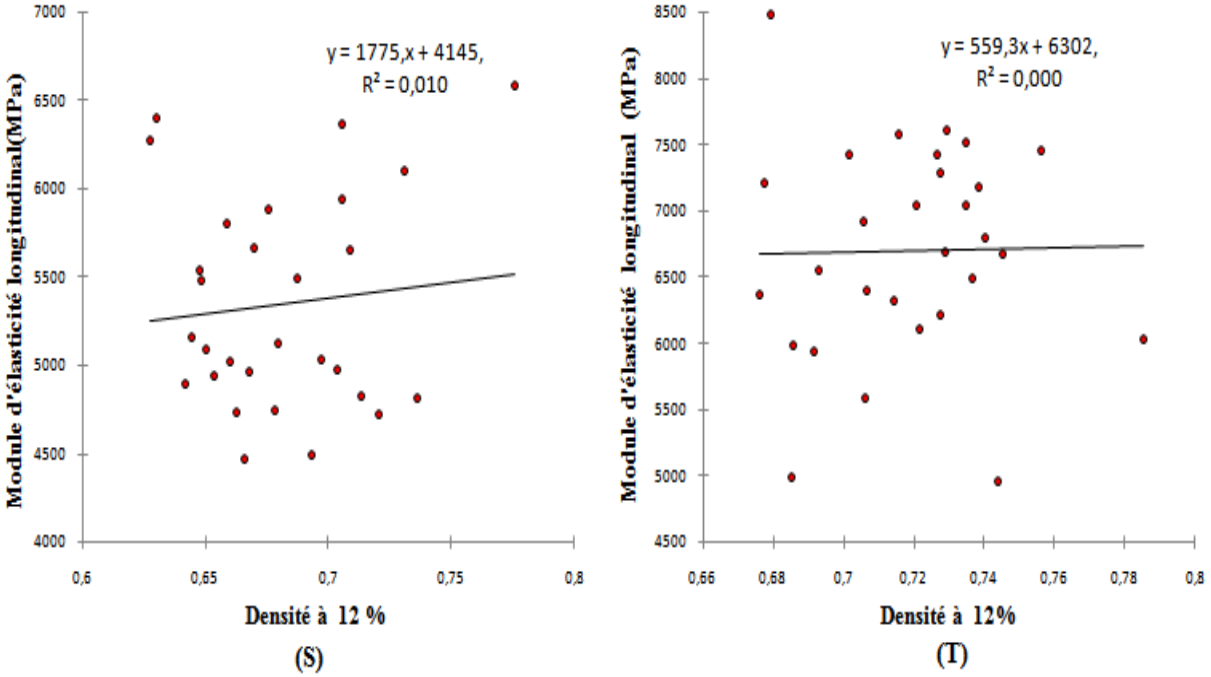


Figure 62. Relation entre la densité et le module d'élasticité longitudinal des deux provenances Sidi Bel Abbès(S) et Tiaret (T).

IV.10.3. Discussions

Le module d'élasticité longitudinal (ou rigidité) est une mesure de la capacité d'une pièce à résister à la déformation sous l'effet d'une charge. Pour l'industrie de la construction, la qualité d'un bois est principalement liée à sa rigidité.

L'analyse de la variance a montré que l'effet provenance est significatif pour le module d'élasticité longitudinal : les bois de *Juniperus oxycedrus* présentent un module d'élasticité longitudinale plus élevé pour la provenance Tiaret dont les conditions de croissance sont moins favorables avec une vitesse de croissance plus lente qu'à Sidi Bel Abbès. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Bhat et Priya (2004) qui ont montré que le module élasticité du bois de Teck (*Tectona grandis*) provenant d'arbres à croissance rapide est inférieur à celui du bois d'arbres à croissance plus lente.

Maatoug (2003) a aussi mis en évidence des différences dans le module élasticité longitudinal selon la provenance du bois. Il a montré que les bois d'arbres dont la vitesse de croissance est lente donnent des valeurs plus élevées de module d'élasticité longitudinal par rapport à d'autres stations plus favorables et fertiles.

En effet, les variations anatomiques (paramètres du plan ligneux) liées aux conditions de croissance (nature du sol et variations climatiques), dont la conséquence majeure est l'hétérogénéité dans la distribution de la largeur de cernes, sont à l'origine de la variabilité des propriétés physico-mécaniques du bois (Traoré, 2009).

Keunecke *et al* (2007) ont montré que les variations des caractéristiques anatomiques et du taux d'extractibles jouent un rôle important dans le comportement viscoélastique du bois. Toutefois, les relations entre les propriétés mécaniques du bois et le taux de croissance varient considérablement selon l'espèce et les propriétés du bois étudiées (Zhang, 1995).

La densité c'est un paramètre largement utilisé par les technologues pour évaluer les propriétés mécaniques et physiques du bois. Nos résultats montrent qu'il n'y a pas de corrélation significative entre ce paramètre et module élasticité longitudinal.

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Meite *et al*.(2007) qui ont mis en évidence le même résultat sur des bois de Pin maritime et de Pin d'Alep.

Zhang(1995) a constaté chez certains bois que l'effet du taux de croissance sur les propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité longitudinal et le module de rupture ne peut pas être estimé exactement par la relation de la densité du bois avec le taux de croissance. Il a trouvé que les propriétés mécaniques sont généralement plus influencées par le taux de croissance que la densité.

Cependant, de façon générale, une relation linéaire entre le module d'élasticité longitudinal et la densité est souvent mise en évidence dans la littérature, et les deux variables sont souvent fortement corrélées positivement (Feio, 2006 ; Izekor *et al*., 2010).

D'autre part, Boudouaya (2015) chez le pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) a mis en évidence une différence de corrélation entre la densité et le module d'élasticité longitudinal selon la provenance des bois. Elle a constaté que la corrélation de la densité avec le module d'élasticité longitudinal est très faible pour les arbres de Sidi Bel Abbès (r= 0,098) tandis qu'elle est moyennement élevée pour ceux de Tiaret (r= 0,449). Daya (2006) mentionne que la vitesse de croissance et la composition chimique du bois peuvent expliquer les variations de la relation entre l'infradensité et le module d'élasticité longitudinal.

L'absence de corrélation entre la densité et le module d'élasticité longitudinal peut s'expliquer par le fait que le taux d'extractible élevé de *Juniperus oxycedrus* impacte la densité (densité d'autant faible que le taux d'extractible est élevé) mais n'influe pas le module d'élasticité. Maatoug *et al*.(2004a) ont constaté qu'un module d'élasticité longitudinal faible associé à une densité élevée du bois de Thuya(*Tetraclinis articulata*) est lié au taux d'extractibles élevé qui augmente sa densité mais n'influe pas sur cette caractéristique

mécanique. De même, Dougabka *et al*.(2021a) ont expliqué les valeurs faibles de module d'élasticité longitudinal en rapport avec une densité élevée du bois de *Balanites aegyptiaca* provenant de la zone tchadienne et soudanienne par le taux très variable des extractibles dans le bois en relation avec la provenance.

IV.11.Variabilité de la contrainte de rupture en compression axiale

IV.11.1. Résultats

L'analyse statistique des données a montré que la résistance à la compression axiale des bois provenant de Tiaret (45,2 ± 2,0 MPa) est très significativement supérieure à celle des bois de Sidi Bel Abbès (38,7 ± 2,6 MPa) avec une faible dispersion des valeurs pour les bois des deux provenances (respectivement 4,5 % et 6,7 %) ce qui confirme l'homogénéité du bois dans chaque station (même résultat pour le module d'élasticité longitudinal). D'après la norme NF B 51-007(1985), le bois de cette essence présente une résistance faible (contrainte ≤ 45 MPa) (figure 63).

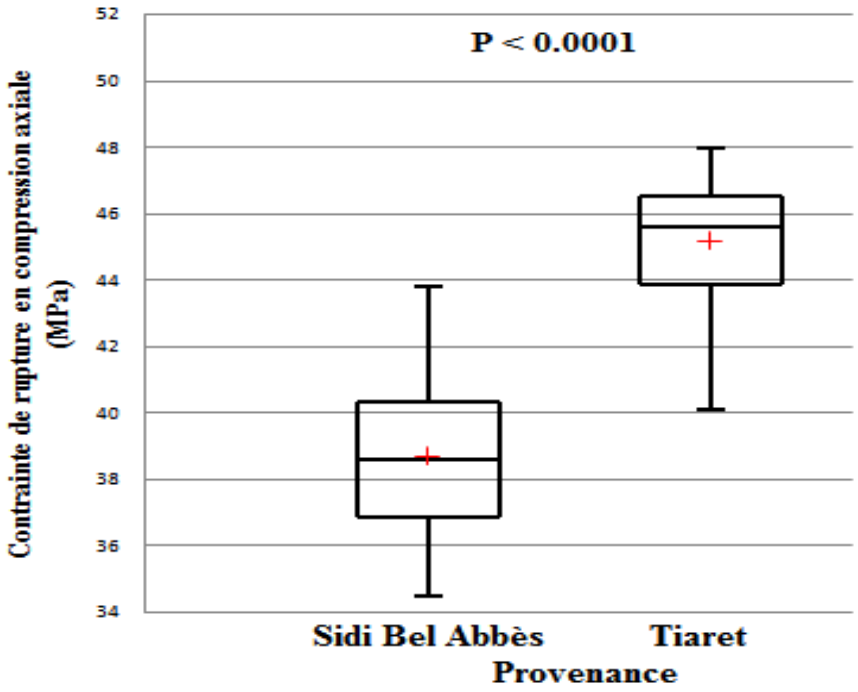


Figure 63. Distribution des contraintes de rupture en compression axiale de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances.

IV.11.2.Corrélation de la densité avec la contrainte de rupture en compression axiale

La figure 64 représente la corrélation entre la densité et la contrainte de rupture en compression axiale pour les deux provenances.

Cette corrélation est élevée pour les bois de Sidi Bel Abbès(r = 0,68) alors qu'elle est modérée (r = 0,43) pour les bois de Tiaret.

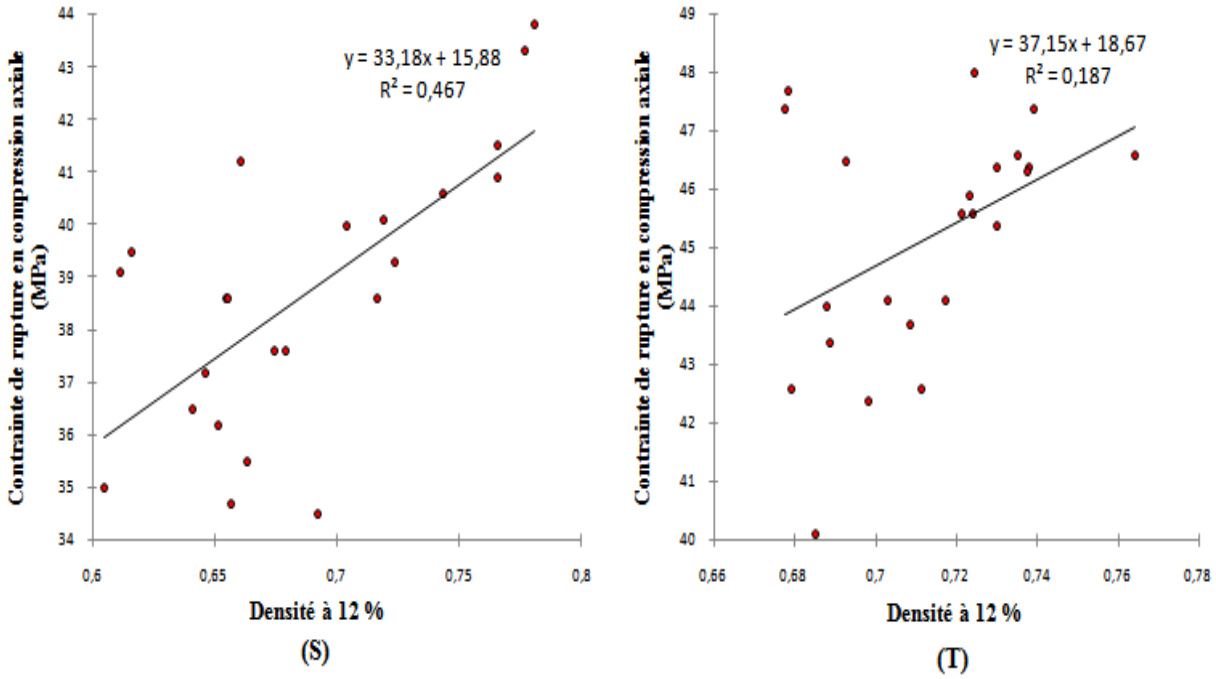


Figure 64. Relations entre la densité et la contrainte de rupture en compression axiale pour les deux provenances Sidi Bel Abbès(S) et Tiaret (T).

IV.11.3. Discussions

La résistance à la rupture d'un matériau est une des propriétés mécaniques majeures à prendre en compte pour le dimensionnement des structures. C'est un paramètre nécessaire à l'évaluation de l'aptitude d'un bois à un usage en structure (Jacques, 2003). La mesure de la contrainte de rupture en compression axiale permet de déterminer la capacité d'un bois à supporter les charges en service (Bouslimi, 2014).

Les résultats obtenus ont montré que l'effet provenance est significatif pour la contrainte de rupture en compression axiale ; les bois de Tiaret présentent une contrainte de rupture plus élevés que ceux de Sidi Bel Abbès. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Dougabka *et al*. (2021b) qui ont montré que la contrainte de rupture en compression axiale du bois de *Faidherbia albida* la plus élevée est observée sur les bois provenant de la zone sahélienne où les conditions de croissance sont les plus difficiles, liées au déficit de précipitation. Ils ont constaté que cette différence est liée à la densité plus élevée des bois de la zone sahélienne.

Une résistance à la compression axiale élevée peut s'expliquer par deux phénomènes : l'augmentation de la cristallinité de la cellulose et la modification du réseau de lignine (Hannouz, 2014).

La connaissance du degré de cristallinité de la cellulose est très utile pour l'évaluation des propriétés du bois, l'augmentation de la cristallinité de la cellulose entraîne une valeur plus faible de gonflement et de sorption d'eau, et des valeurs plus élevées de densité, de dureté et de résistance à la compression(Gawron *et al*.,2012). En effet, la cristallinité élevée de la cellulose dans le bois est due à la diminution des régions amorphes (Bhuiyan *et al*., 2000).

La concentration de lignine dans le réseau cellulose - hémicellulose peut affecter positivement sur la résistance à la compression (Gindl et Teischinger, 2002). La lignine du bois agit comme un polymère de cimentation et de fixation dans la paroi cellulaire (Ben Jmeaa, 2019).

De façon générale, l'effet des conditions de croissance sur les propriétés physicomécaniques du bois est variable et dépend entre autre du facteur espèce (Kask, 2015).

Nos résultats mettent en évidence pour les deux provenances une corrélation positive entre la densité et la contrainte de rupture en compression : la compression axiale augmente de façon linéaire avec la masse volumique. La densité constitue ainsi une propriété indicatrice de la variabilité de cette caractéristique mécanique.

Sur du Mélèze hybride (*Larix* x *eurolepis* Henry), Jacques (2003) a montré que la densité apparait très fortement liée à deux caractéristiques mécaniques, la contrainte de rupture en flexion statique (r= 0,94) et en compression axiale(r= 0,92). De même, Doucet(2018) a montré que le classement de la contrainte de rupture en compression axiale dépend de la densité du bois. Dans leur synthèse de référence sur les propriétés des bois, Kollmann *et al*. (1968) montre que de manière générale, la résistance à la compression axiale croit avec la densité.

Conclusion générales et perspectives

Conclusion générale et perspectives

L'étude conduite sur le bois de *Juniperus oxycedrus* a porté sur des spécimens issus de deux provenances associées à des conditions écologiques différentes, dans la région de Sidi Bel Abbès d'une part et de Tiaret d'autre part. La seconde provenance (Tiaret) correspond à une altitude élevée, le sol est caillouteux, fortement calcaire et correspond à un bioclimat semi-aride avec des hivers rigoureux et des étés chauds et secs ; les conditions de croissance de *Juniperus oxycedrus* sont moins favorables dans la provenance de Tiaret.

Malgré les contraintes administratives liées à l'abattage, un total de 4 arbres non fourchus, bien venants, aux troncs sans défaut ont été prélevés dans chaque région. L'objectif principal de ce travail de thèse était d'étudier la qualité du bois de *Juniperus oxycedrus* selon ces deux provenances ; la valorisation adéquate de cette espèce nécessite de comprendre la relation entre la croissance et la qualité du bois pour le développement de l'utilisation dans certains emplois.

Les travaux se sont organisés autour de six principaux volets d'étude : la variation de la largeur moyenne des cernes et des proportions d'aubier, la quantification et la caractérisation des fractions extractibles et des polyphénols totaux, la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons et des termites, la variabilité des macromolécules du bois, l'étude comparative de la composition minérale des cendres et la variation des propriétés physico-mécaniques.

* Pour le premier volet, les caractéristiques dendrométriques mettent en évidence des relations entre la largeur moyenne des cernes et les proportions d'aubier selon la provenance des bois et l'âge des arbres. Les bois de la provenance de Sidi Bel Abbès présentent une largeur moyenne des cernes plus élevée que ceux de la provenance de Tiaret, en relation avec des conditions de croissance plus favorables, sachant que l'âge des arbres joue un rôle négatif sur leur croissance radiale. Les proportions d'aubier les plus élevés caractérisent les bois de Tiaret dont les conditions de croissance sont moins favorables, et diminuent avec l'âge.

* Pour le deuxième volet, nous avons caractérisé et quantifié les fractions extractibles et les polyphénols totaux du duramen de ces bois. Les taux d'extractibles (1,35 % et 1,19 % pour l'extraction à l'eau, 14,17 % et 9,84 % pour l'extraction au toluène/ éthanol respectivement pour les provenances Sidi Bel Abbès et Tiaret) ont été comparés pour les deux provenances, et leur composition chimique a été analysée. Un couplage GC-MS a été utilisé pour l'identification et la quantification relative des molécules extractibles. La caractérisation des extractibles a montré la richesse du duramen en sesquiterpènes et sesquiterpénoïdes. L'extraction des polyphénols totaux a été effectuée par sonication puis macération à partir de

méthanol ou d'acétone à 80 %.Les polyphénols totaux contenus dans les différents extraits ont été évalués par la méthode de Folin Ciocalteu en utilisant l'acide gallique comme standard. Les résultats ont montré que les teneurs en polyphénols totaux variaient selon la provenance et selon le type de solvant utilisé. La teneur en polyphénols totaux extraite au méthanol est supérieure à celle extraite à l'acétone. L'analyse montre aussi des différences significatives entre les deux provenances pour les polyphénols totaux extraits au méthanol ; la teneur en polyphénols totaux des bois provenant de Sidi Bel Abbès (8,46 mg EAG/g MS) est significativement supérieure à celle de Tiaret (7,28 mg EAG/g MS).Par contre, on n'observe aucune différence significative entre les deux provenances pour les polyphénols totaux extraits à l'acétone.

Le troisième volet avait pour objet d'évaluer la durabilité naturelle du duramen vis-à-vis de deux espèces de champignons de pourriture brune (*Rhodonia placenta* et *Coniophora puteana*) et d'une espèce de termites (*Reticulitermes flavipes*). Malgré les différences marquées de nature des molécules et leur variation quantitative en fonction de la provenance, les tests de durabilité naturelle ont montré que le bois de cette espèce est très durable vis-à-vis des champignons de pourriture cubique et résistant aux attaques de termites de l'espèce *Reticulitermes flavipes*, ceci pour les deux provenances. La durabilité naturelle du bois vis-à-vis de ces agents biologiques de détérioration est liée à la teneur et à la nature des substances extractibles et des polyphénols totaux identifiés et analysés dans les bois.

Concernant le quatrième volet, le dosage des macromolécules du duramen a été réalisé après extraction des extractibles totaux en utilisant sept bains successifs et alternés d'éthanol 95 % à 80 °C et d'eau ultra-pure à 100 °C. Les résultats ont montré que l'effet provenance est significatif pour les extractibles totaux et l'α-cellulose. Les bois de la provenance Sidi Bel Abbès présentent un taux d'extractibles plus élevé que ceux de la provenance Tiaret. À l'inverse, les bois de la provenance de Tiaret présentent une teneur en α-cellulose plus élevée que ceux de la provenance Sidi Bel Abbès. En revanche, pour la teneur en lignine totale et en hémicelluloses, aucune différence significative n'a été observée entre les bois de deux provenances.

L'analyse et la comparaison des compositions minéralogiques montrent qu'aucune différence significative entre les deux provenances n'a été observée pour la composition minérale des cendres (calcium, phosphore, potassium, magnésium, sodium, fer, silice) et le taux de cendre. L'analyse de la composition minérale a montré également la richesse du bois en calcium.

