

N° d'ordre : 2638

# THÈSE

présentée à

**L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I**

ÉCOLE DOCTORALE DE SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

par **Adzo Dzifa KOKUTSE**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR**

SPÉCIALITÉ : **Sciences du Bois**

\*\*\*\*\*

**Analyse de la qualité du bois de teck (*Tectona grandis* L.f) en plantation au Togo : formation du bois de cœur, propriétés mécaniques et durabilité.**

\*\*\*\*\*

Soutenue le : 18 Décembre 2002

Après avis de :

**MM.**

Pr. M. FOURNIER

**Rapporteurs**

Dr.B.CHARRIER

Devant la commission d'examen formée de :

**MM.**

Pr. C. JAY-ALLEMAND

**Président**

Dr.B. CHARRIER

**Rapporteur**

Pr. P.MORLIER

**Examineurs**

Pr. M. FOURNIER

Dr. H. BAILLERES

Dr. A. STOKES



## REMERCIEMENTS

Ce mémoire est l'aboutissement de trois années de recherches très riches en connaissances et en rencontres. J'ai pu découvrir un vrai travail en équipe dans les laboratoires qui m'ont accueillie. Aussi je tiens à remercier le Professeur Pierre Morlier de m'avoir accueillie dans son laboratoire et d'avoir honoré ce travail par sa qualité de directeur de thèse. J'exprime aussi toute ma gratitude et ma reconnaissance à Alexia Stokes, codirecteur de cette thèse pour avoir cru en moi tout le long de ce "parcours de thésard" et m'avoir suivie lors des travaux de terrain dans les plantations au Togo. Je n'oublierai jamais cette phase essentielle de cette étude même si pour elle, le "*tour du Togo*" n'a pas toujours laissé de bons souvenirs.....

Il y a des rencontres qui marquent la vie de toute personne et dans mon cas particulier, je n'aurai sans doute jamais connu le Laboratoire de Rhéologie de Bois de Bordeaux sans le Professeur Daniel Guitard. Je le remercie vivement.

L'essentiel des travaux a été réalisé dans les laboratoires du *Programme Bois* du Cirad-Forêt à Montpellier. Je tiens à remercier sincèrement Henri Baillères pour m'avoir introduite dans ces laboratoires et pour avoir dirigé une grande partie de ce travail. Les nombreuses discussions que j'ai eues avec lui ont beaucoup servi à exploiter les résultats de cette étude. Je ne saurais oublier l'aide pour ne pas dire l'assistance de Christine Baudassé, Alba Zaremski, Marie-France Thévenon, Daniel Fouquet, Gilles Calchera et Anne Thibaut lors des essais de *durabilité naturelle*, de *physiques et mécaniques* et de *colorimétrie*. Merci également à Sylvain Lotte et Claude Daigremont de la scierie du Cirad pour leur savoir-faire lors des prélèvements d'échantillons.

Mes sincères remerciements au doyen de la Faculté des Sciences, Professeur Messanvi Gbeassor et au Professeur Koffi Akpagana pour leur soutien permanent durant cette période d'étude en France. En un moment où l'octroi des bourses d'étude à l'étranger n'était pas du tout évident, ils ont cru en moi, soutenu mon dossier jusqu'à son aboutissement et accueilli au Laboratoire de Botanique et d'Ecologie Végétale à l'Université de Lomé. Merci à MM. Batawila, Akpéné, Kaman, Atato et Aholou pour les moments inoubliables passés sur le terrain ou au laboratoire de Lomé.

Les prélèvements d'échantillons dans les teckeraies de l'Office de Développement et d'Exploitation des Forêts du Togo (ODEF) n'ont été possible que grâce au Directeur Koffi Agognon et à Ayih Atayi-Agbobly. Je leur exprime ma profonde gratitude. Je n'oublie pas non les aides précieuses de MM. Défli, Hounkpati, Djagba et Gbadoé.

Cette thèse n'aurait pas vu le jour si la Fondation Internationale pour la Science (IFS, Suède) et le Cirad-Forêt par l'intermédiaire de la bourse DESI, n'avaient pas accepté de m'attribuer les moyens financiers et scientifiques nécessaires au bon déroulement de mon travail.

Je n'oublie pas le Professeur Meriem Fournier et Bertrand Charrier pour avoir accepté de rapporter efficacement sur ce travail.