Le sixième volet a consisté à déterminer les propriétés physiques et mécaniques. Les caractéristiques physiques étudiées sont les retraits transverses, le point de saturation des

fibres et la masse volumique. L'analyse a montré que les bois de Tiaret présentent des retraits transverses plus élevés que ceux de la provenance Sidi Bel Abbès. Cette tendance est l'inverse de celle observée pour le point de saturation des fibres. Quelle que soit la provenance, le bois de cette essence présente un retrait radial total moyen, un retrait tangentiel total faible et un point de saturation des fibres faible. La bonne stabilité dimensionnelle du bois est due à la richesse et à la nature chimique des substances extractibles. La masse volumique moyenne du bois provenant de Tiaret (718,5 kg/m^3) est plus élevée que celle de Sidi Bel Abbès (680,7 kg/m^3) ; le bois de cette essence peut donc être qualifié de mi-lourd.

Les études des propriétés mécaniques ont essentiellement concerné le module d'élasticité longitudinal et la contrainte de rupture en compression axiale. Les corrélations entre la densité et ces propriétés ont également été établies. L'analyse de la variance a montré que l'effet provenance était très significatif sur ces propriétés ; les bois de la provenance Tiaret présentent un module d'élasticité longitudinal et une contrainte de rupture en compression axiale plus élevés (respectivement 6704MPa et 45,2 MPa) que ceux de la provenance de Sidi Bel Abbès (respectivement 5354MPa et 38,7MPa). Le bois de *Juniperus oxycedrus* présente donc un module de Young et une résistance en compression faibles. Les résultats obtenus ont montré l'absence de corrélation significative entre la densité et le module d'élasticité longitudinal mais une corrélation positive significative entre la densité et la contrainte de rupture en compression axiale.

Les résultats obtenus à l'issue de notre étude montrent que le bois de *Juniperus oxycedrus* peut être utilisé dans une large gamme d'emplois, entre autres sous forme de bois d'œuvre pour son effet répulsif sur les insectes et pour son odeur agréable.

Perspectives

Les recherches que nous avons conduites sur le bois de l'espèce *Juniperus oxycedrus* et les résultats obtenus ouvrent sur de nombreuses pistes d'investigations scientifiques à venir.

Parmi ces voies d'approfondissement, on peut notamment retenir :

* L'étude plus approfondie de l'effet des pratiques sylvicoles sur la vitesse de croissance des arbres et la qualité du bois.

* L'évaluation de l'effet de l'âge des arbres sur les propriétés étudiées.

* L'étude des fonctions des extractibles (antifongique, insecticide, antibactérien, antioxydant…) en vue de l'utilisation de cette espèce comme co-biocide dans des formulations de préservation du bois.

* L'étude de la variabilité des caractères anatomiques en relation avec la variabilité des caractéristiques chimiques, physiques et mécanique.
* La caractérisation comparative des huiles essentielles des bois des deux provenances en vue d'une utilisation en pharmacopée et à des fins thérapeutiques.

Ces travaux peuvent être élargis à d'autres espèces locales de résineux et de feuillus insuffisamment connus et par conséquent peu commercialisés.

Références bibliographiques

Références bibliographique

Abdellah F., Laid B., Hammoudi S. M., Benaraba R., 2018. In vitro evaluation of the antimicrobial and antioxidant activities of Juniperus oxycedrus essential oil (cade oil). International Journal of Innovation Engineering and Science Research, 2 (6): 66-76.

Abe T., Bignell D. E., Higashi M., Higashi T., Abe Y., 2000. Termites: evolution, sociality, symbioses, ecology. Springer Science & Business Media.

Achir M., Hellal B., 2016. Réflexion sur les variations pluviométriques de la région de Tiaret (Algérie occidentale) durant la période 1984-2015.European Scientific Journal, 11: 498-508.

Adams R. P., 2014. Junipers of the world: the genus Juniperus. Trafford Publishing.

AFNOR, 1985. NF B51-005: Bois. Détermination de la masse volumique, Paris.

AFNOR, 1985. NF B51-006: Bois. Détermination du retrait, Paris.

AFNOR, 1985. NF B51-007 : Bois. Essai de compression axiale, Paris.

AFNOR, 1987. NF B51-008 : Bois. Essai de flexion statique, Paris.

Ait Si Said Z., 2017. Effet des coupes partielles sur la largeur des cernes, la masse volumique du bois et les propriétés anatomiques des trachéides de l'épinette blanche (picea glauca [moench] voss) dans un peuplement mixte. Thèse de doctorat en biologie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Canada, 124 p.

Akkol E. K., Güvenç A., Yesilada E., 2009. A comparative study on the antinociceptive and anti-inflammatory activities of five Juniperus taxa. Journal of ethnopharmacology, 125(2): 330-336.

Aloui F., Ayadi N., Charrier F., Charrier B., 2004. Durability of European oak (Quercus petraea and Quercus robur) against white rot fungi (Coriolus versicolor): relations with phenol extractives. Holz als Rohund Werkstoff, 62: 286-290.

Al-Snafi A. E., 2018. Pharmacological and therapeutic effects of Juniperus oxycedrus-A review. Indo American Journal of Pharmaceutical Sciences, 5(4): 2198-2205.

Anda R. R., Koch G., Richter H. G., Talavera F. J. F., Guzmán J. A. S., Satyanarayana K. G., 2019. Formation of heartwood, chemical composition of extractives and natural durability of plantation-grown teak wood from Mexico. Holzforschung, 73(6): 547-557.

Angelier E., 2008. Les sciences de la complexité et le vivant. Paris, France, Éditions Lavoisier Tec et Doc, 204 p.

Anke H., Weber R. W., 2006. White-rots, chlorine and the environment–a tale of many twists. Mycologist, 20 (3) : 83-89.

Arnoul Jarriault B., 2015. Extraction des hémicelluloses de pâtes papetières pour la production de pâte à dissoudre. Thèse de doctorat en mécanique des fluides, énergétique, procédés, Université Grenoble Alpes, France ,232 p.

Athanassiou C. G., Kavallieratos N. G., Evergetis E., Katsoula A. M., Haroutounian S. A., 2013. Insecticidal efficacy of silica gel with Juniperus oxycedrus ssp. oxycedrus (Pinales: Cupressaceae) essential oil against Sitophilus oryzae (Coleoptera: Curculionidae) and Tribolium confusum (Coleoptera: Tenebrionidae). Journal of economic entomology, 106 (4) : 1902-1910.

Aubert G., 1978. Méthodes d'analyses des sols. Marseille, France, Centre régional de documentation pédagogique, 191 p.

Avat F., 1993. Contribution à l'étude des traitements thermiques du bois jusqu'à 300°C : Transformations chimiques et caractérisations physico-chimiques. Thèse de doctorat en énergétique, École des Mines de Paris et de St Étienne, France, 363p.

Bakhshi R., 2003.The influence of altitude on wood properties of cypress wood in western part of Mazandran province-Iran. Thèse de doctorat, Université islamique d'Azad, Téhéran, Iran, 136 p.

Balaban M., Atik C., Uçar G., 2003. Fungal growth inhibition by wood extracts from Juniperus foetidissima and J. oxycedrus. Holz als Rohund Werkstoff, 61: 231-232.

Bedounguindzi W.F., Candelier K., Edou Engonga P., Dumarçay S., Thévenon M.F., Gérardin P., 2020. Anti-termite and anti-fungal bio-sourced wood preservation ingredients from Dacryodes edulis (G.Don) H.J. Lam resin. Holzforschung, 74 (8).

Benabdeli K., 1996. Aspects physionomico-structuraux de la végétation ligneuse face à la pression anthropozoogène dans les monts de Tlemcen et les monts de Dhaya (Algérie occidentale). Thèse de Doctorat en écologie appliquée, Université de Sidi Bel Abbès, Algérie, 356 p.

Benderradji M. E. H., Alatou D. J., Arfa A. M. T., Benachour K. H., 2006. Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation Impact du phénomène en Algérie. New Medit, 4 : 15-22.

Ben Jmeaa A., 2019. Élaboration, procédé et caractérisation des composites renforcés avec haute teneur en fibre de cellulose. Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Canada, 138 p.

Bennabi F., Hamel L., Bachir Bouiadjra S. E., Ghomari S., 2012. Ressources hydriques sous tension et enjeux de développement durable dans la wilaya de Sidi Bel Abbes (Algérie occidentale). Méditerranée, 118 (Dynamique et gestion des cours d'eau méditerranéens et de leurs marges) : 105-111.

Ben Sassi A., Harzallah-Skhiri F., Bourgougnon N., Aouni M., 2008. Antiviral activity of some Tunisian medicinal plants against Herpes simplex virus type 1. Natural Product Research, 22(1) : 53-65.

Bensouiah R., 2004. Politique forestière et lutte contre la désertification en Algérie. Du barrage vert au PNDA. Forêt méditerranéenne, 25 (3) : 191-198.

Berriah A., 2015. Les reboisements de chêne liège dans l'Ouest Algérien: Bilan et perspectives d'amélioration. Mémoire de Magister en Gestion et Conservation des Ecosystèmes, Université de Tlemcen, Algérie, 158 p.

Bhat K. M., Priya P. B., 2004. Influence of provenance variation on wood properties of teak from the Western Ghat region in India. Iawa Journal, 25 (3) : 273-282.

Bhuiyan M.T. R., Hirai N., Sobue N., 2000. Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. Journal of Wood Science, 46 (6) : 431-436.

Boggia R., Turrini F., Villa C., Lacapra C., Zunin P., Parodi B., 2016. Green Extraction from Pomegranate Marcs for the Production of Functional Foods and Cosmetics. Pharmaceuticals, 9 (4): 63.

BNEDER., 2009. Plan national de développement forestier (PNDF). Rapport de synthèse national, 87 p.

Bogolitsyn K. G., Zubov I. N., Gusakova M. A., Chukhchin D. G., Krasikova A. A., 2015. Juniper wood structure under the microscope. Planta, 241(5) : 1231-1239.

Boizot N., Charpentier J.-P., 2006. Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier. Cahier des Techniques de l'INRA, 2006 : 79-82.

Bonnier G., 1990**.** La grande flore en couleurs. Tome 4. Editions Belin, Paris, 1401p.

Bopenga C., 2020. Valorisations potentielles des substances extractibles et étude de la composition chimique en relation avec la durabilité naturelle du Noisetier du Gabon : Coula edulis Baill. Thèse de doctorat en sciences et technologies industrielles, spécialité sciences du bois, Université de Lorraine, France, 209 p.

Borsali A. H., Banandeli K., Gros R., 2014. Dynamique structurelle de la végétation en zone semi-aride: cas de la forêt de Fénouane (monts de Saida, Algérie occidentale). Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie, 10 (2).

Bossu J., Beauchêne J., Estevez Y., Duplais C., Clair B., 2016. New insights on wood dimensional stability influenced by secondary metabolites: The case of a fast-growing tropical species Bagassa guianensis Aubl. PLoS One, 11(3) : e 0150777.

Bouazza M., 1995. Etude phyto-ecologique de la steppe à Stipa tenassicima L. et à Lygeum spartum L. au sud de Sebdou (Oranie-Algérie). Thèse de doctorat en biologie des organismes et populations, Université de Tlemcen, Algérie, 153 p.

Boudouaya M., 2015. Contribution à une étude des propriétés physiques et mécaniques du bois du pistachier de l'Atlas (Pistacia atlantica Desf.) en Algérie Nord-occidentale. Thèse de doctorat en écologie appliquée, Université de Sidi Bel Abbes, Algérie, 187 p.

Boudouaya M., Benhassaini H., Bendimered F. Z., Mothe F., Fournier M., 2015. Évaluation de la durabilité naturelle du bois de Pistacia atlantica Desf. du nord de l'Algérie. Bois et Forêts des Tropiques, 325 (3) : 49-58.

Boudy P., 1955. Economie forestière nord-africaine. Tome 4 : Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie. Larose, Paris, 483 p.

Bouet J.P., Humbert J.L., 2003. Le bois : une énergie renouvelable. Scéréncrdp de Champagne-Ardenne ,59 p.

Bouguenaya N., 2014. Enjeux des aménagements forestiers dans la wilaya de Sidi bel Abbes (Algérie nord-occidentale) et stratégies de développement durable. Thèse de doctorat en écologie, Université de Sidi Bel Abbès, Algérie, 163 p.

Bouhlal K., Meynadier J.M., Peyron J.L., Peyron L., Marion J.P., Bonetti G., *et al*., 1988. Le cade en dermatologie, Parfums, Cosmétiques et Aromes, 83:73-82.

Bourgou S., Serairi Beji R., Medini F., Ksouri R., 2016. Effet du solvant et de la méthode d'extraction sur la teneur en composés phénoliques et les potentialités antioxydantes d'Euphorbia helioscopia. Journal of New Sciences, 28 (12): 1649-1655.

Bourreau D., 2011. Etude de faisabilité d'un lamellé-collé endémique en Guyane française. Thèse de doctorat en génie mécanique, Université des Antilles et de la Guyane, France, 164 p.

Bouslimi B., 2014. Variation intra-arbre, intrasites et intersites des attributs de la qualité du bois du Thuya occidental (*Thuja occidentalis* L.). Thèse de doctorat en science de l'environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Canada, 395 p.

Bouzid K., 2015. Contribution à l'étude des options de valorisation de l'espèce Arbutus unedo L. dans l'Ouest Algérien. Thèse de Doctorat en Science de l'environnement, Université de Sidi Bel Abbés, Algérie, 168 p.

Bowyer J. L., Schmulsky R., Haygreen J. G., 2007. Forest product and woodscience (5e éd.). Oxford : Blackwell Publishing.

Brahim I., 2017. Cartographie et Répartition du chêne vert dans la forêt de Sdamas Chergui (Commune de Medroussa, Wilaya de Tiaret).Mémoire de master en écologie, gestion et conservation de la biodiversité, Université de Tlemcen, Algérie, 123 p.

Brancheriau L., 2013. Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites. Thèse de doctorat en mécaniques des matériaux, Université de Montpellier II, France, 123 p.

Brémaud I., 2006. Diversité des bois utilisés ou utilisables en facture d'instruments de musique. Étude expérimentale des propriétés vibratoires en direction axiale de types de bois contrastés en majorité tropicaux. Relations à des déterminants de microstructure et de composition chimique secondaire. Thèse de doctorat en mécanique des matériaux complexes, des structures et des systèmes, Université de Montpellier II, France, 324 p.

Broda M., 2020. Natural Compounds for Wood Protection against Fungi - A Review. Molecules, 25: 3538.

Brunetti M., De Capua E. L., Macchioni N., Monachello S., 2001. Natural durability, physical and mechanical properties of Atlas cedar (Cedrus atlantica Manetti) wood from Southern Italy. Annals of forest science, 58 (6) : 607-613.

Caceres Cuadros C., 2016. Influence de la qualité du bois sur les dimensions des copeaux produits par une équarrisseuse-fragmenteuse. Thèse de doctorat en science du bois, Université Laval de Québec, Canada, 220 p.

Calaciura B., Spinelli O., 2008. Management of Natura 2000 habitats. 5210 Arborescent matorral with Juniperus spp. European Commission, Brussels.

Celimene C.C., Micales J.A., Ferge L., Young R.A., 1999. Efficacy of Pinosylvins against White-Rot and Brown-Rot Fungi. Holzforschung, 53: 491-497.

Chafe S. C., 1987. Collapse, volumetric shrinkage, specific gravity and extractives in Eucalyptus and other species. Wood science and technology, 21 (1) : 27- 41.

Chaouch M., 2011. Effet de l'intensité du traitement sur la composition élémentaire et la durabilité du bois traité thermiquement : Développement d'un marqueur de prédiction de la résistance aux champignons basidiomycètes. Thèse de doctorat en sciences du bois et des fibres, Université de Nancy, France, 218 p.

Chaouche T. M., Haddouchi F., Atik-Bekara F., Ksouri R., Azzi R., Boucherit Z., *et al*., 2015. Antioxidant, haemolytic activities and HPLCDAD-ESI-MSn characterization of phenolic compounds from root bark of Juniperus oxycedrus subsp oxycedrus. Industrial Crops and Products, 64 : 182-187.

Chaouche T. M., Haddouchi F., Ksouri R., Medini F., Atik-Bekara f., 2013. In vitro evaluation of antioxidant activity of the hydro-methanolic extracts of Juniperus oxycedrus subsp oxycedrus. Phytothérapie, 11: 244-249.

Chapelet J., Ozanne G., Dirol D., 1991. Bois : mode d'emploi et préservation: guide d'exigences pour la préservation et l'entretien des ouvrages en bois. CTBA.

Charron S., Jourez B., Marchal M., Hébert J., 2003. Étude comparative des caractéristiques physiques et mécaniques du bois des mélèzes d'Europe (Larix decidua), du Japon (Larix kaempferi) et de leur hybride (Larix eurolepis). Biotecnol. Agron. Soc. Enviro, 7 (1) : 5-16.

Chekdhidh T. A., 2014. Influence de la composition minérale du bois de hêtre sur sa dégradation par Trametes versicolor. Mémoire de master FAGE en bois forêt et développement durable, Université de Lorraine, France, 28 p.

Choong E. T., Achmadi S., 1991. Effect of extractives on moisture sorption and shrinkage in tropical woods. Wood and Fiber Science, 23 (2): 185-196.

Cirad, 2010. Minéralisation par double calcination pour l'analyse des éléments minéraux à l'ICP(PopV04i) - Détermination de la teneur en silice par gravimétrie (PopV07e). Montpellier, France.

Cirad, 2021. Base de données du Cirad ; Relation entre contrainte de rupture en compression et densité établie sur 984 essences. Montpellier, France.

Clément A., Janin G., 1976. Etude comparée de la répartition des principaux cations et du phosphore dans une tige de peuplier 'Fritzi-Pauley'. Plant and Soil, 45 (3) : 543-554.

Cloutier A., 2005. Anatomie et structure du bois. Notes de cours. Université Laval, Québec, Canada, 166 p.

Colling C., 2002. Les champignons du bois, Cours, Lycée Couffignal-Strasbourg, France, 10 p.

Conservation des Forets de Tiaret, 2018. Service gestion, la répartition des formations Forestières dans la Wilaya de Tiaret.

Conservation des Forets de Sidi Bel Abbès, 2020. Fiche monographique de la wilaya de Sidi Bel Abbés. Sidi Bel Abbès, 35 p.

Conservation des Forets de Sidi Bel Abbés., 2021. Rapport sur l'administration des forêts. Sidi Bel Abbès, 5 p.

Courtecuisse R., Duhem B., 1994. Guide des champignons de France et d'Europe. Delachaux et Niestle, Lausanne, 476 p.

Cowan N. M., 1999. Plant products as anti microbial agents. Clinical microbiology Reviews. 12 (4): 564-582.

Cutter B. E., Coggeshall M. V., Phelps J. E., Stokke D. D., 2004. Impacts of forest management activities on selected hardwood wood quality attributes: a review. Wood and fiber science, 36 (1) : 84-97.

Damay J., 2014. Développement de nouveaux traitements du bois basés sur le procédé d'imprégnation axiale. 2014. Thèse de doctorat en sciences du bois et des fibres, Université de Lorraine, France, 252 p.

Du T., Shupe T. F., Hse C. Y., 2011. Antifungal activities of three supercritical fluid extracted cedar oils. Holzforschung, 65 (2) : 277-284.

Damerdji A., Meniri R., 2014. Contribution à l'étude écologique des Gastéropodes dans les stations à Juniperus oxycedrus L. (Cupressacées) dans les Monts de Tlemcen (Algérie nord-occidentale). Afrique Science, 10 (2) : 382-393.

Daya A., 2006. Études des contraintes de croissance des arbres sur pied d'eucalyptus grandis et du chêne vert: caractérisation et valorisation sous forme de bois collé. Thèse de doctorat en génie mécanique, Université de Lorraine, France, 157 p.

Debazac E.F., 1991. Manuel des conifères. 2e édition. Nancy, ENGREF, 172 p.

Deborah M.F., Joseph A.T., 1995. Ecology, diversity and sustainability of the Middle Rio Grande Basin. Fort Collins, Colorado: United States Dept. of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, p. 95-132.

Delgenès J. P., Moletta R., Navarro J. M., 1989. Fermentation of D-xylose, D-glucose, L-arabinose mixture by Pichia stipitis: effect of the oxygen transfer rate on fermentation performance. Biotechnology and bioengineering, 34 (3): 398-402.

Del Rio J. C., Gutierrez A., Martinez M. J., Martinez A. T., 2001. Py–GC/MS study of Eucalyptus globulus wood treated with different fungi. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 58: 441-452.

Deon G., Schwartz R., 1988. Résistance naturelle des bois tropicaux aux attaques biologiques. Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques, 135 (3) : 37- 48.

Derbal W., 2016. Elaboration et caractérisation d'un composite massif de type« trio » (carrelet 3 plis) en pin d'Alep pur ou associant pin d'Alep et chênes Algériens. Thèse de doctorat en sciences et génie des matériaux, Université de Boumerdes, Algérie, 214 p.

Desrochers L., 2011. Récolte et ségrégation de la biomasse ligneuse en forêt (Harvest and segregation of lineous biomass in forest). QWEB-Les extractibles forestiers (Forest extractibles), FPInnovations.

Direction générale des forêts, 2005. Bilan d'incendies des forêts algériennes, superficies, potentialités.

Direction Général des Forêts, 2007. Rapport sur la politique forestière nationale et stratégie d'aménagement et de développement durable des ressources forestières et alfatières Algérie. Algérie, Alger, 37 p.

Direction Générale des Forêts, 2008. Etude d'inventaire forestier national. Rapport sur la caractérisation des formations forestières de la wilaya de Sidi Bel Abbès. Algérie, Alger, 29 p.

Direction Générale des Forêts, 2016. Service gestion, la répartition des forêts algériennes.

Dirol D., Déglise X., 2001. Durabilité des bois. Hermès (Ed.), 416 p.

Dirol D., Xavier D., 2001. Durabilité des bois et problèmes associés. Hermes Sciences Europe Ltd.

Dob T., Dahmane D., Chelghoum C., 2006. Essential oil composition of Juniperus oxycedrus growing in Algeria. Pharmaceutical Biology, 44 (1) : 1-6.

Dommergues Y., Mangenot F., 1970. Ecologie microbienne du sol. Masson.

Dorado J., Van Beek T. A., Claassen F. W., Sierra-Alvarez R., 2001. Degradation of lipophilic wood extractive constituents in Pinus sylvestris by the white-rot fungi Bjerkandera sp. and Trametes versicolor. Wood science and technology, 35 (1-2) : 117-125.

Doucet R., 2018. Etude des propriétés physiques, technologiques et de durabilité naturelle du bois de Pachyelasma Tessmanii (Harms) Harms et de Pentaclethra macrophylla benth. Mémoire de master bioingénieur en gestion des forêts et des espaces naturels, Université de Liège, Belgique, 82 p.

Dougabka D., Gérard J., Bianzeube T., Dendoncker M., Vincke C., Marchal R., *et al*., 2021a. Variations des caractéristiques physiques et mécaniques du bois de Balanites aegyptiaca en fonction de trois provenances. Bois et Forêts des Tropiques, 349: 5-19.

Dougabka D., Gerard J., Bianzeube T., Marchal R., Guibal D., Guyot, A., 2021 b. Influence of Sahelian and Sudanian provenances on the physical and mechanical properties of Faidherbia albida wood from Chad. Wood Material Science and Engineering, 1-9.

Duke J.A., 1985. Handbook of Medicinal Herbs. CRC Press, Boca Raton, FL, 256 p.

Dulbecco P., Luro D., 2001. L'essentiel sur le bois, CTBA, Editions FCBA, 184 p.

Dumonceaud O., 2001. Petits bois naturellement durables dans des usages extérieurs en vue de limiter l'emploi des traitements par les pesticides: problèmes posés par l'utilisation du Châtaignier (Castanea sativa Mill.) et intérêts d'un traitement de type friture à basse température. Thèse de doctorat en Sciences forestières et sciences du bois, Université de Montpellier II, France, 214 p.

Eastin I.L., Shook S.R., Fleishman S.J., 2001. Material substitution in the US residential construction industry, 1994 versus 1998. Forest Prod J, 51: 30-37.

Elaieb M. T., Ayed S. B., Dumarçay S., De Faria B. D. F. H., Thévenon, M. F., Gerardin, P., *et al*.,2020. Natural durability of four Tunisian Eucalyptus spp. and their respective compositions in extractives. Holzforschung, 74 (3) : 260-274.

Elaieb M. T., Shel F., Jalleli M., Langbour P., Candelier K., 2019. Physical properties of four ring-porous hardwood species: influence of wood rays on tangential and radial wood shrinkage. Madera y bosques, 25 (2).

EN 117, 2013. Wood preservatives – Determination of toxic values against *Reticulitermes* species (European termites) (laboratory method). European committee for standardization.

EN 350, 2016. Durability of wood and wood-based products – testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials. European committee for standardization.

FAO, 2006. Le rôle de forestière dans la lutte contre la désertification, p. 124-126.

Farag R.S., Daw Z.Y., Hewedi F.M., El-Baroly G.S.A., 1989. Antimicrobial activity of some Egyptian spice essential oils. Journal of Food Protection, 52: 665-667.

Farjon A., 2010. A handbook of the world's conifers. Vol .2. Brill, Leiden & Boston.

Farjon A., Filer D., 2013. An atlas of the world's conifers: an analysis of their distribution, biogeography, diversity and conservation status. Brill.

Farrar J. L., 1996. Les Arbres du Canada. Montréal: Fidès, Service canadien des forêts, 502 p.

Fei B. H., Ruan X. G., 2001. Effects of temperature and precipitation on tree-ring and wood density of ginkgo in Beijing. Forest research-Chinese academy of forestry, 14 (2): 180-186.

Feio A., 2006. Inspection and diagnosis of historical timber structures: NDT correlations and structural behaviour. Thèse de doctorat en génie civil, Université du Minho, Portugal, 219 p.

Fengel D., Wegener, G., 1989. Ultrastructure, reactions. Wood chemistry, 613 p.

Ferka-Zazou N., 2006. Impact de l'occupation spatio-temporelle des espaces sur la conservation de l'écosystème forestier : Cas de la commune de Tessala, wilaya de Sidi Bel Abbes, Algérie. Mémoire thèse de Magister en écosystèmes terrestres, Université de Tlemcen, Algérie, 154 p.

Fidah A., 2016. Étude de la durabilité naturelle des bois de Cedrus atlantica (Manetti) et de Tetraclinis articulata (Vahl) Mast. et évaluation de la bioactivité de leurs huiles essentielles sur les champignons basidiomycètes lignivores. Thèse de doctorat en biologie végétale et environnement, Université de Rabat, Maroc, 147 p.

Fidah A., Salhi N., Rahouti M., Kabouchi B., Ziani M., Aberchane M., *et al*., 2016. Natural durability of Cedrus atlantica wood related to the bioactivity of its essential oil against wood decaying fungi. Maderas. Ciencia y Tecnología, 18 (4): 567-576.

Findlay W. P. K., 1967. Timber pests and diseases. Pergamon, Oxford.

Flora C., 2018. Origine et prédiction de la variabilité de la durabilité naturelle chez Dicorynia guianensis Amsh. 2018. Thèse de doctorat en Chimie et biologie des produits naturels, Université de Guyane, France, 210 p.

FOSA, 2000. L'étude prospective du secteur forestier en Afrique. Algérie, FAO, Rome, 60 p.

Fougerousse M., 1960. Durabilité naturelle du bois. Bois et forêt des tropiques, 73 : 43-56.

Fouquet D., 2009.Durabilité naturelle et préservation des bois tropicaux. Versailles: Ed. Quae, 127 p.

Franceschini T., Longuetaud F., Bontemps J. D., Bouriaud O., Caritey B. D., Leban J. M., 2013. Effect of ring width, cambial age, and climatic variables on the within-ring wood density profile of Norway spruce Picea abies (L.) Karst. Trees, 27(4): 913-925.

Fromm J., 2010. Wood formation of trees in relation to potassium and calcium nutrition. Tree Physiology, 30 (9): 1140-1147.

Gao H., Zhang L. P., Liu S. Q., 2011. Comparison of KP pulping properties between heartwood and sapwood of Cedrus deodara (Roxb.) G. Don. In: Applied Mechanics and Materials, trans Tech Publications Ltd, p. 1778-1784.

Garnier G., Bézanger-Beauquesne L., Debranx G., 1961. Ressources médicinales de la flore française. 2 tomes. Paris, 1511 p.

Gawron J., Szczęsna M., Zielenkiewicz T., Gołofit T., 2012. Cellulose crystallinity index examination in oak wood originated from antique woodwork. Drewno: prace naukowe, doniesienia, komunikaty, 55 : 109-114.

Gérard J., Edi Kouassi A., Daigremont C., Détienne P., Fouquet D., Vernay M., 1998. Synthèse sur les caractéristiques technologiques des principaux bois commerciaux africains. CIRAD-Forêt. Montpellier, France.

Gérard J., Guibal D., Cerre J.-C., Paradis S., 2016. Atlas des bois tropicaux – Caractéristiques technologiques et utilisations. Versailles, France, Éditions Quæ, 1 002 p.

Gérard J., Paradis S., Thibaut B., 2019. Survey on the chemical composition of several tropical wood species. Bois et Forêts des Tropiques, (342) : 79-91.

Ghazi A., 2009. Rapport national de réflexion sur le secteur des forêts (atténuation). Programme des Nations Unies Pour le Développement, 21 p.

Ghazi A., Lahouati R., 1997**.** Algérie 2010. Sols et ressources biologiques. Institut national des études de Stratégie Globale, 45 p.

Gindl W., Teischinger A., 2002. Axial compression strength of Norway spruce related to structural variability and lignin content. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 33(12) : 1623-1628.

Giroud G., 2005. Caractérisation de la proportion de bois d'aubier et de duramen chez le bouleau à papier (Betula papyrifera Marsh.). Thèse de doctorat en sciences du bois, Université de Laval, Québec, Canada, 163 p.

Gominho J., Pereira H., 2005. The influence of tree spacing in heartwood content in Eucalyptus globulus Labill. Wood and Fiber Science : 37(4) : 582-590.

Govin A., 2004. Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment. Modification de l'hydratation du ciment par le bois. Thèse de doctorat en génie des procédés, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, France, 217 p.

Green D.W., Winandy J.E, Kretschmann D.E., 1999. Mechanical properties of wood. In: Wood handbook - wood as an engineering material. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, 463 p.

Guibal D., Langbour P., Gérard J., 2015. Propriétés physiques et mécaniques des bois. In : Mémento du forestier tropical. Versailles, France, Éditions Quæ, 873-884.

Guitard D., 1987.Mécanique du matériau bois et composites. Cepadues (Ed.), 238 p.

Hafsi Z., 2018. Étude ecobotanique et morphologique des feuilles, des surfaces épidermiques et des galbules des espèces du genre Juniperus L.en Algérie. Thèse de doctorat en écologie forestière, Université de Djelfa, Algérie, 174 p.

Hafsi Z., Belhadj S., Derridj A., Mevy J.-P., Notonnier R., Tonetto A., *et al*., 2017. Étude de la variabilité morphologique (aiguilles, galbules) du complexe spécifique Juniperus oxycedrus L., le genévrier oxycèdre, au sein de sept populations d'Algérie. Revue d'Écologie (La Terre et la Vie), 72 (4) : 353-373.

Haluk J. P., Roussel C., 2000. Caractérisation et origine des tropolones responsables de la durabilité naturelle des Cupressacées. Application potentielle en préservation du bois. Annals of forest science, 57(8) : 819-829.

Hamada J., 2016. Effet de la variabilité intra et interspécifique du bois sur les procédés de traitement thermique. Thèse de doctorat en sciences du bois et des fibres, Université de Lorraine, France, 167 p.

Hannouz S., 2014. Développement d'indicateurs pour la caractérisation mécanique et la durabilité des bois traités thermiquement. Thèse de doctorat en mécaniques et matériaux, école national supérieur d'arts et métiers, France, 154 p.

Harkin J. M., 1971. Bark and its possible uses (Vol. 91). Forest Products Laboratory, US Forest Service.

Haygreen J.G., Bowyer J.L., Shmulsky R., 2007. Forest products and wood science an introduction. Fifth ed. Blackwell Publishing, 558 p.

Hayta S., Bagci E., 2014. Essential oil constituents of the leaves, bark and cones of Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus L. from Turkey. Acta Botanica Gallica, 161 (2): 201-207.

Hazenberg G., Yang K. C., 1991. Sapwood/heartwood width relationships with tree age in balsam fir. IAWA Journal, 12 (1): 95-99.

Hernández R., 1989. Influence des composantes secondaires et du contrefil sur les propriétés physico-mécaniques de bois tropicaux. Thèse de doctorat en sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, Canada, 186 p.

Hernández R., 2007. Swelling properties of hardwoods as affected by their extraneous substances, wood density and interlocked grain. Wood Fiber Science, 39(1): 146-158.

Hillis W.E., 1975. The role of wood characteristics in high temperature drying. Journal of the institute of wood science, 7: 60-65.

Hlaing Z. C., Teplyakov V. K., Thant N. M. L., 2014. Influence of climate factors on tree-ring growth in teak (Tectona grandis L. f.) plantations in the Bago Yoma Range, Myanmar. Forest science and technology, 10 (1) : 40-45.

Holopainen J. K., Virjamo V., Ghimire R. P., Blande J. D., Julkunen-Tiitto R., Kivimäenpää M., 2018. Climate change effects on secondary compounds of forest trees in the northern hemisphere. Frontiers in plant science, 9 : 1445.

Institut national de la recherche agronomique Val de Loire, Centre d'Orléans Unité d'Amélioration Génétique et Physiologie Forestières, Plateforme GénoBois, 2019. Détermination des taux d'extractibles, lignines, cellulose, hémicellulose

Institut National de la Recherche Forestière, 2012. Etat actuel des ressources génétiques forestières en Algérie.

Inward D., Beccaloni G., Eggleton P., 2007. Death of an order: a comprehensive molecular phylogenetic study confirms that termites are eusocial cockroaches. Biology letters, 3(3): 331-335.

Izekor D. N., Fuwape J. A., Oluyege A. O., 2010. Effects of density on variations in the mechanical properties of plantation grown Tectona grandis wood. Archives of Applied Science Research, 2(6) : 113-120.

Jacques D., 2003. Amélioration du module d'élasticité du bois de Mélèze hybride (Larix x eurolepis Henry) par sélection clonale. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques et Ingénierie Biologique, Université de Liège, Belgique, 292 p.

Jodin P., 1994. Le bois matériau d'ingénierie. Association pour la recherche sur le bois en Lorraine, 433 p.

Johnsen J.R., Thomas N., Alexander R.R., 1974. Juniperus L. Juniper. In: Seeds of woody plants in the United States. Agric. Handb. 450. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 460-469.

Julin M., 2008. Tar production – Traditional medicine and potential threat to biodiversity in the Marrakesh region – An ethnobotanical study. Committee of Tropical Ecology, Uppsala University, Sweden, Minor Field Study 133, 49 p.

Kask R., 2015. The influence of growth conditions on physico-mechanical properties of Scots pine (Pinus sylvestris L.) wood in Estonia. Eesti Maaülikool.

Kasraoui H., 2011. Effets de l'éclaircie commerciale et de la fertilisation sur la masse volumique du bois et sur la morphologie des trachéides du pin gris (Pinus banksiana Lamb). Thèse de doctorat en Biologie, Université du Québec, Canada, 95 p.

Kebli H., Maltas A., Sinaj S., 2017. Potentiel agronomique des cendres issues de bois recyclé. Recherche agronomique suisse, 8(1) : 30-37.

Kechar K., Hellal B., Ayad N., Benahmed-Djilali A., 2016. Ethnobotanical investigation of Ballota hirsuta (Benth) at Sidi Bel Abbes (Algeria). Phytotherapie, 14: 343-348.

Keleş S. Ö., 2020. The effect of altitude on the growth and development of trojanfir ((Abies nordmanniana subsp. equi-trojani [Asch. & Sint. ex Boiss] Coode & Cullen) Saplings. Cerne, 26 : 381-392.

Keller R., 1994. La constitution du bois. Le Bois Matériau d'Ingénierie. ARBOLOR, Nancy, p. 13-51.

Keller R., Le Tacon F., Timbal J., 1976. La densité du bois de hêtre dans le Nord-Est de la France. Influence des caractéristiques du milieu et du type de sylviculture. In : Annales des Sciences Forestières. EDP Sciences, p. 1-17.

Keunecke D., Sonderegger W., Pereteanu K., Lüthi T., Niemz P., 2007. Determination of Young's and shears modulus of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. Wood Science and Technology, 41: 309-327.

Kiaei M., Samariha A., 2011. Relationship between altitude index and wood properties of Pinus eldarica Medw. Gazi University Journal of Science, 24(4) : 911-918.

Kirk T. K., Cullen D., 1998. Enzymology and molecular genetics of wood degradation by white-rot fungi. Environmentally friendly technologies for the pulp and paper industry. Wiley, New York, p. 273-307.

Kittel Ch., 1998. Physique de l'état solide (Publication). Éditeur : Dunod, Paris, 610 p.

Klimko M., Boratyńska K., Montserrat J. M., Didukh Y., Romo A., Gómez D., *et al*., 2007. Morphological variation of Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus (Cupressaceae) in the Mediterranean region. Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 202 (2): 133-147.

Knowles J. R., Roller S., Murray D. B., Naidu A. S., 2005. Antimicrobial action of carvacrol at different stages of dual-species biofilm development by Staphylococcus aureus and Salmonella enterica serovar Typhimurium. Applied and environmental microbiology, 71(2): 797-803.

Koga S., Zhang S. Y., Bégin J., 2002. Effects of precommercial thinning on annual radial growth and wood density in balsam fir (Abies balsamea). Wood and Fiber Science, 34(4): 625-642.

Kokutse A. D., Stokes A., Kokutse N. K., Kokou K., 2010. Which factors most influence heartwood distribution and radial growth in plantation teak? Annals of forest science, 67(4): 407.

Kollmann F.F.P., Coté W.A.J., 1968. Principles of Wood Science and Technology. Berlin, 560 p.

Korb J., 2007. Termites. Current Biology, 17(23): R 995-R 999.

Körner C., 2007. The use of altitude in ecological research. Trends in ecology and evolution, 22(11): 569-574.

Kusari S., Zühlke S., Spiteller M., 2011. Chemometric evaluation of the anti-cancer pro-drug podophyllotoxin and potential therapeutic analogues in Juniperus and Podophyllum species. Phytochemical Analysis, 22(2) : 128-143.

Langbour P., Gérard J., Guibal D., Mahlani K., 2011. Caractérisation technologique et valorisation en bois d'œuvre du pin d'Alep de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Forêt Méditerranéenne, 32 (3) : 263-270.

Laszlo P., 2000. Le savoir des plantes. Ed. Ellipses. Paris, 128 p.

Lebourgeois F., 1999. Les Chênes sessile et pédonculé (Quercus petraea Liebl. et Quercus robur L.) dans le réseau Renecofor: rythme de croissance radiale, anatomie du bois, de l'aubier et de l'écorce. Revue forestière française, 51 (4): 522-536.

Le houérou H.N., 1980.L'impact de l'homme et de ses animaux sur la forêt méditerranéenne. Forêt méditerranéenne II, I, 31-34.

Lesjak M. M., Beara I. N., Orčić D. Z., Ristić J. D., Anačkov G. T., Božin B. N.,*et al*., 2013. Chemical characterisation and biological effects of Juniperus foetidissima Willd. 1806. LWT-Food Science and Technology, 53(2): 530-539.

Loizzo M. R., Tundis R., Conforti F., Saab A. M., Statti G. A., Menichini F., 2007. Comparative chemical composition, antioxidant and hypoglycaemic activities of Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus L. berry and wood oils from Lebanon. Food Chemistry, 105: 572-578.

López-Malo A., Alzamora S. M., Palou E., 2005. Aspergillus flavus growth in the presence of chemical preservatives and naturally occurring antimicrobial compounds. International journal of food microbiology, 99 (2) : 119-128.

Maatoug M., 2003. Effet des facteurs stationnels sur les propriétés physiques, mécaniques et papetières du bois de Thuya de Maghreb, Tétraclinis Articulata Vahl Masters (Algérie

occidentale). Thèse de doctorat en écologie et environnement, Université de Sidi Bel Abbes, Algérie, 180 p.

Maatoug M., Gérard J., Dallal A., 2004 a. Effet du type de station forestière sur la rigidité du bois de Thuya de Maghreb (Tetraclinis articulata). Application de la méthode acoustique dans les mesures de module de Young. Sciences and Technologie C, 100-105.

Maatoug M., Keller R., Benabdeli K., Dilem A., 2004 b. Etude microdensitométriques du bois de Thuya de Maghreb, Tetraclinis Articulata Vahl Masters et effets des facteurs stationnels sur sa qualité. Sciences and Technologie C, 19-28.

Madani T., Hubert B., Lasseur J., Guérin G., 2001. Association des bovins, des ovins et des caprins dans les élevages de la suberaie algérienne. Cahiers Agricultures, 10(1) : 9-18.