Au Laboratoire de Rhéologie de Bois de Bordeaux, je remercie vivement Patrick Castéra, Stéphane Berthier, Franck Salin, Thierry Fourcaud, Jean-Marc Sibaud et l'ensemble des thésards. Je n'oublie pas Fred Danjon de la Station de recherche de l'INRA (Pierroton) qui a toujours été disponible lors des analyses statistiques de mes résultats.

Il va de soit qu'une grande partie de mes remerciements va tout droit à ma famille et tout particulièrement à mes parents, et à mon frère Michel dont le soutien a été permanent. Merci à tous les amis de Bordeaux, Marie-France et Jean-Luc Andral, Isabelle Palais et de Montpellier Manolita Alonso, Pierre Couteron et Hélène Baldet.

Enfin Merci à deux personnes qui sont très chères à moi et qui ont toujours été à mes côtés aussi bien dans les moments difficiles comme de joie : *LINDA* et *KOKO*.

---

## ***SOMMAIRE***

---



<b>Introduction générale.....</b>	<b>6</b>
-----------------------------------	----------

## **Chapitre 1 - CADRE NATUREL DE L'ETUDE.....10**

1.1 – Situation géographique et subdivisions écologiques du Togo.....	11
1.2 - Eléments du climat : pluviométrie et température moyennes.....	13
1.2.1 – Généralités sur le climat du Togo.....	14
1.2.2 - Caractéristiques climatiques des zones écologiques.....	15
1.3 – Sols des teckeraies du Togo.....	15
1.4 - Ressources forestières au Togo.....	21
1.5 - Utilisation des produits forestiers.....	22

## **Chapitre 2 - ANALYSE DU POURCENTAGE DE BOIS DE CŒUR ET RELATION AUBIER–BIOMASSE FOLIAIRE.....25**

Introduction.....	26
2.1 - Matériels et Méthodes.....	32
2.1.1 - Pourcentage de bois de cœur.....	32
2.1.1.1 - Zone de prélèvement et matériel végétal.....	32
2.1.1.2 - Mesure du pourcentage de bois de cœur.....	32
2.1.2 - Mesure de la biomasse foliaire.....	34
2.2. - Résultats.....	35
2.2.1 - Pourcentage de Bois de cœur.....	35
2.2.2 - Relation biomasse foliaire et aire aubier.....	43
Discussion et conclusion .....	45

## **Chapitre 3 - ETUDE DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES : DENSITE ET MODULE D'ELASTICITE.....49**

Introduction.....	50
3.1 - Caractéristiques généraux du bois de teck.....	52
3.2 - Matériel végétal.....	53

3.3 – Mesure de la densité à 12% et du module d'élasticité longitudinal $E_L$ : Méthode.....	55
3.4 – Résultats.....	59
3.4.1 – Densité.....	59
3.4.1.1 – Valeurs moyennes par arbres – comparaison avec d'autres provenances de teck....	59
3.4.1.2 - Variabilité intra-arbre.....	61
3.4.1.3 - Variabilité inter-arbre : effet de l'âge de l'arbre.....	63
3.4.1.4 - Variabilité inter-arbre : effet de la zone écologique.....	64
3.4.2 – Le module d'élasticité longitudinal $E_L$ .....	65
3.4.2.1 – Valeurs moyennes par arbres – comparaison avec d'autres provenances de teck....	65
3.4.2.2 - Variabilité intra-arbre.....	66
3.4.2.3 - Variabilité inter-arbre : effet de la zone écologique.....	68
Conclusion.....	69

## **Chapitre 4 : DURABILITE NATURELLE DU BOIS DE TECK.....72**

Introduction.....	73
4.1– Agents de détérioration.....	74
4.2 – Classes de risques biologiques.....	77
4.3 – Classes de durabilité naturelle.....	78
4.4 – Rôle des substances macromoléculaires des parois cellulaires.....	80
4.5 – Rôle des extraits dans la durabilité naturelle du bois.....	81
4.6 - Matériel végétal.....	83
4.6.1 – Durabilité naturelle vis à vis des champignons.....	83
4.6.2 – Durabilité naturelle vis à vis des termites.....	86
4.7 – Méthodes.....	87
4.7.1 –Validité des résultats : test de virulence des souches utilisées.....	89
4.7.2 - Calcul d'incertitude maximale expérimentale sur les mesures de pertes de masse.....	90
4.7.3 - Estimation de la masse anhydre des éprouvettes avant l'essai.....	91
4.8 – Résultats.....	95
4.8.1 – Durabilité naturelle vis-à-vis des champignons.....	95
4.8.1.1 - Durabilité vis-à-vis de <i>Pycnoporus sanguineus</i> .....	95
4.8.1.2 - Durabilité vis-à-vis d' <i>Antrodia sp.</i> .....	98
4.8.1.3 - Durabilité vis-à-vis de <i>Gloephyllum trabeum</i> .....	100
4.8.1.4 - Durabilité vis-à-vis de <i>Coriolus versicolor</i> .....	102