Madoui A., 2002. Les incendies de forêt en Algérie. Historique, bilan et analyse. Forêt méditerranéenne T. XXIII, (1) : 23-30.

Malik M.F. E. I., Abdelgadir A. Y., 2015. Effect of growth rate on wood density of Eucalyptus camaldulensis wood of coppice origin grown in White Nile State Sudan. Journal of Forest Products and Industries, 4(3): 86-93.

Mao K., Hao G., Liu J., Adams R. P., Milne R. I., 2010. Diversification and biogeography of Juniperus (Cupressaceae): variable diversification rates and multiple intercontinental dispersals. New Phytologist, 188(1): 254-272.

Marongiu B., Porcedda S., Caredda S., De Gioannis B., Vargiu L., La Colla P., 2003. Extraction of Juniperus oxycedrus subsp. Oxycedrus essential oil by supercritical carbon dioxide: Influence of some process parameters and biological activity. Flavour and Fragrance Journal, 18: 390-397.

MATE, 2002. Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAEDD). Algérie, 128 p.

MATE, 2014. 5ème Rapport National Sur la mise en œuvre de la convention sur la diversité biologique au niveau national. Algérie, 128 p

Mazari K., 2009. Etude phytochimique et pouvoir antimicrobien de Juniperus phoenicea L., Juniperus oxycedrus L., et Cupressus sempervirens L. de la région de Tlemcen. Thèse de magister en biologie, Université de Tlemcen, Algérie, 152 p.

Mazet J. F., Nepveu G., 1991. Relations entre caractéristiques de retrait et densité du bois chez le pin sylvestre, le sapin pectiné et l'épicéa commun. Annals of Forest Science, 48(1) : 87–100.

Mbagou J. B., 2017. Variabilité intra-arbre des propriétés physico-mécaniques et chimiques du Tessmania africana en provenance du Gabon. Thèse de doctorat en sciences du bois, Université de Laval du Québec, Canada, 173 p.

Mbang T., 2004. Rôle des extractibles dans la durabilité naturelle de quatre essences camerounaises et potentialités d'utilisation en tant que matières actives de protection du bois. Rapport de stage au Cirad-Forêt de Montpellier (France), 30 p.

Medini H., Manongiu B., Neffati A., Chekir-Ghedira L., Harzalla-Skhiri F., Khouja M. L., 2013. Chemical and anti-bacterial polymorphism of Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus and Juniperus oxycedrus subsp. macrocarpa (Cupressaceae) leaf essential oils from Tunisia. Journal of Chemistry, ID 389252.

Meite M., Laanaa A., Famiri A., Yeznasni A., Chergui M., El Ghorba M., *et al* ., 2007. Etude de l'influence des propriétés physiques sur le comportement mécanique des bois de pin maritime et de pin d'alep-en vue de l'application à l'énergie éolienne. Revue des Energies Renouvelables CER, 7 : 61-65.

Miara M. D., Ait Hammou M., Rebbas K., Hadjaj-Aoul S., Vela E., 2018. Les Orchidées de la wilaya de Tiaret (Algérie nord-occidentale): inventaire, écologie, taxonomie et biogéographie. Bull. mens. Soc. linn. Lyon, 87(9-10): 273-293.

Miceli N., Trovato A., Dugo P., Cacciola F., Donato P., Marino A., *et al*., 2009. Comparative analysis of flavonoid profile, antioxidant and antimicrobial activity of the berries of Juniperus communis L. var. communis and Juniperus communis L. var. saxatilis Pall. FromTurkey. Journal of agricultural and food chemistry, 57(15): 6570-6577.

Miranda I., Gominho J., Lourenço A., Pereira H., 2006. The influence of irrigation and fertilization on heartwood and sapwood contents in 18-year-old Eucalyptus globulus trees. Canadian Journal of Forest Research, 36 (10): 2675-2683.

Missoumi A., Mederbal K., Benabdeli K., 2002. Apport des Systèmes d'information géographiques dans la prévention et la lutte contre les incendies de forêts. Exemple de la forêt domaniale de Kounteidat, Algérie. Forêt méditerranéenne, 23(1) : 11-22.

Montès N., 1999. Potentialités, dynamique et gestion d'une formation arborée à Genévrier Thurifère (Juniperus Thurifera L.) des Atlas marocains: le cas de la vallée de l'Azzaden. Thèse de doctorat en géographie et aménagement, Université de Toulouse, France, 212 p.

Mörling T., 2002. Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine. Annals of Forest Science, 59(1) :29-40.

Moumene F., 2016. Valorisation des plantes condimentaires cultivées et spontanées dans l'ouest algérien cas du genre Allium. Thèse de doctorat en sciences de l'environnement, Université de Sidi Bel Abbes, Algérie, 171 p.

Mounguengui W. S., 2008. Caractérisation HPLC de marqueurs permettant de prévoir l'évolution de certaines propriétés macroscopiques du bois lors de différents processus de dégradation. 2008. Thèse de doctorat en sciences du bois et des fibres, Université de Nancy, France, 230 p.

Mouras S., Pinta F., Girard P., 2015. La valorisation énergétique du bois et des biomasses lignocellulosiques. In : Mémento du forestier tropical. Versailles, France, Éditions Quæ, p.1004-1037.

Moya R., Perez D., 2008. Effects of physical and chemical soil properties on physical wood characteristics of Tectona grandis plantations in Costa Rica. Journal of Tropical Forest Science, 248-257.

Mugnaini S., Nepi M., Pacini E., Sapia L., Piotto B., 2004. I ginepri come specie forestali pioniere: efficienza riproduttiva e vulnerabilita. Roma: APAT.

Mun S. P., Prewitt L., 2011. Antifungal activity of organic extracts from Juniperus virginiana heartwood against wood decay fungi. Forest Products Journal, 61 (6): 443-449.

Myre R., Camiré C., 1994. Distribution de P, K, Ca, Mg, Mn et Zn dans la tige des mélèzes européen et laricin. In : Annales des sciences forestières (Vol. 51, No. 2). EDP Sciences, p. 121-134.

Nascimento M .D., Santana A. L. B. D., Maranhão C. A., Oliveira L. S., Bieber L., 2013. Phenolic extractives and natural resistance of wood. Biodégradation-Life of Science, 801: 349-370.

Natterer J., Sandoz M., Rey J.L., 2000. Construction en bois matériau, technologie et dimensionnement, vol. 13. Presses polytechniques et Universitaires Romandes.

Navi P., Heger F., 2005. Comportement thermo-hydromécanique du bois: Applications technologiques et dans les structures. PPUR presses polytechniques.

Nepveu G., 1994. Chapitre IV: Variabilité. Le bois matériau d'ingénierie. Nancy, A.R.BO.LOR, p.127- 177.

Ngavoura P., 1998. Variations inter et intra-arbre des propriétés du bois d'Okoumé (Aucoumea klaineana Pierre). DEA en Sciences du bois, Université de Nancy, France, 42 p.

Niamké F. B., Amusant N., Charpentier J.-P., Chaix G., Baissac Y., Boutahar N., *et al*., 2011. Relationships between biochemical attributes (non-structural carbohydrates and phenolics) and natural durability against fungi in dry teak wood (Tectona grandis L. f.). Annals of forest Science, 68: 201-211.

Nicault A., Rathgeber C., Tessier L., Thomas A., 2001. Observations sur la mise en place du cerne chez le pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.): confrontation entre les mesures de croissance radiale, de densité et les facteurs climatiques. Annals of forest science, 58: 769-784.

Orhan N., Aslan M., Demirci B., Ergun F., 2012. A bioactivity guided study on the antidiabetic activity of Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus L. leaves. Journal of ethnopharmacology, 140 (2) : 409-415.

Ouadou Y., 2017. Contribution à l'étude de la durabilité du bois Algérien cas: Chêne zeen, Chêne afarès et Pin maritime. Thèse de doctorat en sciences et génie des matériaux, Université de Boumerdes, Algérie, 145 p.

Pandey K. K., 2005. Study of the effect of photo-irradiation on the surface chemistry of wood. Polymer degradation and Stability, 90 (1): 9-20.

Panshin A. J., de Zeeuw C., 1980. Textbook of Wood Technology: Structure, Identification, Properties, and Uses of the Commercial Woods of the United States and Canada. Mc Graw Hill Book Company. Inc, New York.

Passarini L., 2015. Étude du comportement physique des bois au-dessus et au-dessous du point de saturation des fibres. Thèse de doctorat en sciences du bois, Université Laval, Québec, Canada, 193 p.

Payette S., Filion L., 2010. La dendroécologie: Principes, méthodes et applications. Canada.

Pietarinen S. P., Willför S. M., Vikström F. A., Holmbom B. R.,2006. Aspen knots, a rich source of flavonoids. Journal of Wood Chemistry and Technology, 26(3): 245-258.

Polge H., 1963. Une nouvelle méthode de détermination de la texture du bois- L'analyse densitométrique de clichés radiographiques. In : Annales de l'école Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences. ENEF, Ecole nationale des eaux et forêts, Nancy, France.

Polge H., 1966. Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants: applications dans les domaines Technologique et Physiologique. In : Annales des sciences forestières. EDP Sciences, p. I-206.

Polge H., 1969. Influence de la fertilisation sur la qualité du bois de pin maritime. In : Annales des Sciences Forestières. EDP Sciences, p. 45-64.

Polge H., 1984. Production de chênes de qualité en France. Revue Forestière Française, 34-48.

Pollet C., Verheyen C., Hébert J., Jourez B., 2013. Le bois de Robinier faux-acacia : propriétés physiques, mécaniques et de durabilité naturelle. Forêt Wallonne, 126 : 3-16.

Popper R., Niemz P., Torres M., 2006. Einfluss des Extraktstoffanteils ausgewählter fremdländischer Holzarten auf deren Gleichgewichtsfeuchte. HolzalsRoh-und Werkstoff, 64 (6): 491.

Quézel P., Gast M., 1998. Genévrier. Encyclopédie berbère, GaudaGirrei, Aix-en-Provence, Edisud, 20-1998 (20) : 3016-3023.

Quézel P., Santa S., 1962. Nouvelle flore de l’Algérie et des régions désertiques méridionales. Tome 1. Éd. CNRS, Paris.

Rabhi K., Tafer M., Messaoudene M., 2014. Évolution des proportions d'aubier et de duramen du cèdre de l'Atlas, Cedrus atlantica Manetti, en Algérie. Bois et forêts des tropiques, 322 : 77-87.

Rajemison A. H., 2013. Proposition d'essences de substitution aux bois précieux en épuisement par la connaissance des propriétés du matériau bois: cas du palissandre de Madagascar Application en ameublement. Thèse de doctorat en génie mécanique et mécanique des matériaux, Université de Toulouse, France, 142 p.

Rameau J. C., Mansion D., Dumé G., 1993. Flore forestière française, montagnes. Paris. Institut pour le Développement Forestier. Tome 2, 2421 p.

Raysal M., 2004. Préservation du bois : guide d'emploi des normes. Editions FCBA, 165 p.

Rebey I. B., Sriti J., Besbess B., Mkaddmini Hammi K., Hamrouni Sellami I., Marzouk, B., *et al*., 2016. Effet de la provenance et du solvant d'extraction sur la teneur en composes phénolique et les potentialités antioxydantes des graines de fenouil (Foeniculum vulgare Mill). Journal of New Sciences, 27(4) : 1478-1487.

Reille M., 2014. Gymnospermes : conifères, résineux et autres. Californie, 110 p.

Rice-Evans C.A., Miller N.J., Paganga G., 1996. Structure–antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids. Free Rad. Biol. Med, 20: 933–956.

Rigatto P. A., Dedecek R. A., Matos J. L. M. D. ,2004. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de Pinus taeda para produção de celulose Kraft. Revista árvore, 28 : 267-273.

Riou-Nivert P., 2001. Les résineux, Connaissance et reconnaissance. Tome 1. 2e Ed. Institut pour le développement forestier, Paris, France.

RNE, 2000. Rapport national sur l'état et l'avenir de l'Environnement. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Algérie. 253 p.

Rocha M. F. V., Veiga T. R. L. A., Soares B. C. D., Araújo A. C. C. D., Carvalho A. M. M., Hein, P. R. G., 2019. Do the growing conditions of trees influence the wood properties? Floresta e Ambiente, 26 (3).

Rowell R.M., Pettersen R., Han J.S., Rowell J.S., Tshabalala M.A., 2005. Cell wall chemistry. In: Rowell RM (ed) Handbook of wood chemistry and wood composites. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, p. 35-72.

Saha Tchinda J. B., 2015. Caractérisation et valorisation des substances extractibles de cinq essences camerounaises majeures de l'industrie du bois: Ayous, Moabi, Movingui, Padouk et Tali. Thèse de doctorat en Sciences du bois, Université de Lorraine, France, 162 p.

Sanchez de Medina F., Gamez M.J., Jimenez I., Jimenez J., Osuna J.I., Zarzuelo A., 1994. Hypoglycemic activity of juniper berries. Planta Medica, 60: 197–200.

Sandak J., Sandak A., Cantini C., Autino A., 2015. Differences in wood properties of Picea abies L. Karst. In relation to site of provenance and population genetics. Holzforschung, 69(4): 385-397.

Sarmoum M., Guibal F., Abdoun F., 2016. Effet des facteurs stationnels sur la croissance radiale et la réponse du pin d'Alep au climat dans le massif de l'Ouarsenis, Algérie. Bois et Forêts des Tropiques, 329 (3) : 17-27.

Schultz T. P., Harms W. B., Fisher T. H., Mc Murtrey K. D., Minn J., Nicholas D. D., 1995. Durability of Angiosperm Heartwood: The Importance of Extractives. Holzforschung, 49 (1): 29-34.

Schultz T. P., Nicholas D. D., 2000. Naturally durable heartwood: evidence for a proposed dual defensive function of the extractives. Phytochemistry, 54(1) : 47-52.

Seigue A., 1985. La forêt méditerranéenne et ses problèmes. Collections techniques agricoles et productions méditerranéennes. Editions G.P et Maisonneuve et Larose, Paris, 502 p.

Sharma R. N., Tungikar V. B., Pawar P. V., Vartak P. H., 1994. Vapour toxicity and repellency of some oils and terpenoids to the termite, Odontotermes brunneus. International Journal of Tropical Insect Science, 15: 495-498.

Singh T., 1987. Wood density variations in thirteen Canadian tree species. Wood and fiber science, 19(4): 362-369.

Singleton V.L., Rossi J.A., 1965. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. American Journal of Enology and Viticulture, 16:144-158.

Sjostrom E., 1993. Wood chemistry: fundamentals and applications. Gulf professional publishing.

Skyba O., Douglas C.J., Mansfield, S.D., 2013. Syringyl-Rich Lignin Renders Poplars More Resistant to Degradation by Wood Decay Fungi. Applied and Environmental Microbiology 79: 2560–2571.

Slavko G., Tomislav S., Jelena T., 2003. Some physical and mechanical properties of beech wood grown in Croatia. Wood Research, 48(3) : 39-52.

Stevanovic T., Perrin D., 2009. Chimie du bois. 1ère édition. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 195 p.

Stevanovic T.J., 2014. Notes de cours chimie des constituants végétaux II. Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, Canada.

Swanston-Flatt S. K., Day C., Bailey C. J., Flatt P. R.,1990. Traditional plant treatments for diabetes. Studies in normal and streptozotocin diabetic mice. Diabetologia, 33(8): 462-464.

Syofuna A., Banana A. Y., Nakabonge G., 2012. Efficiency of natural wood extractives as wood preservatives against termite attack. Maderas Ciencia y tecnología, 14(2): 155-163.

Tame N. W., Dlugogorski B. Z., Kennedy E. M., 2007. Formation of dioxins and furans during combustion of treated wood. Progress in Energy and Combustion Science, 33(4): 384-408.

Tatar H., 2012. Production forestière, exploitation et valorisation en Algérie. Forêt méditerranéenne. T. XXXIII, 4 : 361-368.

Tavares L., McDougall G. J., Fortalezas S., Stewart D., Ferreira R. B., Santos C. N., 2012. The neuroprotective potential of phenolic-enriched fractions from four Juniperus species found in Portugal. Food chemistry, 135(2): 562-570.

Taviano M. F., Marino A., Trovato A., Bellinghieri V., Melchini A., Dugo P., *et al*., 2013. Juniperus oxycedrus L. subsp. oxycedrus and Juniperus oxycedrus L. subsp. macrocarpa (Sibth. & Sm.) Ball.“berries” from Turkey: Comparative evaluation of phenolic profile, antioxidant, cytotoxic and antimicrobial activities. Food and chemical toxicology, 58: 22-29.

Taylor A.M., Gartner B.L., Morrel J.J., 2002. Heart wood formation and natural durability a review. Wood and Fiber Science, 34(4): 587-611.

Taylor A. M., Gartner B. L., Morrell J. J., Tsunoda K., 2006. Effects of heartwood extractive fractions of Thuja plicata and Chamaecyparis nootkatensis on wood degradation by termites or fungi. Journal of Wood Science, 52: 147-153.

Thévenon M.F., 2015.Chimie du bois. In: Mémento du forestier tropical. Éditions Quæ, p.868-872.

Thulasidas P. K., Bhat K. M., 2007. Chemical extractive compounds determining the brown-rot decay resistance of teak wood. Holz als Roh-und Werkstoff, 65(2) : 121-124.

Traoré B., 2009. Influence de la structure anatomique et des métabolites secondaires sur les propriétés physiques et la qualité acoustique du bois de vène (Pterocarpus erinaceus – Poir.) provenant du Mali. Thèse de doctorat en sciences du bois, Université Laval, Québec, Canada, 206 p.

Trouy-Triboulot M.C., Triboulot P., 2001. Matériau bois: Structure et caractéristiques. Techniques de l'ingénieur. Construction, (C925), C925-1.

Tsoumis G., 1991. Science and technology of wood: structure, properties, utilizations. Van Nostrand Reinhold, New York, USA.

Tsutsumi T., Kawahara T., Shidei T., 1968. The Circulation of Nutrients in Forest Ecosystem (I) On the Amount of Nutrients contained in the Above-ground Parts of Single Tree and of Stand. Journal of the Japanese Forestry Society, 50(3): 66-74.

Uçar G., Balaban M., 2002. The composition of volatile extractives from the wood of Juniperus excelsa, Juniperus foetidissima and Juniperus oxycedrus. Holz als Roh- und Werkstoff, 60: 356-362.

Ultee A., Kets E. P. W., Smid E. J.,1999. Mechanisms of action of carvacrol on the food-borne pathogen Bacillus cereus. Applied and environmental microbiology, 65(10): 4606-4610.

Van Haverbeke D.F., Comer C.W., 1985. Effects of treatment and seed source on germination of eastern red cedar seed. USDA Forest Service, Research Paper RM-263. Fort Collins, CO.

Vaucher H., 1993. Guide des écorces : 530 illustrations. Neuchâtel: Delachaux et Niestlé.

Valente C. A., de Sousa A. M., Furtado F. P., De Carvalho A. P., 1992. Improvement program for Eucalyptus globulus at portucel: technological component. Appita Journal, 45(6): 403-407.

Vidaković M., Soljan M., 1991, Conifers: Morphology and variation. Grafički zavod Hrvatske, 754 p.

Westermark U., 1982. Calcium promoted phenolic coupling by superoxide radical—a possible lignification reaction in wood. Wood Science and. Technology, 16:71–78.

Wimmer R., Lucas B. N., 1997. Comparing mechanical properties of secondary wall and cell corner middle lamella in spruce wood. Iawa Journal, 18(1): 77-88.

Woodwell G.L., Whittaker R.H., Houghton R.A., 1975. Nutrient concentrations in plants in the Brookhaven oak-pine forest, Ecology 56 (2): 318–332.

XP CEN/TS 15083-1, 2006. Durability of wood and wood-based products. Determination of the natural durability of solid wood against wood destroying fungi. Test methods. Part 1: Basidiomycetes. Brussels, Belgium, European Committee for Standardization.

XP CEN/TS 15083-2, 2006. Durability of wood and wood-based products – Determination of the natural durability of solid wood against wood-destroying fungi – Test methods – Part 2: Soft rotting micro-fungi.

Zhang S. Y., 1995. Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. Wood science and Technology, 29(6): 451-465.

Zobel B. J., Van Buijtenen J. P., 1989. Wood variation: its causes and control. Springer-Verlag, Berlin, 363 p.