4.8.2 – Durabilité naturelle vis-à-vis des termites.....	106
Discussion.....	108

**Chapitre 5 - COULEUR DU BOIS ET EVALUATION INDIRECTE DE LA DURABILITE NATURELLE.....112**

Introduction.....	113
5.1 – Matériel végétal.....	115
5.2 - Méthode.....	115
5.3. – Résultats.....	118
5.3.1 - Variabilité des paramètres de couleur selon l'âge du bois.....	118
5.3.2 - Variabilité des paramètres de couleur selon les faces mesurées.....	120
5.3.3 - Variabilité des paramètres de couleur selon la zone écologique et selon les parcelles.....	121
5.3.4 – Liaisons entre les paramètres de couleur et la perte de masse due à <i>Antrodia sp.</i> .....	122
5.3.5 – Liaisons entre les paramètres de couleur et la perte de masse due à <i>C. versicolor</i> .....	123
5.3.6 – Liaisons entre la densité du bois à 12% et la perte de masse.....	124
Conclusion .....	127

**Conclusion générale.....130**

**BIBLIOGRAPHIE.....134**

**ANNEXES**



---

***INTRODUCTION GENERALE***

---



La superficie des forêts du monde est estimée à 4 milliards d'hectares (FAO 2001). Près de 95% sont des forêts naturelles et 5% des plantations. Mais l'ampleur actuelle de la déforestation sous les tropiques et la dégradation des forêts dans plusieurs régions du monde compromet la disponibilité des produits forestiers. Alors que dans les pays développés, la superficie des forêts s'est stabilisée et serait plutôt en augmentation, la disparition des forêts continue dans les pays en voie de développement. La reconstitution de ces forêts passe par la conservation des écosystèmes les plus fragiles et par la valorisation des espèces forestières en plantation. Krishnapillay (2000) indique que ces plantations couvrent environ 187 millions d'hectares dont 68 millions en zone tropicale (62% se trouvent en Asie). Les Eucalyptus (*Eucalyptus* spp.), les Pins (*Pinus* spp.), les Acacias (*Acacia* spp.), et le Teck (*Tectona grandis*), représentent les principales espèces rencontrées dans ces plantations.

Parmi ces espèces, le Teck est sans conteste l'espèce ligneuse tropicale dont le bois est le plus apprécié et le plus utilisé au niveau mondial en raison de ses propriétés technologiques exceptionnelles. Verbenacée originaire d'Asie du sud, entre 10 et 25° de latitude nord, le Teck a été introduit en Afrique et en Amérique latine au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Il s'est particulièrement bien adapté aux régions à propriétés édaphiques et climatiques extrêmement contrastées de la zone intertropicale. Au Togo, les premières plantations datent des époques coloniales allemandes. Leur superficie n'a cessée de croître et est estimée à environ 11300 ha (FAO 2001). Ce sont des plantations étatiques, contractuelles ou privées dont l'aménagement rencontre actuellement d'énormes difficultés. Elles sont pour la plupart abandonnées et sont régulièrement parcourues par des feux (Behaghel 1999). Les densités à l'hectare sont souvent très élevées et affectent de façon sensible la croissance des arbres. Tout comme dans d'autres plantations de teck en Afrique de l'Ouest (Côte d'Ivoire, Ghana, Bénin), la provenance des premières semences n'est très bien connue ; elles seraient venues du Nigeria (Souvannavong 1986). Ce qui signifie qu'après un siècle de culture de teck au Togo, aucune étude n'est disponible sur la qualité du bois, les techniques sylviculturales appropriées, les facteurs écologiques voire l'économie de ce bois au Togo.

Utilisé de façon privilégiée dans la fabrication de ponts, de menuiseries extérieures et d'accastillage de bateau de plaisance, le bois de Teck est aussi recherché dans la fabrication de meubles de qualité, de produits d'ébénisterie et de parquets. La demande croissante et les politiques et législations forestières en vigueur dans les pays producteurs (Inde, Thaïlande, République du Lao), tendent à faire disparaître du marché international le Teck issu des

espaces naturels. Il est remplacé par le Teck de plantations de diverses provenances qui sont exploitées selon des rotations de plus en plus courtes. Cette situation engendre une variabilité considérable des qualités technologiques du bois de cœur qui se traduit en une problématique scientifique multidisciplinaire (physiologie, chimie, génétique, sylviculture, écologie, biologie...) que différents spécialistes tentent d'aborder de manière pragmatique. Cependant, force est de constater que sans une compréhension poussée du métabolisme secondaire de cette espèce, les études conduites actuellement restent descriptives et ne permettent pas d'élaborer des stratégies à long terme visant une amélioration significative des propriétés technologiques liées à la fabrication du bois de cœur.

Cette connaissance insuffisante des propriétés du bois de teck en plantation entraîne souvent des polémiques sur la qualité de ces nouveaux produits qui arrivent sur le marché international (Krishnapillay 2000). Qualifiées à tort ou à raison de "bois aux qualités technologiques médiocres" comparativement au Teck de forêt naturelle, les plantations de teck représentent aujourd'hui la meilleure opportunité de production tropicale de bois d'œuvre dans plusieurs pays africains (Bénin, Côte d'Ivoire, Nigeria, Tanzanie, Togo, etc). Le bois étant d'origine biologique, il est hétérogène à tous les niveaux de description (anatomique, chimique, mécanique...) et montre une variabilité extrêmement importante de ses propriétés (Klumpers 1994). Cette variabilité se rencontre aussi bien entre les espèces, entre les arbres d'une même espèce et à l'intérieur de l'individu. Elle est liée à divers facteurs tels les facteurs environnementaux (sol, climat, exposition à la lumière), génétiques, sylvicoles et leurs interactions. A partir des travaux menés sur la qualité du bois de Teck (Sallenave 1958 ; Durand 1984 et 1985 ; Sanwo 1986 ; Zobel 1989 ; Tewari 1992 ; Bhat 1995 et 1999 ; Tint et *al.* 1995 ; Sangkul 1995 ; Baillères et Durand 2000), il s'avère que :

- les caractéristiques technologiques d'intérêt sont effectivement affectées par la sylviculture, les conditions de sites et les interactions Génétique x Environnement ;
- les performances du bois de Teck de plantation ne sont pas nécessairement inférieures au teck de forêt naturelle.

Dans le cas particulier du Togo qui n'est pas un pays forestier (White 1986), le Teck constitue essentiellement la seule ressource forestière d'avenir. Cette espèce est indiscutablement la mieux placée en raison de sa croissance rapide et de sa résistance aux feux. Pour valoriser le bois de Teck en dehors de son aire d'origine comme c'est le cas au Togo, il paraît indispensable de parvenir à un classement de sa qualité par rapport au bois de teck sur le

marché international. Cette approche suppose qu'il faut connaître les facteurs de variation des propriétés du bois issus de ces plantations du Togo notamment la densité, la couleur et la durabilité du duramen. Les résultats d'une telle démarche serviront non seulement à améliorer les connaissances sur le Teck en plantation au Togo, mais aussi à l'amélioration génétique des arbres aux travers des sélections sur les individus présentant les meilleures aptitudes technologiques.

Ce travail qui a été (parler de la FIS et de l'ODEF, du Cirad)Le but de ce travail est premièrement d'analyser les facteurs de variabilité du taux de bois de cœur formé (bois de valeur) chez le Teck en plantation dans diverses zones écologiques du Togo ; deuxièmement de mesurer les propriétés mécaniques et physiques du bois de cœur ; troisièmement d'étudier sa durabilité vis-à-vis des attaques d'organismes lignivores et enfin d'améliorer les connaissances sur la couleur du teck en plantation.

Ce mémoire comprend cinq grandes parties :

**Le chapitre 1** fait un bref aperçu sur les situations géographiques et forestières du Togo. Les cinq zones écologiques constituant le cadre de ce travail, sont décrites par rapport au climat et au type de sol.