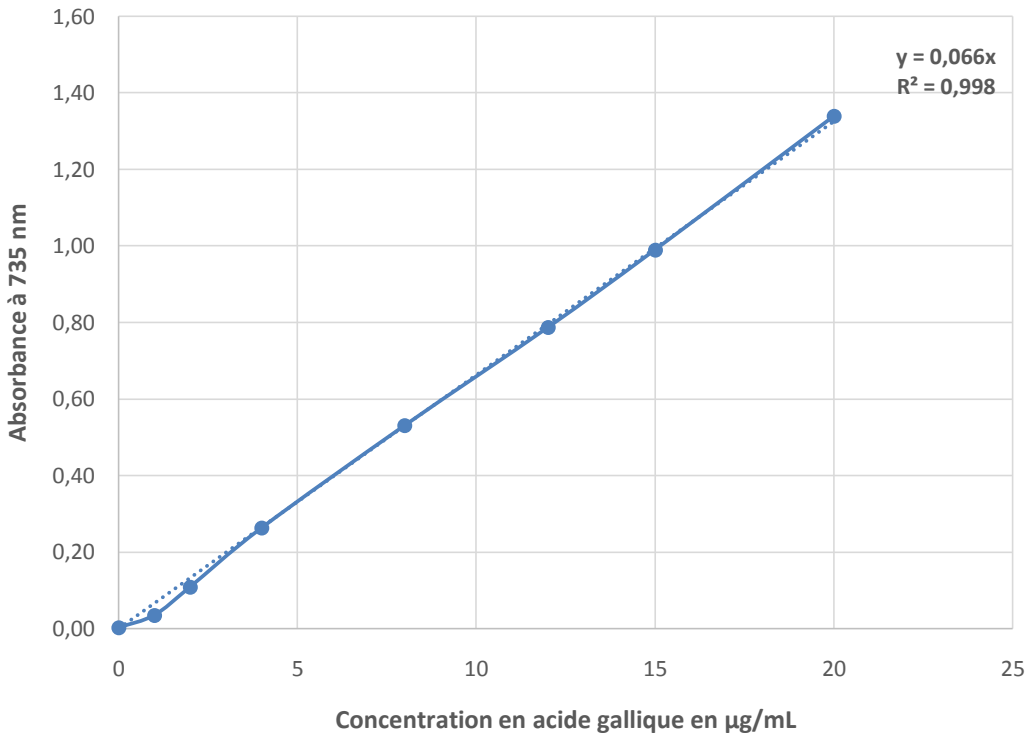
Zubov I. N., Khviyuzov S. S., Lobanova M. A., Gusakova M. A., Bogolitsyn K. G.,2012. Influence of abiotic factors on the formation of carbohydrate matrix of juniper wood. For J, 1: 113-120.

Biblio-net

Web Master: https://fr.climate-data.org

Annexe

La courbe d'étalonnage des polyphénols totaux



Durabilité naturelle et composition en extractibles du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* du Nord-Ouest de l'Algérie

Djilali Ouaar[1]
Aicha Megherbi Benali[1]
Fawzia Toumi Benali[1]
Marie-France Thévenon[2, 3]
Kévin Candelier[2, 3]
Luc Pignolet[2, 3]
Jean Gérard[2, 3]

[1] Université Djilali Liabes
LR Écodéveloppement des espaces (Ecodev)
Sidi Bel Abbès
Algérie

[2] Cirad
UPR BioWooEB
34398 Montpellier
France

[3] BioWooEB
Univ Montpellier
Cirad
Montpellier
France

Auteur correspondant / Corresponding author:
Jean Gérard - jean.gerard@cirad.fr

Photo 1.
Aspect général d'un genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus*) aux environs de Sidi Bel Abbès, dans la station de Moulay Slissen.
General aspect of a juniper (Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus) in the proximity of Sidi Bel Abbès, in the station of Moulay Slissen.
Photo D. Ouaar.

Doi : 10.19182/bft2021.350.a36837 – Droit d'auteur © 2021, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 4 janvier 2021 ; date d'acceptation : 17 août 2021 ; date de publication : 1er décembre 2021.

Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article
Ouaar D., Megherbi Benali A., Toumi Benali F., Thévenon M.-F., Candelier K., Pignolet L., Gérard J., 2021. Durabilité naturelle et composition en extractibles du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* du Nord-Ouest de l'Algérie. Bois et Forêts des Tropiques, 350 : 57-69. Doi : https://doi.org/10.19182/bft2021.350.a36837

Bois et Forêts des Tropiques – ISSN: L-0006-579X
Volume 350 – 4th quarter - December 2021 - p. 57-69
FOCUS / DURABILITY AND EXTRACTS OF *JUNIPERUS OXYCEDRUS*

D. Ouaar, A. Megherbi Benali,
F. Toumi Benali, M.-F. Thévenon,
K. Candelier, L. Pignolet, J. Gérard

RÉSUMÉ

Durabilité naturelle et composition en extractibles du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* du Nord-Ouest de l'Algérie

Les bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* étudiés sont issus de deux provenances du Nord-Ouest algérien aux conditions climatiques et édaphiques différentes (régions de Sidi Bel Abbès et de Tiaret). Les extractibles et les polyphénols totaux du duramen ont été quantifiés et caractérisés. La durabilité naturelle du duramen a été évaluée vis-à-vis de deux champignons de pourriture brune (*Rhodonia placenta* et *Coniophora puteana*) et de termites (*Reticulitermes flavipes*). Les taux d'extractibles les plus élevés sont ceux obtenus pour les bois de Sidi Bel Abbès. L'extraction au mélange toluène-éthanol a permis d'obtenir des taux plus élevés que l'extraction à l'eau, respectivement 14,17 % et 1,35 % pour les bois de Sidi Bel Abbès contre 9,84 % et 1,19 % pour ceux de Tiaret. Les analyses par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC/MS) montrent que les familles chimiques majoritairement identifiées dans les extraits aqueux sont les sesquiterpénoïdes, les acides gras et les stérols. Dans les extraits au toluène-éthanol, les sesquiterpènes et les sesquiterpénoïdes sont les composés majeurs. La composition en sesquiterpènes et sesquiterpénoïdes est différente en fonction de la provenance des bois, mais reste très similaire quantitativement. La teneur en polyphénols totaux des extraits au méthanol de la provenance Sidi Bel Abbès est supérieure à celle de Tiaret. Aucune différence significative n'est observée entre les deux provenances pour la durabilité naturelle vis-à-vis de *C. puteana*. En revanche, la résistance à *R. placenta* est significativement plus élevée pour la provenance Sidi Bel Abbès. Pour les deux provenances, le bois de *J. oxycedrus* subsp. *oxycedrus* est très durable vis-à-vis des champignons de pourriture. Il est aussi répulsif et résistant aux attaques de termites. Une analyse ciblée des relations entre la composition chimique et la durabilité naturelle permettra de mettre en évidence la nature du ou des constituants responsables de la durabilité naturelle du bois de *J. oxycedrus* subsp. *oxycedrus*, tant vis-à-vis des champignons lignivores que des termites.

Mots-clés : *Juniperus oxycedrus*, durabilité naturelle, extractibles, duramen, termites, Algérie nord-occidentale.

ABSTRACT

Natural resistance and extractives of *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* wood from north-western Algeria

The wood samples of *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* studied were obtained from two provenances in north-western Algeria characterised by different climatic and edaphic conditions (Sidi Bel Abbès and Tiaret regions). The extractive compounds and total polyphenols of the heartwood were quantified and characterised. This study assessed the natural resistance of the heartwood to two brown rot fungi (*Rhodonia placenta* and *Coniophora puteana*) and to termites (*Reticulitermes flavipes*). The highest extractive rates were obtained for the wood from Sidi Bel Abbès. Extraction with a toluene-ethanol mixture produced higher rates than extraction with water, respectively 14.17% and 1.35% for the wood samples from Sidi Bel Abbès as against 9.84% and 1.19% for the samples from Tiaret. Gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) analyses showed that the majority of the chemical families identified in the aqueous extracts are sesquiterpenoids, fatty acids and sterols. The main compounds in the toluene-ethanol extracts were sesquiterpenes and sesquiterpenoids. The composition of the sesquiterpenes and sesquiterpenoids differs according to the origin of the wood, but remains quantitatively very similar. The total polyphenol content of the methanol extracts from Sidi Bel Abbès is higher than in those from Tiaret. No significant difference in natural durability against *C. puteana* was observed between the two provenances. However, resistance to *R. placenta* was significantly higher in the Sidi Bel Abbès provenance. For both provenances, the wood of *J. oxycedrus* subsp. *oxycedrus* is highly resistant to decay fungi and also repellent and resistant to termite attacks. A targeted analysis of the relationships between chemical composition and natural durability should reveal the nature of the constituent(s) responsible for the natural resistance of *J. oxycedrus* subsp. *oxycedrus* wood to both lignivorous fungi and termites.

Keywords: *Juniperus oxycedrus*, natural resistance, extractives, duramen, termites, north-western Algeria.

RESUMEN

Durabilidad natural y composición extractiva de la madera de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* del noroeste de Argelia

La madera de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* estudiada procedía de dos zonas del noroeste de Argelia con condiciones climáticas y edáficas diferentes (regiones de Sidi Bel Abbès y Tiaret). Se cuantificaron y caracterizaron los extractos y los polifenoles totales del duramen. Se evaluó la durabilidad natural del duramen frente a dos hongos de pudrición marrón *(Rhodonia placenta* y *Coniophora puteana*) y frente a las termitas *(Reticulitermes flavipes*). Las tasas de extractos más altas se obtuvieron para la madera de Sidi Bel Abbès. La extracción con una mezcla de tolueno y etanol produjo niveles más elevados que la extracción con agua, respectivamente del 14,17 % y del 1,35 % para la madera de Sidi Bel Abbès y del 9,84 % y 1,19 % para la madera de Tiaret. Los análisis mediante cromatografía de gases combinada con espectrometría de masas (CG/EM) muestran que las familias químicas identificadas en los extractos acuosos son principalmente sesquiterpenoides, ácidos grasos y esteroles. En los extractos de tolueno-etanol, los sesquiterpenos y los sesquiterpenoides son los compuestos principales. La composición de sesquiterpenos y sesquiterpenoides difiere según el origen de la madera, pero es cuantitativamente muy similar. El contenido total de polifenoles de los extractos con metanol provenientes de Sidi Bel Abbès es mayor que en los provenientes de Tiaret. No se observaron diferencias significativas entre las dos procedencias en cuanto a la durabilidad natural frente a *C. puteana*. Por el contrario, la resistencia a *R. placenta* fue significativamente mayor para la madera originaria de Sidi Bel Abbès. En ambas procedencias, la madera de *J. oxycedrus* subsp. *oxycedrus* es muy resistente a los hongos de la podredumbre. También es repelente y resistente al ataque de las termitas. Un análisis específico de las relaciones entre la composición química y la durabilidad natural revelará la naturaleza de los constituyentes responsables de la durabilidad natural de la madera de *J. oxycedrus* subsp. *oxycedrus*, tanto ante los hongos lignívoros como ante las termitas.

Palabras clave: *Juniperus oxycedrus*, durabilidad natural, extractos, duramen, termitas, noroeste de Argelia.

Introduction

La forêt algérienne, partie intégrante de la région méditerranéenne, présente des richesses naturelles importantes mais souvent sous-valorisées. Parmi les espèces forestières présentes dans le pays, le genévrier oxycèdre ou cade (*Juniperus oxycedrus*, famille des Cupressaceae), espèce typique et endémique de la région méditerranéenne, représente un élément pionnier très dynamique, notamment en milieu forestier dégradé. Cette essence a la capacité de pouvoir se développer de manière très locale sous des bioclimats semi-arides, en résistant à la sécheresse, en étant peu exigeante, et en étant plastique quant à la nature et la fertilité des sols.

Klimko *et al*. (2007) ont subdivisé *Juniperus oxycedrus* en quatre sous-espèces : subsp. *oxycedrus*, subsp. *macrocarpa* (Sibth. & Sm.) Ball, subsp. *badia* (H. Gay) Debeaux, subsp. *transtagana* (Franco). Parmi ces quatre sous-espèces, *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* (photo 1) est l'espèce la plus abondante en Algérie (Chaouche *et al*., 2015). Durant ces quinze dernières années, plusieurs travaux de recherche ont été conduits sur *Juniperus oxycedrus,* notamment en Algérie. Ces études ont porté sur des sujets variés tels que les variations morphologiques des populations (Klimko *et al*., 2007 ; Hafsi *et al*., 2017) ou l'activité des composés phénoliques présents dans l'écorce des racines (Chaouche *et al*., 2015). Elles sont cependant principalement axées sur l'obtention, la composition et l'activité, d'une part, de l'huile de cade obtenue par distillation du bois, cette huile étant très utilisée en médecine vétérinaire, en dermatologie et en médecine traditionnelle (Quézel et Gast, 1998 ; Loizzo *et al*., 2007 ; Julin, 2008 ; Abdellah *et al*., 2018 ; Al-Snafi, 2018), et, d'autre part, des huiles essentielles issues des feuilles, des baies, des cônes ou des écorces (Marongiu *et al*., 2003 ; Dob *et al*., 2006 ; Medini *et al*., 2013 ; Hayta et Bagci, 2014 ; Al-Snafi, 2018).

Les études sur le bois de *Juniperus oxycedrus* ont donc essentiellement porté sur la composition et l'activité biologique des huiles essentielles alors que les connaissances sur son bois en tant que matériau sont parcellaires et peu documentées. En outre, ce bois est qualifié de résistant ou durable sans qu'aucune référence solide ne soit associée à cette constatation (Uçar et Balaban, 2002 ; Balaban *et al*., 2003 ; Julin, 2008).

La durabilité naturelle du bois correspond à sa résistance intrinsèque aux attaques d'agents biologiques de détérioration, sans traitement chimique ou physique de préservation (Dulbecco et Luro, 2001). Cette caractéristique est généralement associée à la teneur et à la composition chimique des extractibles présents naturellement dans le bois (Taylor *et al*., 2006), sachant que les classes de durabilité concernent uniquement le duramen, l'aubier étant toujours considéré comme non durable (EN 350, 2016 ; Fouquet, 2009).

Nos recherches répondent à deux objectifs : évaluer la durabilité naturelle du duramen de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* vis-à-vis de deux espèces de champignons de pourriture brune (*Rhodonia placenta* et *Coniophora puteana*) et d'une espèce de termites (*Reticulitermes flavipes*) ; caractériser et quantifier les fractions extractibles et les polyphénols totaux de ces bois.

La durabilité naturelle évaluée sera mise en corrélation avec la composition chimique de ces bois. Ces résultats s'inscrivent dans une étude de valorisation multifactorielle du bois de *J. oxycedrus* subsp. *oxycedrus*, cupressacée de l'Ouest algérien, dont les usages locaux vont du bois matériau à la pharmacopée traditionnelle

Matériel et méthodes

Origines des bois

L'étude a été réalisée sur des échantillons de bois prélevés sur deux arbres de même âge (environ 130 ans) issus de deux provenances du Nord-Ouest algérien, différentes de par leurs caractéristiques bioclimatiques : station de Moulay Slissen dans la région de Sidi bel Abbès et station de Medroussa dans la région de Tiaret (figure 1). Le choix de ces deux provenances a pour finalité d'évaluer l'influence des conditions de croissance locales sur la composition en

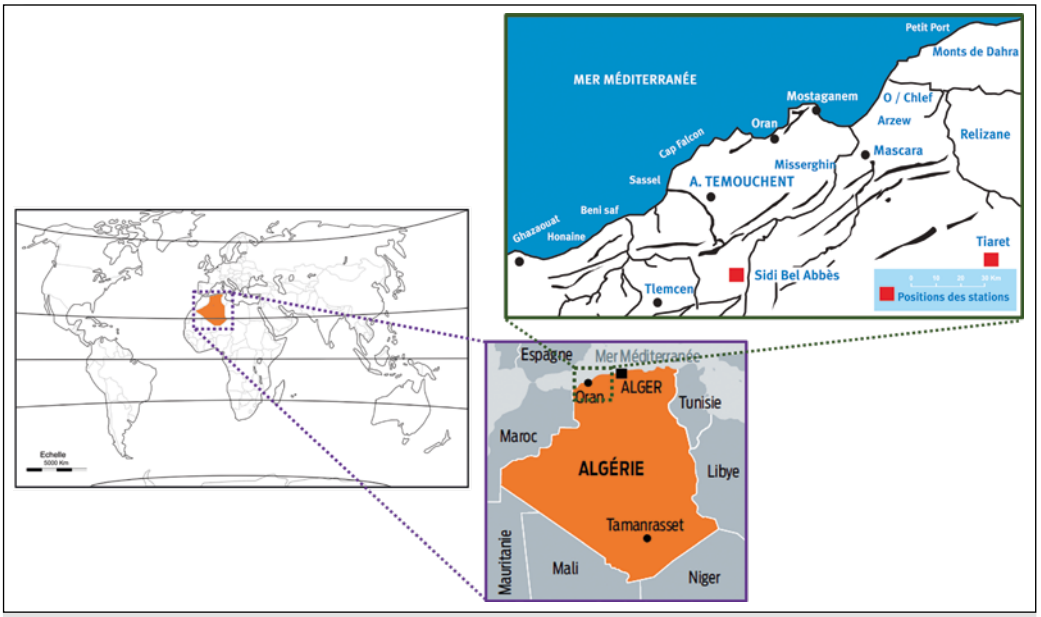


Figure 1.
Localisation des deux régions de prélèvement des échantillons de *Juniperus oxycedrus* dans le Nord-Ouest de l'Algérie (Boudouaya *et al*., 2015).
Location of the two sampling regions of Juniperus oxycedrus in Northwest Algeria (Boudouaya et al., 2015).

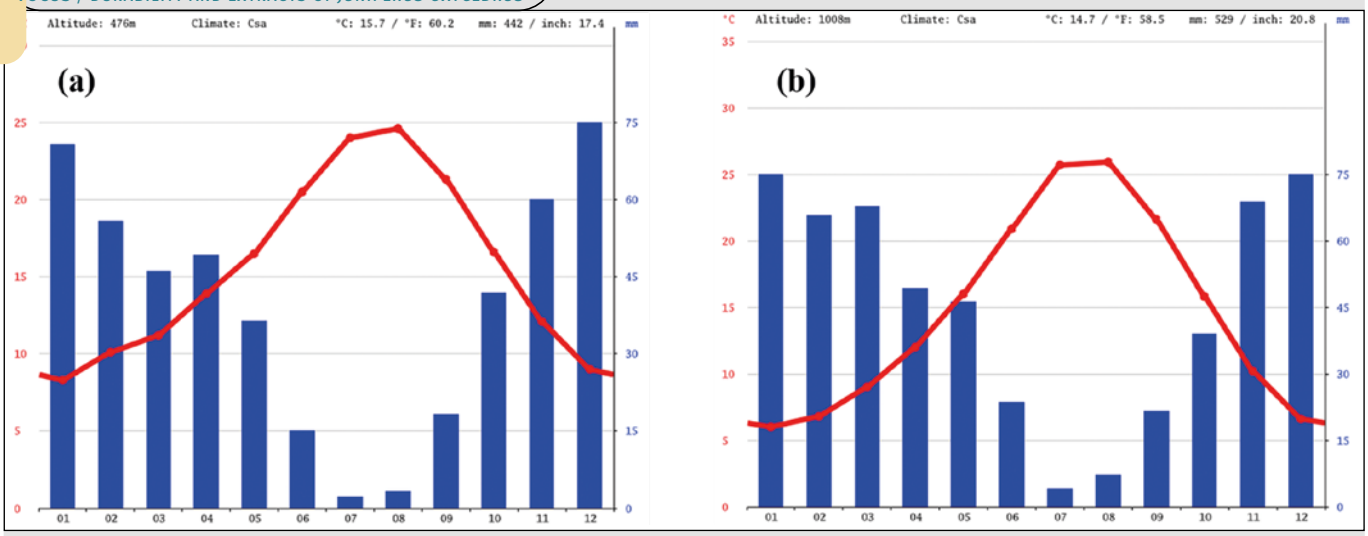


Figure 2.
Diagrammes ombrothermiques de la région de Sidi Bel Abbès (a) et de la région de Tiaret (b) sur la période 1982-2012 (source : https://fr.climate-data.org). En rouge la température, en bleu les précipitations.
Umbrothermal diagrams of the Sidi Bel Abbès region (a) and the Tiaret region (b) over the period 1982-2012 (source: https://fr.climate-data.org). In red the temperature, in blue the precipitation.

extractibles et la durabilité naturelle du bois. Ces deux provenances correspondent en effet à des conditions écologiques différentes (altitude, climat et nature du sol) qui impactent la croissance des arbres.

La région de Sidi Bel Abbès (35°12'0" N ; 0°38'29" W), située à une altitude de 600 m, est caractérisée par un climat méditerranéen. Elle appartient à l'étage bioclimatique semi-aride à tendance continentale avec des hivers humides et froids, des étés secs et chauds, et des saisons intermédiaires courtes (Bennabi *et al.*, 2012). Sidi Bel Abbès affiche une température annuelle moyenne de 15,7 °C (moyenne minimum de 8,3 °C en janvier et moyenne maximum de 24,6 °C en août). Sur l'année, la précipitation moyenne est de 442 mm, avec une amplitude de 68 mm entre le mois le plus sec et le mois le plus humide (figure 2a).

La région de Tiaret (35°22'2,478" N ; 1°19'19,315" E), située à une altitude de 1 000 m, est caractérisée par un climat du type méditerranéen. Elle appartient à l'étage bioclimatique semi-aride inférieur, avec des hivers rigoureux et des étés chauds et secs (Achir et Hellal, 2016). Tiaret affiche une température annuelle moyenne de 14,7 °C (moyenne minimum de 6,0 °C en janvier et moyenne maximum de 25,9 °C en août). Sur l'année, la précipitation moyenne est de 529 mm, avec une moyenne minimum de 4 mm en juillet et une moyenne maximum de 73 mm en janvier (figure 2b).

Des analyses physico-chimiques (texture, conductivité électrique, pH, calcaire total, calcaire actif et matière organique) réalisées selon les méthodes décrites par Aubert (1978) ont mis en évidence des différences entre les natures des sols des deux stations étudiées. Le sol de la station de Moulay Slissen (région de Sidi Bel Abbès) est caractérisé par une texture de type limono-sableux, peu calcaire, non salé, pauvre en matière organique, avec un pH légèrement alcalin. Le sol de la station de Medroussa (région de Tiaret) est caractérisé par une texture de type limoneux, caillouteux, fortement calcaire, non salé, très pauvre en matière organique et avec un pH légèrement alcalin. Les conditions édaphiques de croissance de *Juniperus oxycedrus* sont donc moins favorables sur la station de Medroussa.

Dans la station de Moulay Slissen, l'essence principale est le pin d'Alep (*Pinus halepensis*), *Juniperus oxycedrus* étant considéré comme une essence secondaire. La strate herbacée est dominée par l'alfa (*Stipa tenacissima*). La station de Medroussa est caractérisée par la présence de *Juniperus oxycedrus* avec quelques sujets de chêne kermès *(Quercus coccifera)*. Cette formation à dominance arbustive est représentée par le pistachier lentisque (*Pistacia lentiscus*) et le filaire à feuilles étroites (*Phillyrea angustifolia*). La strate herbacée est composée essentiellement de ciste épineux (*Calycotome intermedia*) et de romarin (*Rosmarinus officinalis*).

Le choix s'est porté sur des arbres non fourchus, bienvenants, aux troncs sans défaut avec un diamètre compris entre 12 et 21 cm (arbres considérés comme matures) et d'une hauteur comprise entre 2,70 et 4 m.

Échantillonnage

Dans chacune des deux régions, les arbres sélectionnés ont été abattus à 40 cm au-dessus du sol pour faciliter l'abattage manuel. Des tronçons de 30 à 80 cm ont été débités pour les expérimentations. Dans chaque arbre ont été prélevées 100 éprouvettes de duramen, réparties en plusieurs points de prélèvement, de dimensions 25 mm x 10 mm x 5 mm (selon les directions longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T)). Parmi ces 100 éprouvettes, 70 ont été sélectionnées pour les essais fongiques et 10 pour les essais de résistance vis-à-vis des termites. Le reste des échantillons a été broyé puis tamisé (broyeur RETSCH SM200), avec une granulométrie comprise entre 0,2 et 0,5 mm pour la détermination des fractions extractibles, et une granulométrie comprise entre 750 et 800 µm pour le dosage des polyphénols totaux. Avant chaque protocole d'essais, les échantillons (éprouvettes et poudres) ont été stockés et conditionnés en enceinte climatique, à 20 ± 2 °C et 65 ± 5 % d'humidité relative (HR).

Extraction et caractérisation des fractions extractibles

Les échantillons sous forme de poudres ont été séchés en étuve à 103 ± 2 °C jusqu'à stabilisation de leur masse (m_1). La procédure suivie est similaire à celle de Rowell *et al.* (2005). Trois réplicats des poudres de bois ont subi une extraction au soxhlet à l'eau distillée (9 h, solvants de qualité technique, Carlo Erba Reagents Val-de-Reuil, France) puis avec une solution toluène/éthanol (2:1, v/v, 9 h) (Carlo Erba Reagents – Val-de-Reuil, France). Après chacune des extractions, les échantillons sont séchés à 103 ± 2 °C pendant 48 h, puis pesés (m_2 après extraction à l'eau ; m_3 après extraction toluène/éthanol). En parallèle, les extraits récupérés sont concentrés par évaporation à sec à l'aide d'un évaporateur rotatif (Rotavapor R-200 Büchi, Suisse : 40 °C – 7,2 MPa pour les extraits à l'eau ; 40 °C – 9,5 MPa pour les extraits toluène/éthanol).

Les taux d'extractibles sont déterminés par les formules suivantes :

$$Ext._{eau}\ (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad \text{(équation 1)}$$

$$Ext._{tol/eth}\ (\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times 100 \quad \text{(équation 2)}$$

avec :

- $Ext._{eau}$: taux d'extraits à l'eau en %, sur base anhydre ;
- $Ext._{tol/eth}$: taux d'extraits à la solution toluène/éthanol (2:1, v/v) en %, sur base anhydre ;
- m_1 : masse anhydre initiale en grammes ;
- m_2 : masse anhydre après extraction à l'eau en grammes ;
- m_3 : masse anhydre après extraction à la solution toluène/éthanol en grammes ;

Les compositions chimiques des différentes fractions d'extractibles ainsi récupérées ont été analysées par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC/MS).

Ces analyses ont été réalisées sur un chromatographe en phase gazeuse TRACE™ 1300 (Thermo) équipé d'une colonne TG5-MS (5% phenyl methyl siloxane) 30 m x 0,25 mm i.d., épaisseur de film 0,25 µm (Thermo).

Le spectromètre couplé à la chaîne chromatographique est un DSQII (Thermo) équipé d'une source EI a 70 eV. Le spectre de masse est enregistré entre 50 et 650 Da (m/z unité équivalente). Les injections sont effectuées en mode split 1/350. Les extraits ne sont pas dérivés avant injection.

Les caractéristiques de l'analyse sont les suivantes :

- volume injecté, 1 µl ;
- gaz porteur, hélium, avec un débit linéaire de 1,2 ml/min.

L'identification des composés a été réalisée par comparaison de leur spectre de masse avec ceux de la librairie (NIST2017 v2.3 / Xcalibur data system) associée à l'équipement.

Extraction et dosage des polyphénols totaux

Extraction des polyphénols totaux

L'extraction a été réalisée selon le protocole de Boizot et Charpentier (2006) avec quelques modifications. Pour chaque arbre, une quantité de 50 mg de duramen broyé (granulométrie 750-800 µm) est mélangée avec soit 1,8 ml de solution de méthanol (qualité analytique) concentré à 80 % (Carlo Erba – Val-de-Reuil, France), soit 1,8 ml de solution d'acétone (qualité analytique) concentré à 80 % (Carlo Erba – Val-de-Reuil, France), dans un tube Eppendorf 2 ml. Ensuite, les mélanges sont placés dans un bain à ultrasons et laissés à soniquer pendant une heure, tout en étant secoués toutes les dix minutes. Ensuite, les tubes sont laissés à macérer pendant une heure à 4 °C à l'aide d'un agitateur rotatif (20 rpm). Après centrifugation, le surnageant contenant les polyphénols est récupéré à l'aide d'une pipette équipée d'un cône à filtre à charbon actif, puis placé dans un tube à hémolyse.

Une seconde extraction identique sur le culot est réalisée pour extraire des polyphénols supplémentaires. Les surnageants de ces deux extractions successives sont recueillis dans le même tube à hémolyse. Un volume de 500 µl de surnageant est ainsi récolté, puis évaporé à sec pendant trois heures au concentrateur sous vide (Thermo Scientific Savant SpeedVac™, ThermoFischer, États-Unis). Les résidus secs sont ensuite solubilisés dans 250 µl de méthanol pur (Carlo Erba – Val-de-Reuil, France), puis stockés à 4 °C jusqu'au dosage des polyphénols totaux.

Dosage des polyphénols totaux

Le dosage des polyphénols totaux au réactif de Folin-Ciocalteu (Folin-Ciocalteu's phenol reagent 2N, Sigma-F9252 , Saint Quentin Fallavier) a été réalisé selon la méthode décrite par Singleton et Rossi (1965). En milieu alcalin, les polyphénols réagissent avec le mélange phosphomolybdique/phosphotungstique du réactif de Folin-Ciocalteu pour former un complexe bleu visible à 735 nm. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de polyphénols présents dans l'extrait de bois. La teneur en composés phénoliques est déterminée à partir d'une gamme étalon d'acide gallique : 8 points de concentration de 0 à 20 µg/ml ; 1,5 ml de solution pour chaque point de la gamme d'étalonnage en tubes Eppendorf.

Les extraits préalablement récoltés sont dilués avec de l'eau ultra-pure (50 µl extrait : 50 µl eau). Dans un tube Eppendorf, un volume de 500 µl de réactif de Folin-Ciocalteu (dilué 10 fois dans de l'eau ultra pure) est ajouté à 100 µl d'extrait préalablement dilué dans de l'eau ultra-pure (50:50 ; v:v). 400 µl de solution de carbonate de sodium (Na_2CO_3, 75 g/l) sont ajoutés. Ensuite, les tubes sont agités et placés pendant 5 minutes à 40 °C dans une étuve. Le contenu de chaque tube est déposé en triplicata à raison de 250 µl par puits sur une plaque de micro-titration à fond plat (Greiner) (Boizot et Charpentier, 2006).

L'absorbance est lue à 735 nm par un spectrophotomètre lecteur de plaques (Multiskan Spectrum Thermo) contre le blanc de la réaction. La quantité de polyphénols totaux (Q) contenue dans la poudre extraite est calculée

Bois et Forêts des Tropiques – ISSN: L-0006-579X
Volume 350 – 4th quarter - December 2021 - p. 57-69

selon la formule suivante et exprimée en mg d'équivalent acide gallique par gramme de matière sèche :

$$Q = \left(\frac{c_m}{MS}\right) \times \left(\frac{V_e}{V_s}\right) \times \left(\frac{V_r}{V_i}\right) \times F \qquad \text{(équation 3)}$$

avec :

- Q : quantité de polyphénols totaux en mg d'équivalent acide gallique par g de matière sèche ;
- Cm : concentration massique en µg d'équivalent acide gallique par ml ;
- MS : masse de matière sèche pesée au départ en mg ;
- Ve : volume de solvant utilisé pour l'extraction en ml ;
- Vs : volume de surnageant prélevé pour l'évaporation sous vide en ml ;
- Vr : volume de reprise du résidu sec après évaporation en µl ;
- Vi : volume utilisé pour le dosage en µl ;
- F : facteur de dilution (= 2).

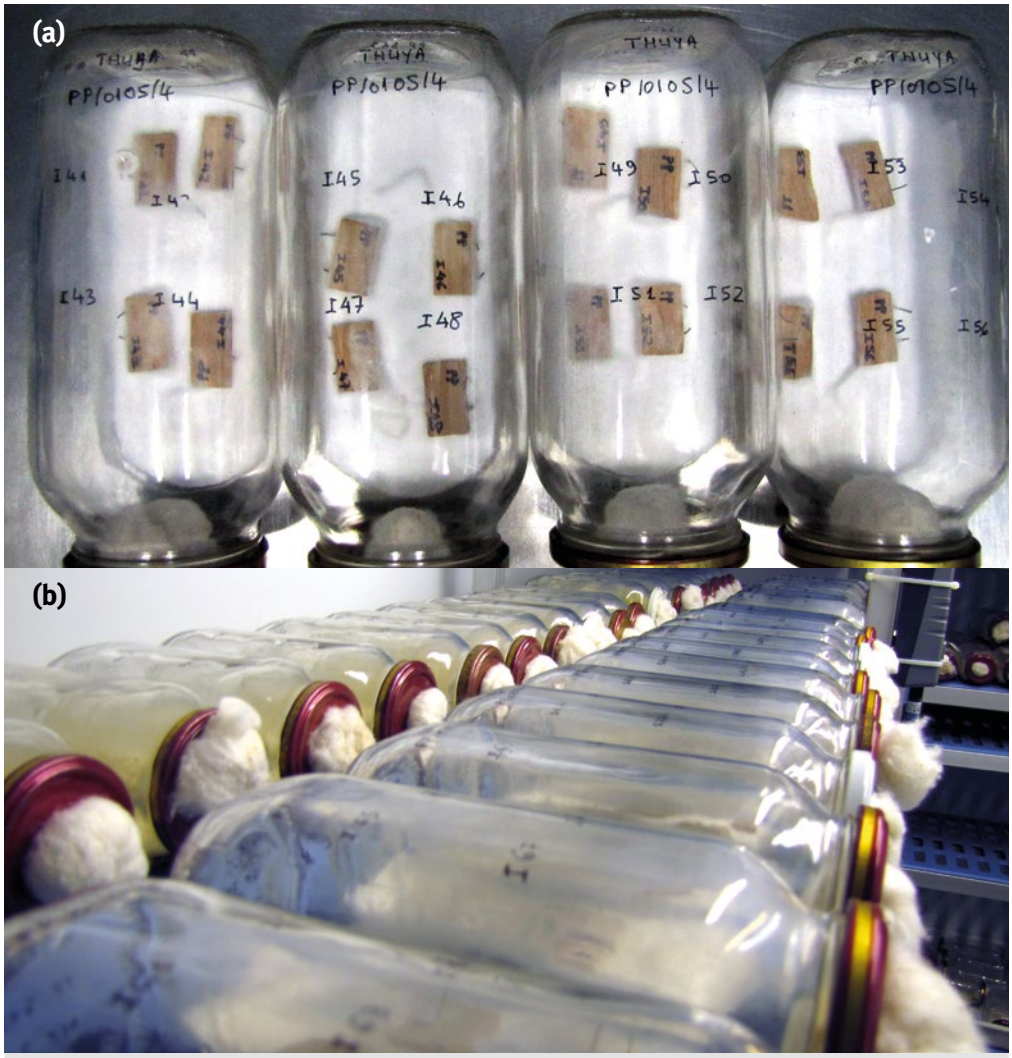
Durabilité naturelle vis-à-vis des champignons Basidiomycètes

Les essais fongiques ont été effectués en adaptant les spécifications requises par la norme XP CEN/TS 15083-1 (2006) sur des éprouvettes de duramen de dimensions 25 mm x 10 mm x 5 mm (L, R, T). Deux champignons lignivores de type pourriture cubique ont été utilisés : *R. placenta* (RP) ((Fries) Cooke sensu J. Eriksson, strain FPRL 280) et *C. puteana* (CP) ((Schumacher ex Fries) Karsten, strain BAM Ebw.15) (Boudouaya *et al.*, 2015 ; Bopenga, 2020).

Pour chaque provenance, trente éprouvettes de duramen (conditionnées à 20 ± 2 °C et 65 ± 5 % HR) ont été soumises à *C. puteana* et à *R. placenta*. Dix éprouvettes de calcul de teneur en humidité ont également été utilisées pour déterminer les masses anhydres des éprouvettes testées vis-à-vis des champignons (m_4). Huit éprouvettes de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et huit éprouvettes d'aubier de pin sylvestre (*P. sylvestris* L.) de mêmes dimensions ont été utilisées comme témoins de virulence pour les deux champignons de pourriture cubique. Ces éprouvettes de contrôle de virulence ont été séchées à 103 ± 2 °C, jusqu'à stabilisation de leur masse anhydre (m_4), avant d'être soumises aux essais fongiques. Toutes les éprouvettes ont été stérilisées deux fois à la vapeur d'eau avant essai.

Des flacons en verre (720 ml) ont été remplis de 72 ml de milieu de culture, composé de 40 ± 0,5 g de malt en poudre et de 20 ± 0,5 g d'agar-agar pour 1 litre d'eau distillée. Les flacons fermés ont été ensuite stérilisés à l'autoclave (121 °C – 1 bar) pendant 20 minutes. Lorsque les milieux de culture sont refroidis et gélifiés (après 24 h), les flacons sont inoculés avec deux disques de mycélium de 1 cm de diamètre, provenant d'une culture de champignon âgée de 2 semaines, puis placés en chambre climatique (22 ± 2 °C et 70 ± 5 % HR) jusqu'à ce que le mycélium recouvre l'ensemble de la surface du milieu de culture (2 semaines).

Dans chaque dispositif, quatre éprouvettes d'une même essence de bois sont déposées sur des supports métalliques préalablement stérilisés à l'autoclave (photos 2) afin de limiter la reprise excessive d'humidité. Les dispositifs sont ensuite placés à l'obscurité en enceinte climatique (22 ± 2 °C et 70 ± 5 % HR) pendant 8 semaines (photo 2b).



Photos 2.
Exposition des éprouvettes de bois aux champignons (a) et incubation des éprouvettes dans une enceinte climatique pendant 8 semaines (b).
Exposure of wood specimens to fungi (a) and incubation of specimens in a climate chamber for 8 weeks (b).
Photos M.-F. Thévenon

Tableau I.
Classes de durabilité (DC) du bois vis-à-vis des attaques fongiques (Basidiomycètes) selon la norme XP CEN/TS 15083-1 (2006).
Durability classes (DC) of wood against fungal attack (Basidiomycetes) according to XP CEN/TS 15083-1 (2006).

Classe de durabilité	Description	Perte de masse (PM) en %
DC 1	Très durable	PM ≤ 5
DC 2	Durable	5 < PM ≤10
DC 3	Moyennement durable	10 < PM ≤15
DC 4	Faiblement durable	15 < PM ≤30
DC 5	Non durable	30 < PM

PM : perte de masse médiane (en %) obtenue avec le champignon le plus virulent parmi les champignons testés.

À la fin de la période d'incubation, les éprouvettes de bois sont retirées des dispositifs d'essais, nettoyées avec une brosse douce, et pesées immédiatement afin de déterminer leur masse humide (m_5). Les échantillons sont ensuite séchés à l'étuve à 103 ± 2 °C pendant 24 h, puis pesés afin de déterminer leur masse anhydre finale (m_6).

L'humidité en fin d'essai (H) et la perte de masse des échantillons (PM) sont déterminées par les formules suivantes :

$$H(\%) = \left(\frac{m_5 - m_6}{m_6}\right) \times 100 \quad \text{(équation 4)}$$

$$PM(\%) = \left(\frac{m_4 - m_6}{m_4}\right) \times 100 \quad \text{(équation 5)}$$

avec :

- H : teneur en humidité des éprouvettes exposées aux champignons, en grammes ;
- PM : perte de masse des éprouvettes exposées aux champignons, en grammes (sur base anhydre) ;
- m_4 : masse anhydre initiale, en grammes ;
- m_5 : masse humide après exposition fongique, en grammes ;
- m_6 : masse anhydre après exposition fongique, en grammes.

Selon la norme XP CEN/TS 15083-1 (2006), les valeurs médianes des pertes de masse ainsi établies permettent de déterminer la classe de durabilité naturelle des bois testés (tableau I).

Durabilité naturelle vis-à-vis des termites

Les essais de résistance aux termites ont été réalisés par une méthode de test rapide (*screening test*) de non-choix en boîte de Petri, adaptée de la norme EN 117 (2013). Pour chaque provenance de bois, 10 éprouvettes de duramen de dimensions 25 mm x 10 mm x 5 mm (L, R, T), préalablement conditionnées en enceinte climatique (20 ± 2 °C et 65 ± 5 % HR), ont été testées vis-à-vis de l'attaque de termites de l'espèce *Reticulitermes flavipes* (ex *santonensis*).

Une quantité de 30 g de sable de Fontainebleau humide (4 volumes de sable pour 1 volume d'eau) a été placée sur la périphérie de la boîte de Petri de 9 cm de diamètre. Dans chaque dispositif d'essai, 50 termites ouvriers, 1 soldat et 1 nymphe ont été introduits. L'échantillon de bois à tester est placé au centre de la boîte, sur une grille en plastique afin d'éviter le contact direct avec le plastique et de limiter l'absorption d'humidité. Les dispositifs sont placés dans l'obscurité en enceinte climatique à 27 ± 2 °C et à une humidité relative supérieure à 75 %, pendant 4 semaines (photo 3). Des contrôles réguliers des dispositifs d'essais (suivi des comportements des termites et réhumidification du sable si nécessaire) ont été réalisés deux fois par semaine.

Dans ces mêmes conditions, cinq éprouvettes d'aubier de pin sylvestre (*P. sylvestris* L.), de dimensions 25 mm x 10 mm x 5 mm (L, R, T), ont été testées en tant que témoins de virulence.