**Le chapitre 2** présente le pourcentage de bois de cœur dans les plantations de teck au Togo. L'état actuel des connaissances sur la formation du duramen est décrit à partir d'une analyse bibliographique. La distribution et les variations du taux de bois de cœur formé en fonction de l'âge de l'arbre sont présentées. L'effet des facteurs écologiques, notamment la pluviométrie et le type de sol sur la variation du pourcentage de bois de cœur formé est discuté. Une analyse sur les relations aubier-biomasse foliaire telles que décrites par la théorie du "*Pipe model*" (Shinozaki et al.1964) et les implications sylviculturales qui en découlent ont permis d'analyser les régimes d'éclaircies dans les teckeraies du Togo.

**Le chapitre 3** analyse les différences de propriété entre le bois juvénile et le bois adulte du teck à partir de l'étude de la variabilité de la densité et du module d'élasticité longitudinal à 12% d'humidité. Ces deux propriétés mécaniques et physiques du teck au Togo sont comparées entre arbre de différentes zones écologiques et à celles des tecks d'autres provenances.

**Le chapitre 4**, sur la base d'une synthèse bibliographique, présente les agents de détérioration du bois et les extractibles responsables de la durabilité naturelle. A partir des essais de durabilité réalisés selon les normes européennes EN350 et EN117 sur les éprouvettes de teck en plantation au Togo, une analyse sur les diverses sources de variabilité de cette propriété du bois est faite vis-à-vis de champignons et des termites de milieu tropical, puis face à des champignons des régions tempérées. A chaque fois, une classification de la durabilité du teck face à ces agents de détérioration est proposée.

**Le chapitre 5** s'intéresse à trois paramètres de couleur du teck et propose quelques méthodes d'évaluation indirecte de la durabilité naturelle en utilisant la couleur comme indicateur, puis en analysant les relations possibles entre la durabilité et les propriétés mécaniques et physiques préalablement mesurées.

***- CHAPITRE 1 -***

---

***CADRE NATUREL DE L'ETUDE***

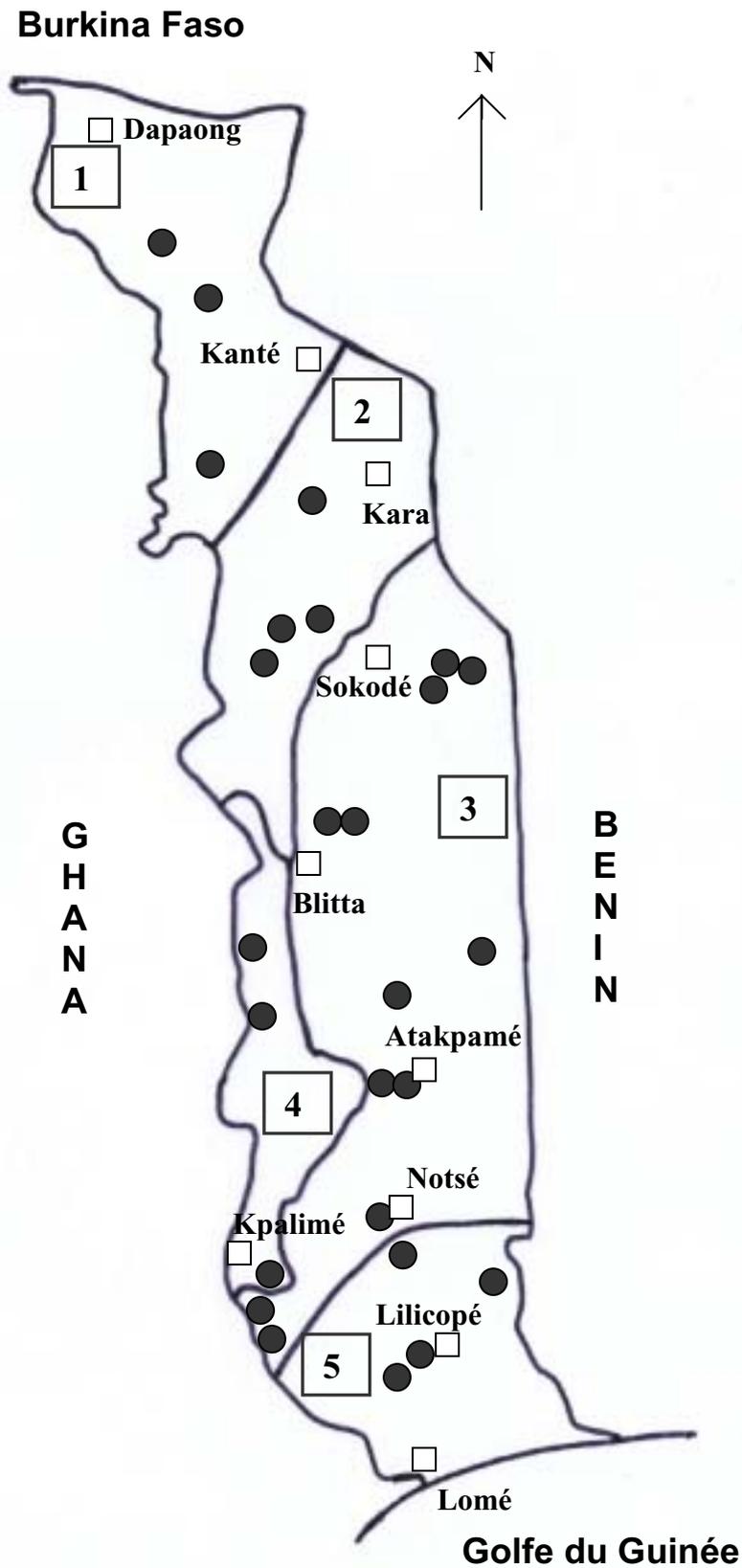
---



## 1.1 – Situation géographique et subdivisions écologiques du Togo

Le Togo est un pays de 56.600 km<sup>2</sup> situé entre 6 - 11° de latitude nord et à 1° à l'est du méridien de Greenwich (Fig.1.1). Il s'étend sur 600 Km, de la côte atlantique au sud jusqu'au Burkina Faso au nord. Large d'environ 100 Km en moyenne, ses frontières sont le Ghana à l'ouest et le Bénin à l'est. Cette géographie singulière du pays entraîne une hétérogénéité marquée des climats, des sols et de la végétation dans le sens nord-sud. Pour la prise en compte des diversités écologiques, floristiques et physiologiques, (Ern 1979) subdivise le pays en cinq zones écologiques :

- la partie septentrionale du pays correspond à la zone écologique 1. Elle est délimitée par une ligne oblique passant grossièrement au niveau de la ville de Kanté. C'est la zone des plaines du nord correspondant essentiellement aux savanes soudanaises (Ern 1979). Ces savanes sont régies par la pluviométrie en climat soudanais et par le régime des feux. Elles sont soit arborées soit arbustives avec une dominance des graminées annuelles ;
- la zone écologique 2 correspond à la partie nord des monts du Togo (c'est la chaîne de l'Atakora) qui prend le pays en écharpe. Sa limite sud est définie par une ligne passant légèrement au nord de Sokodé et de Blitta. C'est la zone de mosaïque de forêts denses sèches et de savanes ;
- au-dessous de cette ligne et à l'est de la chaîne de l'Atakora, se situe la zone écologique 3. Elle correspond aux grandes étendues plates du centre du Togo, dominée par quelques inselbergs (collines rocheuses s'élevant sous forme de dôme) avec des altitudes situées entre 200 et 400m. C'est le domaine des savanes boisées guinéennes (Aubréville 1937). Il s'agit de formations herbeuses comportant une strate herbacée continue d'au moins 80 cm de hauteur, parsemée d'arbres et arbustes sous forme de couvert clair (<http://www.fao.org>) ;
- la partie sud de la chaîne de l'Atakora constitue la zone écologique 4, avec des conditions climatiques favorables à l'installation des forêts. C'est le domaine des forêts denses humides et semi-caducifoliées (Akpagana 1989). Ce type de forêt est constitué d'un peuplement pluristrate culminant au maximum à 40 m. Les arbres de l'étage supérieur perdent partiellement ou inégalement leurs feuilles, le sous bois est soit sempervirent soit caducifolié et le tapis graminéen est discontinu (Kokou 1998) ;