À la fin de l'essai, les taux de survie des termites sont déterminés. Les éprouvettes sont nettoyées à l'aide d'une brosse douce, séchées à l'air libre pendant 24 h puis une

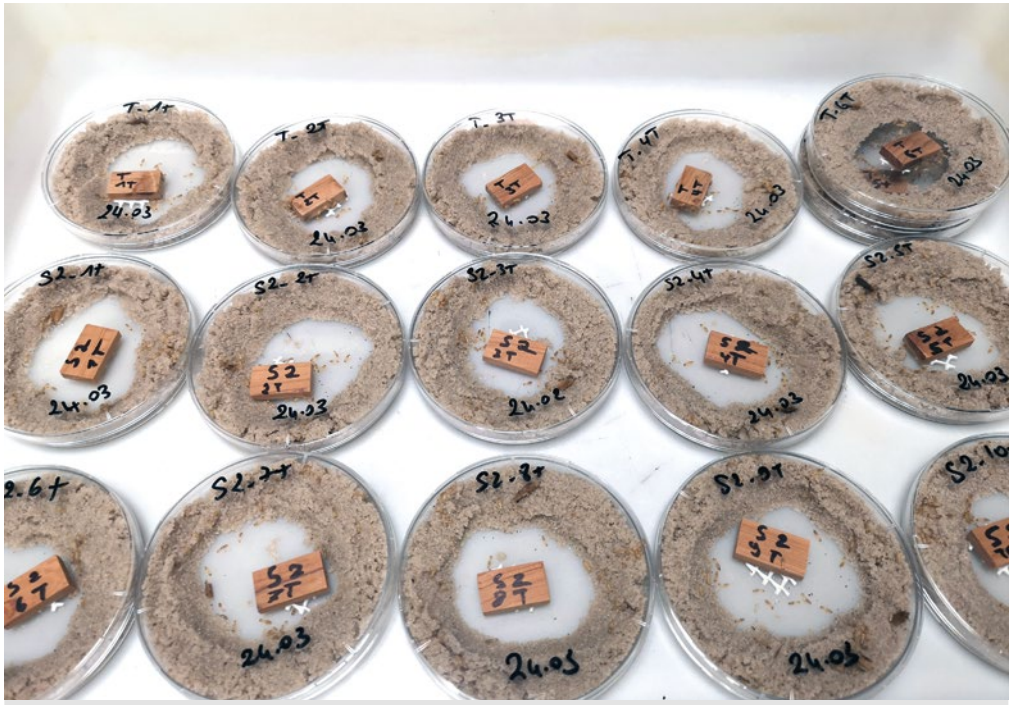


Photo 3.
Exposition des éprouvettes de bois aux termites.
Exposure of wood specimens to termites.
Photo M.-F. Thévenon

Bois et Forêts des Tropiques – ISSN: L-0006-579X
Volume 350 – 4th quarter - December 2021 - p. 57-69
FOCUS / DURABILITY AND EXTRACTS OF *JUNIPERUS OXYCEDRUS*

Tableau II.
Taux d'extractibles du bois de duramen de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* pour les deux provenances étudiées.
Extractives content of heartwood of Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus for the two provenances studied.

Solvant	Taux d'extractibles (% m/m)	
	Sidi Bel Abbès	Tiaret
Eau	1,35 ± 0,06	1,19 ± 0,02
Toluène/éthanol (2/1, v/v)	14,17 ± 0,87	9,84 ± 0,79
Total	**15,52 ± 0,83**	**11,03 ± 0,81**

cotation visuelle leur est attribuée, en fonction des critères définis dans la norme EN 117 (2013), avec une adaptation des critères à la taille des éprouvettes d'essai (Bedounguindzi *et al.*, 2020).

Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel IBM SPSS v 26. La comparaison entre les résultats des bois issus des deux provenances est établie avec le test U de Mann-Whitney pour un seuil de signification de 0,05.

Résultats

Quantification et caractérisation des extractibles

Taux d'extractibles

Le tableau II présente les taux d'extractibles du duramen des bois de *Juniperus oxycedrus* provenant de Sidi Bel Abbès et de Tiaret en fonction du solvant utilisé. Les rendements en extraits sont significativement différents en fonction de la provenance du bois et du solvant utilisé. Les taux d'extractibles les plus élevés ont été obtenus au mélange toluène/éthanol (14,17 % et 9,84 % m/m) par rapport à l'eau (1,35 % et 1,19 % m/m) pour les bois provenant de Sidi Bel Abbès et Tiaret respectivement. Le taux d'extractibles totaux du bois provenant de Sidi Bel Abbès est plus élevé que celui provenant de Tiaret (respectivement 15,52 % contre 11,03 % m/m).

Composition chimique des fractions extractibles

Extractibles solubles dans l'eau

Les figures 3a et 3b présentent les chromatogrammes issus des analyses GC-MS des fractions extractibles solubles dans l'eau des duramens des bois des deux provenances. Les familles chimiques majoritairement identifiées dans ces extraits aqueux sont les sesquiterpénoïdes, les acides gras et les stérols. Le groupe des sesquiterpénoïdes obtenus pour la provenance de Sidi Bel Abbès est dominé par l'alloaromadendrene oxyde-(2) (temps de rétention - tr 7,24 min), tandis que le bois provenant de Tiaret est dominé par l'aromadendrene oxyde-(2) (tr 8,56 min) (tableau III). Pour les deux provenances, les acides gras majoritairement présents dans les extraits aqueux sont l'acide tridécanoïque (tr 7,07 min), l'acide butanoïque (tr 6,57 min) et l'acide acétique (tr 6,82 min). Le campestérol (tr 4,6 min) est l'élément qui représente en majorité la famille des stérols ; il est présent en quantité plus importante dans le duramen des bois de Tiaret que dans les bois de Sidi Bel Abbès (tableau III).

Extractibles au toluène/éthanol

Les figures 3c et 3d présentent les chromatogrammes issus des analyses GC-MS des fractions extractibles au toluène/éthanol des duramens des bois des deux provenances. Une

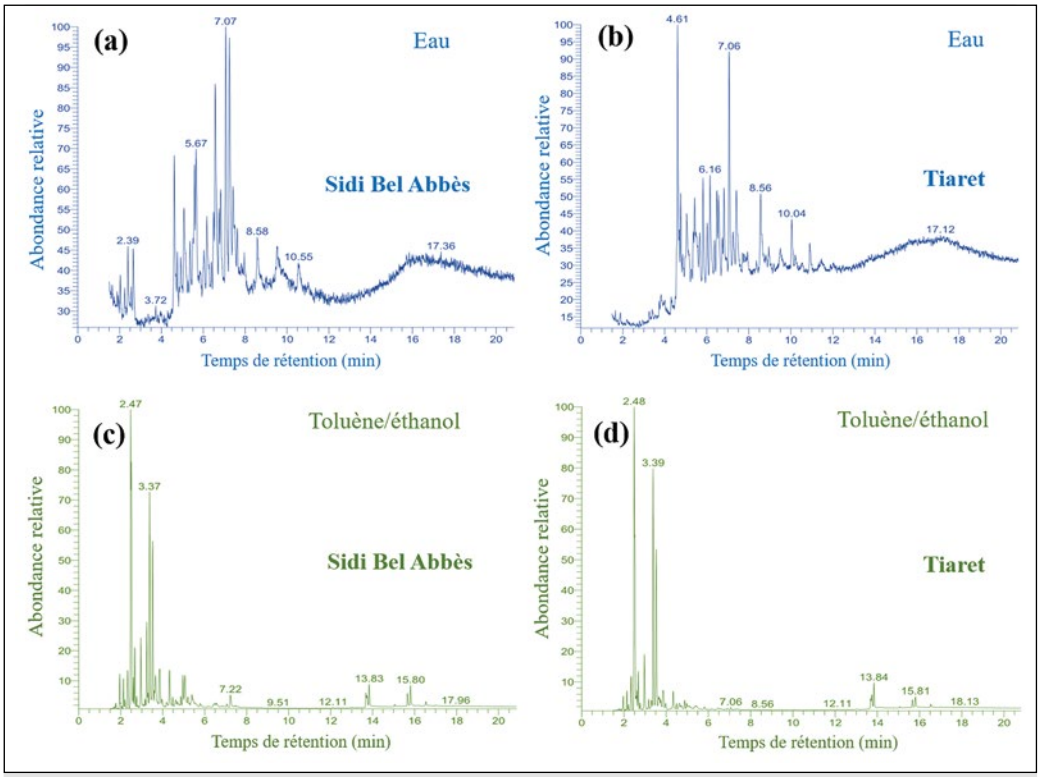


Figure 3.
Chromatogrammes issus des analyses GC-MS des extraits du duramen des bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oycedrus* : (a) extraits à l'eau du bois de Sidi Bel Abbès ; (b) extraits à l'eau du bois de Tiaret ; (c) extraits au mélange toluène/éthanol du bois de Sidi Bel Abbès ; (d) extraits au mélange toluène/éthanol du bois de Tiaret.
Chromatograms from GC-MS analyses of the heartwood extracts of Juniperus oxycedrus subsp. oycedrus: (a) water extracts from Sidi Bel Abbès wood; (b) water extracts from Tiaret wood; (c) toluene/ethanol extracts from Sidi Bel Abbès wood; (d) toluene/ethanol extracts from Tiaret wood.

importante quantité de molécules a été identifiée pour cette extraction. Les sesquiterpènes et les sesquiterpénoïdes représentent la fraction majeure pour les deux provenances des bois et sont majoritairement représentés par le naphtalène (tr 2,47 min), le cubénol (tr 3,37 min et 3,52 min), le ç-élémène (tr 2,96 min) et l'α-calacorène (tr 2,66 min). On remarque également que l'epicedrol (tr 5,06 min) est présent uniquement dans les extraits des bois de Sidi Bel Abbès. La composition en sesquiterpènes et sesquiterpénoïdes des extraits au toluène/éthanol est différente en fonction de la provenance des bois, mais reste très similaire en termes de quantité de molécules. Par ailleurs, on constate l'absence de composés phénoliques pour les deux extraits et une présence minime d'acide rétinoïque (tr 15,81 min) (tableau III).

Tableau III.
Composition chimique des extraits, à l'eau et à la solution toluène/éthanol, du bois de duramen de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* des deux provenances étudiées.
Chemical composition of the extracts, with water and toluene/ethanol solution, of the heartwood of Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus from the two provenances studied.

Extraits à l'eau			
Temps de rétention (tr en minutes)	Composés	Aire des pics (en %)	
		Sidi Bel Abbès	Tiaret
2,39	Terpinolène	2,41	0,00
2,64	Acide nanodecanoic ethyl ester	2,62	0,00
3,72	Caryophyllène	0,10	1,05
4,61	Campestérol	5,87	12,43
5,08	Acide isovalérique phenethyl ester	7,25	3,09
5,67	2,5 Dimethoxyphenol	4,81	2,74
6,17	Iso-furano-germacrene	4,23	6,10
6,57	Acide butanoïque	7,82	3,09
6,82	Acide acétique	3,88	4,56
7,07	Acide tridécanoïque	12,08	11,01
7,24	Alloaromadendrene oxide-(2)	9,97	2,16
8,56	Aromadendrene oxide-(2)	2,01	5,43
10,55	Aromadendrene oxide-(1)	1,83	1,73
Autres composés minoritaires ou non identifiés		35,12	46,61
Extraits à la solution toluène/éthanol			
Temps de rétention (rt en minutes)	Composés	Aire des pics (en %)	
		Sidi Bel Abbès	Tiaret
2,12	Caryophyllène	1,59	1,39
2,47	Naphtalène	27,49	32,68
2,66	α-calacorène	3,25	2,72
2,96	β-élémène	4,38	4,63
3,24	Epicedrol	5,06	0,00
3,37	Cubénol	12,83	19,22
3,52	Cubénol	12,13	15,75
3,65	Aromadendrene oxide-(1)	2,70	0,77
4,32	Aromadendrene oxide-(1)	2,79	1,56
7,22	Aromadendrene oxide-(1)	1,12	0,00
13,83	Ingénol	1,62	2,32
15,81	Acide rétinoïque	1,54	1,01
Autres composés minoritaires ou non identifiés		23,5	17,95

Dosage des polyphénols totaux

Les teneurs en polyphénols totaux des bois de deux provenances ont été déterminées en milligrammes d'équivalent de l'acide gallique par gramme de matière sèche (mg EAG/g) en se référant à la courbe d'étalonnage établie préalablement.

D'après les résultats obtenus, la teneur en polyphénols totaux des bois extraits au méthanol et provenant de Sidi Bel Abbès (8,46 ± 0,30 mg EAG/g MS) est significativement supérieure à celle de Tiaret (7,28 ± 0,23 mg EAG/g MS) (figure 4). Pour les deux provenances, les teneurs en polyphénols totaux extraits à l'acétone sont légèrement inférieures à celles obtenues avec le méthanol, mais cet écart n'est pas significatif. Cependant, la teneur en polyphénols totaux extraits à l'acétone et provenant de Sidi Bel Abbès (7,99 ± 0,19 mg EAG/g MS) est supérieure à celle de la provenance Tiaret (7,07 ± 0,30 mg EAG/g MS) (figure 4).

Durabilité naturelle vis-à-vis des champignons

Compte tenu des pertes de masse enregistrées après 8 semaines d'exposition sur les échantillons témoins de hêtre (32,40 ± 0,88 % pour *C. puteana*, 32,73 ± 0,90 % pour *R. placenta*) et d'aubier de pin sylvestre (29,02 ± 0,08 % pour *C. puteana*, 37,62 ± 0,06 % pour *R. placenta)*, la virulence des champignons permet de valider les essais fongiques. Par ailleurs, les taux d'humidité finale des éprouvettes de virulence après 8 semaines d'incubation doivent être supérieurs à 20 % : ils varient de 21,29 à 78,43 %. Ces taux d'humidité permettent donc le développement d'une attaque fongique.

L'étude statistique n'a révélé aucune différence significative entre les deux provenances pour l'espèce *C. puteana*. En revanche, on observe une différence très significative pour l'espèce *R. placenta* (figure 5).

Bois et Forêts des Tropiques – ISSN: L-0006-579X
Volume 350 – 4th quarter - December 2021 - p. 57-69

Le test de durabilité naturelle vis-à-vis des deux champignons de pourriture brune a montré que la perte de masse médiane est toujours inférieure à 5 % après 8 semaines d'incubation pour les deux provenances. D'après la norme XP CEN/TS 15083-1 (2006), le bois de cette essence peut être classé comme très durable (CD1).

Durabilité naturelle vis-à-vis des termites

Les résultats obtenus sur les éprouvettes de témoins de virulence (aubier de pin sylvestre) attestent la validité des essais de résistance aux termites (taux de survie supérieur à 50 %, 81,6 ± 8,4 %, et cotation visuelle de 4 correspondant à une forte attaque).

Quelle que soit la provenance du bois de duramen de *Juniperus oxycedrus,* après 4 semaines d'exposition aux termites (*Reticulitermes flavipes*), les taux de survie des termites sont nuls (sauf pour un échantillon provenant de Tiaret, où il reste un termite vivant) et les cotations visuelles des éprouvettes sont de 0 (aucune attaque, excepté pour deux éprouvettes provenant de Tiaret qui présentent une cotation visuelle de 1 traduisant une tentative d'attaque).

Lors des suivis réguliers des dispositifs d'essais, il a également été remarqué que les termites restaient bien à distance des éprouvettes de bois de *Juniperus oxycedrus* durant les 4 semaines d'exposition aux termites, indiquant un effet répulsif du bois.

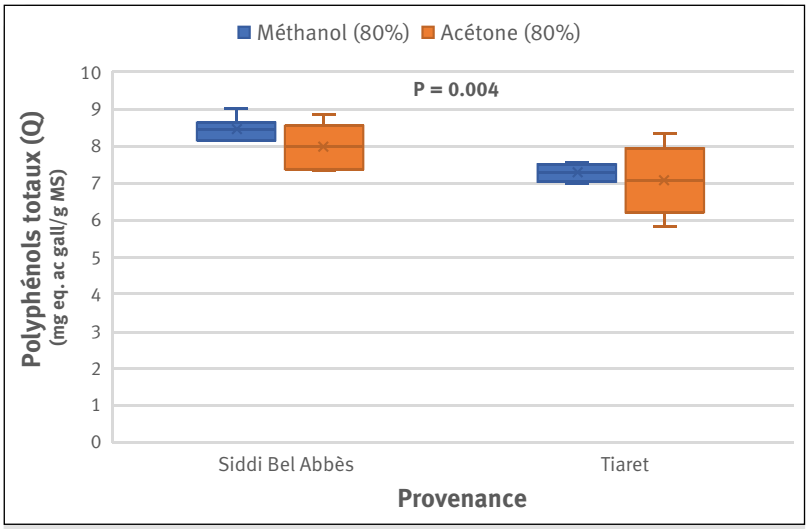


Figure 4.
Teneur en polyphénols totaux du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* des deux provenances, extraits au méthanol et à l'acétone.
Total polyphenol content of Juniperus oxycedrus subsp. oxycedrus wood from both provenances, extracted with methanol and acetone.

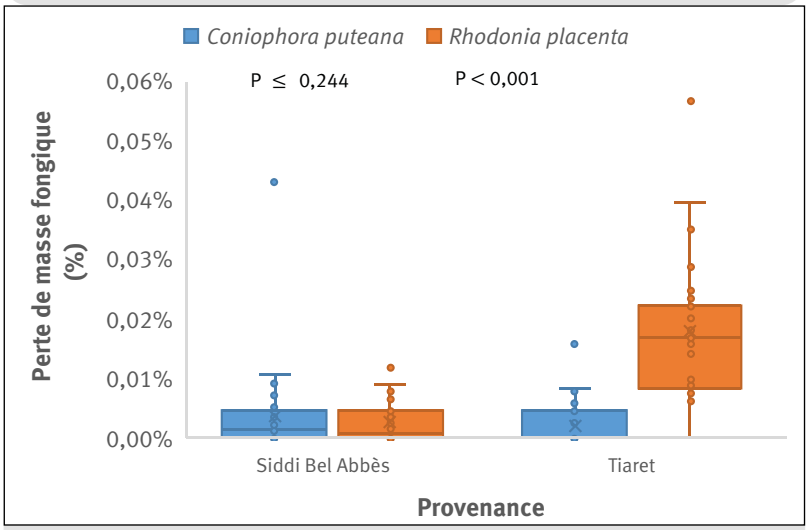


Figure 5.
Pertes de masse (%) dues aux deux champignons.
Mass losses (%) due to both fungi.

Discussion

L'analyse des taux et de la nature des extraits selon le solvant utilisé a révélé une variabilité importante des résultats obtenus selon la provenance des bois, avec notamment une variabilité de rendement d'extraction nette dans le cas des extractions éthanol/toluène. Les bois ayant bénéficié de conditions de croissance plus favorables (Sidi Bel Abbès) présentent de façon significative des taux d'extractibles plus élevés pour les deux solvants utilisés. La différence de polarité des solvants explique la différence en quantité et en nature des extraits. Le mélange éthanol/toluène est généralement utilisé pour extraire les extractibles lipophiles et hydrophiles.

Les sesquiterpènes et les sesquiterpénoïdes sont les composés majoritairement identifiés dans les extraits obtenus. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Marongiu *et al.* (2003) qui ont montré que la composition chimique de l'huile essentielle du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* est dominée par les sesquiterpènes et les sesquiterpénoïdes, plus précisément le δ-cadinène, le 1-epi-cubénol et le cubénol qui en sont les principaux composants.

Loizzo *et al.* (2007) ont aussi mis en évidence des différences dans la nature et la composition des extractibles selon la provenance des bois. Ils ont montré que la composition chimique de l'huile essentielle du bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* provenant du Liban est caractérisée par le δ-cadinène (14,5 %) et le cis-thujopsène (9,2 %), comme composés majoritaires, suivis des α-muurolène (4,9 %), cadalène (3,7 %), eremophilène (2,5 %), et le α-cédrol (2,2 %), alors que celle provenant de Sardaigne (Marongiu *et al.*, 2003) est composée de δ-cadinène (14 %), de 1-epi-cubénol (12,5 %), de cubénol (10,5 %), de α-muurolol (4,8 %), de α-cadinol (3,6 %) et de α-humulène (3,2 %).

Les polyphénols totaux ont été extraits par sonication puis macération à partir de méthanol ou d'acétone à 80 %. L'intérêt de cette technique par ultrasons pour améliorer les rendements en polyphénols totaux a été démontré par Bourgou *et al.* (2016) et Boggia *et al.* (2016). Les résultats obtenus sont difficilement comparables à ceux disponibles dans la littérature car la structure et la proportion d'extractibles peuvent varier selon l'es-

pèce mais aussi selon la partie de l'arbre considérée (aubier ou duramen), l'âge de l'arbre, et les conditions environnementale et saisonnière (Chaouche *et al.*, 2013 ; Thévenon, 2015). La méthode d'extraction et le solvant utilisé influencent aussi la teneur en polyphénols (Bourgou *et al.*, 2016). Dans le cas présent, les différences observées entre les deux provenances étudiées concernent aussi bien les teneurs en polyphénols totaux (teneurs plus élevées pour les bois de Sidi Bel Abbès pour les deux solvants) que la nature de ces polyphénols (différences entre les deux solvants utilisés).

La durabilité naturelle du bois provenant de Sidi bel Abbès vis-à-vis de *R. placenta* (champignon causant la plus forte perte de masse chez les témoins en pin) est plus élevée que celle du bois provenant de Tiaret, avec une dispersion moindre des résultats obtenus. Cette différence pourrait être attribuée aux variations de la teneur et de la composition en extractibles entre les deux provenances, et notamment la différence de richesse en polyphénols, ces derniers intervenant par leurs propriétés anti-oxydantes dans la résistance vis-à-vis d'organismes xylophages (Schultz et Nicholas, 2000 ; Anouhe *et al.*, 2018). La question reste cependant posée quant à la nature des constituants chimiques concernés. Pollet *et al.* (2013) démontrent que la durabilité naturelle peut varier en fonction de l'espèce de champignon utilisée, de l'origine génétique de l'arbre et de la zone de croissance de l'arbre. Néanmoins, sur le pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica*), Boudouaya *et al.* (2015) ont montré que les pertes de masse du bois de deux arbres de même âge, de deux régions différentes du point de vue bioclimatique, ne présentent aucune différence significative pour le même type de bois.

En effet, une résistance élevée aux attaques de champignons lignivores peut être liée à la présence de substances antifongiques telles que les sesquiterpènes et les polyphénols totaux (Broda, 2020). Fidah *et al.* (2016) ont ainsi montré que le pouvoir antifongique de l'huile essentielle du bois de cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) pourrait être attribué à sa richesse en cétones sesquiterpéniques, composés volatiles, principalement les atlantones. De même, Mun et Prewitt (2011) ont constaté que la résistance du bois de cœur du genévrier de Virginie (*Juniperus virginiana*) à l'attaque des champignons est attribuée aux sesquiterpènes tels que le cédrol et le thujopsène.

Plusieurs auteurs ont aussi mis en évidence le rôle des extractibles phénoliques dans la durabilité naturelle du bois. Boizot et Charpentier (2006) ont montré que l'accumulation de polyphénols solubles dans le bois, et plus particulièrement dans le duramen, explique son niveau de durabilité naturelle. Aloui *et al.* (2004) et Niamké *et al.* (2011) ont démontré que la présence des polyphénols totaux est positivement corrélée à la durabilité naturelle du bois vis-à-vis des champignons lignivores pour deux espèces de chêne (*Q. robur* et *Q. petraea*) et pour le teck (*Tectona grandis*). En outre, Fidah (2016) a attribué la supériorité de l'activité antifongique des huiles essentielles de la loupe de thuya (*Tetraclinis articulata*) à la synergie d'effets du thymol ou de 3-tert-butyl-4-méthoxyphénol avec certains terpénoïdes. De même, Schultz *et al.* (1995) ont constaté que la durabilité naturelle très élevée du duramen du mûrier rouge (*Morus rubra*) et du robinier faux-acacia (*Robinia pseudoacacia*) n'est pas due à un constituant unique mais à l'action combinée (synergie) de plusieurs composés.

Les essais de résistance aux termites ne montrent qu'aucune des deux provenances n'est sensible aux attaques de l'espèce *Reticulitermes flavipes*, et que le bois présente un caractère répulsif. Cette résistance est généralement attribuée à la présence dans le bois de certains des composés chimiques comme les sesquiterpènes et sesquiterpénoïdes qui sont particulièrement abondants dans le bois de l'espèce étudiée. Angelier (2008) indique ainsi que les sesquiterpènes contenus dans le bois de teck ou de cyprès (*Cupressus sempervirens*) éloignent les termites. De même, les travaux de Sharma *et al.* (1994) ont montré que les terpénoïdes présentent des propriétés toxiques et répulsives contre l'espèce de termites *Odontotermes brunneus*.

Conclusion

L'étude conduite sur le bois de *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* a porté sur des spécimens issus de deux provenances algériennes associées à des conditions écologiques différentes, dans la région de Sidi Bel Abbès d'une part et de Tiaret d'autre part.

Les taux d'extractibles du bois (1,35 % et 1,19 % extraction à l'eau ; 14,17 % et 9,84 % extraction au toluène/éthanol ; pour les provenances Sidi Bel Abbès et Tiaret respectivement) ont été comparés pour les deux provenances et leur composition chimique a été analysée. La durabilité naturelle du duramen a été évaluée vis-à-vis de deux espèces de champignons de pourriture brune (*R. placenta* et *C. puteana*) et d'une espèce de termites (*Reticulitermes flavipes*).

Les bois de la provenance Sidi Bel Abbès présentent un taux d'extractibles plus élevé que ceux de la provenance Tiaret, en relation avec des conditions de croissance plus favorables. La caractérisation des extractibles a montré la richesse du duramen en sesquiterpènes et sesquiterpénoïdes. Malgré les différences marquées de nature des molécules et leur variation quantitative en fonction de la provenance des bois, les tests de durabilité naturelle ont montré que le bois de cette espèce est très durable vis-à-vis des champignons de pourriture cubique et résistant aux attaques de termites de l'espèce *Reticulitermes flavipes*.

La durabilité naturelle du bois vis-à-vis de ces agents biologiques de détérioration est liée à la teneur et à la nature des substances que constituent les extractibles et les polyphénols totaux identifiés et analysés dans les bois.

Pour l'espèce étudiée, une analyse ciblée des relations entre la composition chimique du bois et sa durabilité naturelle permettra de déterminer la nature du constituant ou des constituants combinés qui confèrent cette durabilité naturelle au bois, tant vis-à-vis des champignons lignivores que des termites.

L'huile de cade et les huiles essentielles de *J. oxycedrus* sont bien connues et largement utilisées dans la pharmacopée et à diverses fins thérapeutiques. En revanche, une connaissance plus approfondie des composants à l'origine

de la durabilité du bois de *J. oxycedrus* pourrait permettre de mettre en exergue des molécules d'intérêt valorisables pour des applications à forte valeur ajoutée, notamment à vocation cosmétique ou médicinale.

Cependant, le développement de ce type d'application ne peut être envisagé sans la mise en place puis l'exploitation de plantations de cette espèce. En effet, les peuplements naturels fragilisés par le phénomène de désertification et par la pression anthropique doivent être protégés et ne peuvent en aucune façon faire l'objet d'une exploitation, même à une échelle modérée.

Remerciements
Nous tenons à remercier tous les participants à la réalisation de cette étude tant en Algérie qu'en France, chercheurs, ingénieurs, techniciens et forestiers de terrain. Nous remercions aussi le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique d'Algérie, l'Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbès et le Cirad-Montpellier pour le soutien scientifique, technique et financier de ces travaux.

Références

Abdellah F., Laid B., Hammoudi S. M., Benaraba R., 2018. In vitro evaluation of the antimicrobial and antioxidant activities of *Juniperus oxycedrus* essential oil (cade oil). International Journal of Innovation Engineering and Science Research, 2 (6): 66-76. http://www.ijiesr.com/liebrary/e17/9114261004.pdf

Achir M., Hellal B., 2016. Réflexions sur les variations pluviométriques de la région de Tiaret (Algérie occidentale) durant la période 1984-2015. European Scientific Journal, 11 : 498-508. http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n11p498

Al-Snafi A. E., 2018. Pharmacological and therapeutic effects of *Juniperus oxycedrus* – A review. Indo American Journal of Pharmaceutical Sciences, 5 (4): 2198-2205. http://doi.org/10.5281/zenodo.1214996

Aloui F., Ayadi N., Charrier F., Charrier B., 2004. Durability of European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) against white rot fungi (*Coriolus versicolor*): relations with phenol extractives. Holz als Roh- und Werkstoff, 62: 286-290. https://doi.org/10.1007/s00107-004-0489-7

Angelier E., 2008. Les sciences de la complexité et le vivant. Paris, France, Éditions Lavoisier Tec & Doc, 204 p.

Anouhe J. B. S., Niamké F. B., Faustin, M., Virieux D., Pirat J. L., Adima A. A., *et al.*, 2018. The role of extractives in the natural durability of the heartwood of *Dicorynia guianensis* Amsh: new insights in antioxydant and antifungal properties. Annals of Forest Science, 75: 15. https://doi.org/10.1007/s13595-018-0691-0

Aubert G., 1978. Méthodes d'analyses des sols. Marseille, France, Centre régional de documentation pédagogique, 191 p.

Balaban M., Atik C., Uçar G., 2003. Fungal growth inhibition by wood extracts from *Juniperus foetidissima* and *J. oxycedrus*. Holz als Roh- und Werkstoff, 61: 231-232. https://doi.org/10.1007/s00107-003-0377-6

Bedounguindzi W. F., Candelier K., Edou Engonga P., Dumarçay S., Thévenon M.-F., Gérardin P., 2020. Anti-termite and anti-fungal bio-sourced wood preservation ingredients from *Dacryodes edulis* (G. Don) H.J. Lam resin. Holzforschung, 74 (8). https://doi.org/10.1515/hf-2019-0106

Bennabi F., Hamel L., Bachir Bouiadjra S. E., Ghomari S., 2012. Ressources hydriques sous tension et enjeux de développement durable dans la wilaya de Sidi Bel Abbes (Algérie occidentale). Méditerranée, 118 (Dynamique et gestion des cours d'eau méditerranéens et de leurs marges) : 105-111. https://doi.org/10.4000/mediterranee.6330

Boggia R., Turrini F., Villa C., Lacapra C., Zunin P., Parodi B., 2016. Green Extraction from Pomegranate Marcs for the Production of Functional Foods and Cosmetics. Pharmaceuticals, 9 (4): 63. https://doi.org/10.3390/ph9040063

Boizot N., Charpentier J.-P., 2006. Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier. Cahier des Techniques de l'INRA, 2006 : 79-82. https://hal.inrae.fr/hal-02669118/document

Bopenga C., 2020. Valorisations potentielles des substances extractibles et étude de la composition chimique en relation avec la durabilité naturelle du Noisetier du Gabon : *Coula edulis* Baill. Doctorat en sciences et technologies industrielles, spécialité sciences du bois, Université de Lorraine, France, 209 p. https://www.theses.fr/2020LORR0075

Boudouaya M., Benhassaini H., Bendimered F. Z., Mothe F., Fournier M., 2015. Évaluation de la durabilité naturelle du bois de *Pistacia atlantica* Desf. du nord de l'Algérie. Bois et Forêts des Tropiques, 325 (3) : 49-58. https://doi.org/10.19182/bft2015.325.a31272

Bourgou S., Serairi Beji R., Medini F., Ksouri R., 2016. Effet du solvant et de la méthode d'extraction sur la teneur en composés phénoliques et les potentialités antioxydantes d'*Euphorbia helioscopia*. Journal of New Sciences, 28 (12): 1649-1655. https://www.jnsciences.org/component/content/article.html?id=159:effet-du-solvant-et-de-la-methode-d-extraction-sur-la-teneur-en-composes-phenoliques-et-les-potentialites-antioxydantes-d-euphorbia-helioscopia

Broda M., 2020. Natural Compounds for Wood Protection against Fungi – A Review. Molecules, 25: 3538. https://doi.org/10.3390/molecules25153538

Chaouche T. M., Haddouchi F., Atik-Bekara F., Ksouri R., Azzi R., Boucherit Z., *et al.*, 2015. Antioxidant, haemolytic activities and HPLC-DAD-ESI-MS^n characterization of phenolic compounds from root bark of *Juniperus oxycedrus* subsp *oxycedrus*. Industrial Crops and Products, 64: 182-187. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.10.051

Chaouche T. M., Haddouchi F., Ksouri R., Medini F., Atik-Bekara f., 2013. *In vitro* evaluation of antioxidant activity of the hydro-methanolic extracts of *Juniperus oxycedrus* subsp *oxycedrus*. Phytotherapie, 11: 244-249. https://doi.org/10.1007/s10298-013-0779-5

Dob T., Dahmane D., Chelghoum C., 2006. Essential oil composition of *Juniperus oxycedrus* growing in Algeria. Pharmaceutical Biology, 44 (1): 1-6. https://doi.org/10.1080/13880200500530922

Dulbecco P., Luro D., 2001. L'essentiel sur le bois. Paris, France, CTBA, 184 p.

EN 117, 2013. Wood preservatives – Determination of toxic values against *Reticulitermes* species (European termites) (laboratory method). Brussels, Belgium, European Committee for Standardization, 22 p. https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/275e8dea-9fd6-4a40-9ed4-3180e9920b18/en-117-2012

EN 350, 2016. Durability of wood and wood-based products – testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials. Brussels, Belgium, European Committee for Standardization. https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/b02d18a7-87ce-4a20-84c7-c0de641a2780/en-350-2016

Fidah A., 2016. Étude de la durabilité naturelle des bois de *Cedrus atlantica* (Manetti) et de *Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast. et évaluation de la bioactivité de leurs huiles essentielles sur les champignons basidiomycètes lignivores. Thèse de doctorat, Université Mohammed V, Rabat, Maroc, 147 p. https://thesesenafrique.imist.ma/handle/123456789/1805?show=full

Fidah A., Salhi N., Rahouti M., Kabouchi B., Ziani M., Aberchane M., *et al.*, 2016. Natural durability of *Cedrus atlantica* wood related to the bioactivity of its essential oil against wood decaying fungi. Maderas. Ciencia y Tecnología, 18 (4): 567-576. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000049

Fouquet D., 2009. Durabilité naturelle et préservation des bois tropicaux. Versailles, France, Éditions Quæ, 127 p.

Hafsi Z., Belhadj S., Derridj A., Mevy J.-P., Notonnier R., Tonetto A., *et al.*, 2017. Étude de la variabilité morphologique (aiguilles, galbules) du complexe spécifique *Juniperus oxycedrus* L., le genévrier oxycèdre, au sein de sept populations d'Algérie. Revue d'Écologie (La Terre et la Vie), 72 (4) : 353-373. http://hdl.handle.net/2042/62680

Hayta S., Bagci E., 2014. Essential oil constituents of the leaves, bark and cones of *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* L. from Turkey. Acta Botanica Gallica, 161 (2): 201-207. https://doi.org/10.1080/12538078.2014.921642

Julin M., 2008. Tar production – Traditional medicine and potential threat to biodiversity in the Marrakesh region – An ethnobotanical study. Committee of Tropical Ecology, Uppsala University, Sweden, Minor Field Study 133, 49 p. http://files.webb.uu.se/uploader/858/MFS-133julin-madeleine.pdf

Klimko M., Boratyńska K., Montserrat J. M., Didukh Y., Romo A., Gómez D., *et al.*, 2007. Morphological variation of *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* (Cupressaceae) in the Mediterranean region. Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 202 (2): 133-147. https://doi.org/10.1016/j.flora.2006.03.006

Loizzo M. R., Tundis R., Conforti F., Saab A. M., Statti G. A., Menichini F., 2007. Comparative chemical composition, antioxidant and hypoglycaemic activities of *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* L. berry and wood oils from Lebanon. Food Chemistry, 105: 572-578. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.04.015

Marongiu B., Porcedda S., Caredda S., De Gioannis B., Vargiu L., La Colla P., 2003. Extraction of *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* essential oil by supercritical carbon dioxide: Influence of some process parameters and biological activity. Flavour and Fragrance Journal, 18: 390-397. https://doi.org/10.1002/ffj.1224

Medini H., Manongiu B., Neffati A., Chekir-Ghedira L., Harzalla-Skhiri F., Khouja M. L., 2013. Chemical and anti-bacterial polymorphism of *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* and *Juniperus oxycedrus* subsp. *macrocarpa* (Cupressaceae) leaf essential oils from Tunisia. Journal of Chemistry, 2013: ID 389252. http://dx.doi.org/10.1155/2013/389252

Mun S. P., Prewitt L., 2011. Antifungal activity of organic extracts from *Juniperus virginiana* heartwood against wood decay fungi. Forest Products Journal, 61 (6): 443-449. https://doi.org/10.13073/0015-7473-61.6.443

Niamké F. B., Amusant N., Charpentier J.-P., Chaix G., Baissac Y., Boutahar N., *et al.*, 2011. Relationships between biochemical attributes (non-structural carbohydrates and phenolics) and natural durability against fungi in dry teak wood (*Tectona grandis* L. f.). Annals of Forest Science, 68: 201-211. https://doi.org/10.1007/s13595-011-0021-2

Pollet C., Verheyen C., Hébert J., Jourez B., 2013. Le bois de Robinier faux-acacia : propriétés physiques, mécaniques et de durabilité naturelle. Forêt Wallonne, 126 : 3-16. http://hdl.handle.net/2268/157677

Quézel P., Gast M., 1998. Genévrier. Encyclopédie berbère, Gauda-Girrei, Aix-en-Provence, Edisud, 20-1998 (20) : 3016-3023. https://doi.org/10.4000/encyclopedieberbere.1863

Rowell R. M., Pettersen R., Han J. S., Rowell J. S., Tshabalala M. A., 2005. Cell wall chemistry. *In*: Rowell R. M. (ed.). Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 35-72. https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/22043

Schultz T. P., Harms W. B., Fisher T. H., Mc Murtrey K. D., Minn J., Nicholas D. D., 1995. Durability of Angiosperm Heartwood: The Importance of Extractives. Holzforschung, 49 (1): 29-34. https://doi.org/10.1515/hfsg.1995.49.1.29

Sharma R. N., Tungikar V. B., Pawar P. V., Vartak P. H., 1994. Vapour toxicity and repellency of some oils and terpenoids to the termite, *Odontotermes brunneus*. International Journal of Tropical Insect Science, 15: 495-498. https://doi.org/10.1017/S1742758400015861

Schultz T. P., Nicholas D. D., 2000. Natural durable heartwood: evidence for a proposed dual defensive function of the extractives. Phytochemistry, 54 (1): 47-52. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(99)00622-6

Singleton V. L., Rossi J. A., 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture, 16: 144-158. http://www.ajevonline.org/content/16/3/144

Taylor A. M., Gartner B. L., Morrell J. J., Tsunoda K., 2006. Effects of heartwood extractive fractions of *Thuja plicata* and *Chamaecyparis nootkatensis* on wood degradation by termites or fungi. Journal of Wood Science, 52: 147-153. https://doi.org/10.1007/s10086-005-0743-6

Thévenon M.-F., 2015. Chimie du bois. *In* : Mémento du forestier tropical. Versailles, France, Éditions Quæ, 868-872.

Uçar G., Balaban M., 2002. The composition of volatile extractives from the wood of *Juniperus excelsa*, *Juniperus foetidissima* and *Juniperus oxycedrus*. Holz als Roh- und Werkstoff, 60: 356-362. https://doi.org/10.1007/s00107-002-0316-y

XP CEN/TS 15083-1, 2006. Durability of wood and wood-based products. Determination of the natural durability of solid wood against wood destroying fungi. Test methods. Part 1: Basidiomycetes. Brussels, Belgium, European Committee for Standardization, 24 p. https://standards.globalspec.com/std/276633/cen-ts-15083-1

Ouaar *et al.* – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	D. Ouaar, A. Megherbi Benali, F. Toumi Benali
Gestion des données	D. Ouaar
Analyse formelle	D. Ouaar, M.-F. Thévenon, K. Candelier
Acquisition du financement	A. Megherbi Benali, F. Toumi Benali, J. Gérard
Enquête et investigation	D. Ouaar, A. Megherbi Benali, F. Toumi Benali, M.-F. Thévenon, K. Candelier, L. Pignolet
Méthodologie	D. Ouaar, M.-F. Thévenon, K. Candelier, J. Gérard
Gestion de projet	A. Megherbi Benali, F. Toumi Benali, J. Gérard
Ressources	D. Ouaar, M.-F. Thévenon, K. Candelier, L. Pignolet
Supervision	A. Megherbi Benali, F. Toumi Benali, M.-F. Thévenon, K. Candelier, J. Gérard
Validation	M.-F. Thévenon, K. Candelier, L. Pignolet
Visualisation	D. Ouaar
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	D. Ouaar, A. Megherbi Benali, F. Toumi Benali
Écriture – Révision et édition	D. Ouaar, M.-F. Thévenon, K. Candelier, J. Gérard

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad

Cirad - Campus international de Baillarguet, 34398 Montpellier Cedex 5, France - Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X