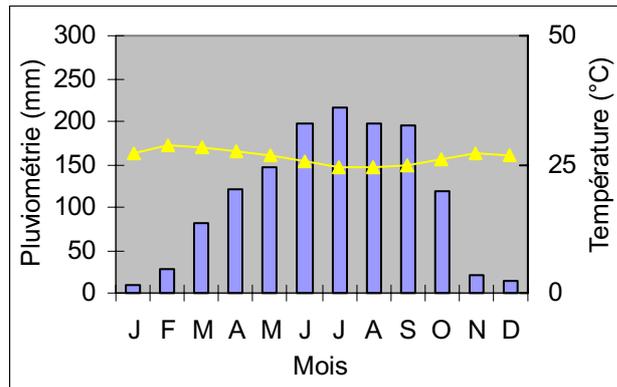


**Fig.1.1 : Subdivisions écologiques du Togo (a) et parcelles de teck échantillonnées (b)**

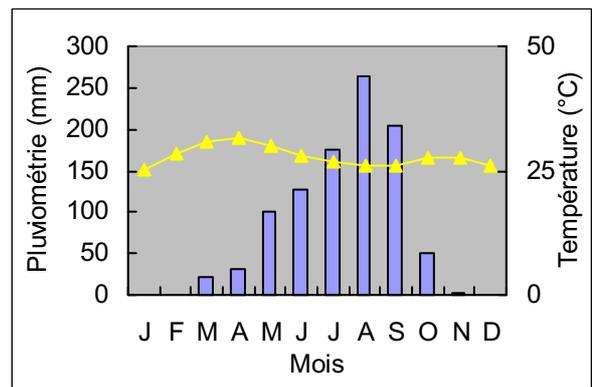
1 : zone des plaines du nord ; 2 : zone des montagnes du nord ; 3 : zone des plaines du centre ;  
 4 : zone méridionale des monts du Togo ; 5 : plaine côtière du sud du Togo.  
 ● teckeraies échantillonnées    □ villes.

- enfin, au sud de la ligne qui passe obliquement vers Glékopé et Notsé jusqu'à la frontière avec le Bénin, se situe la zone écologique 5. C'est la plaine côtière du Togo. Elle est définie comme une zone sèche littorale marquée par un déficit pluviométrique.

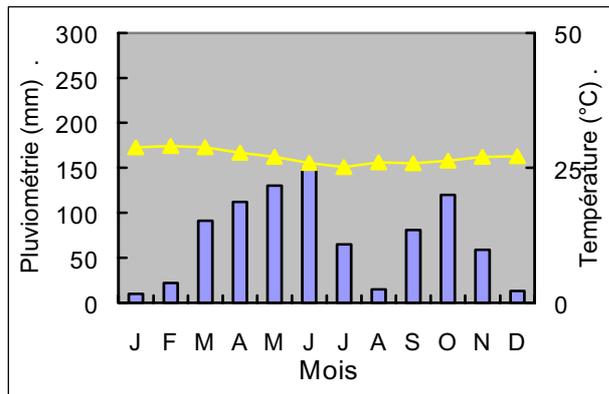
### 1.2 - Eléments du climat : pluviométrie et température moyennes



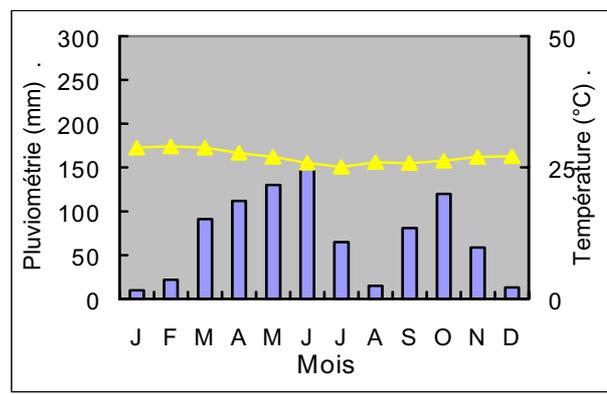
Atakpamé : 1981-1990 (Zone 3) (a)



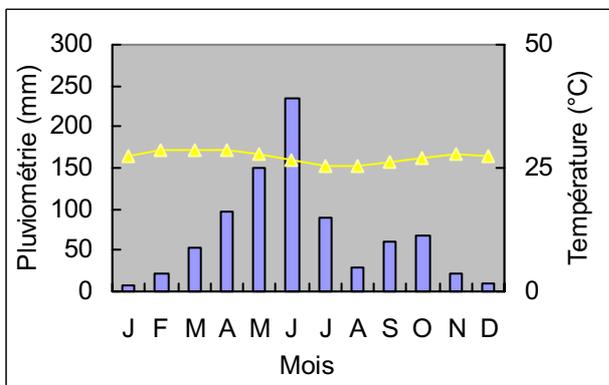
Mango 1961-1996 (Zone 2) (b)



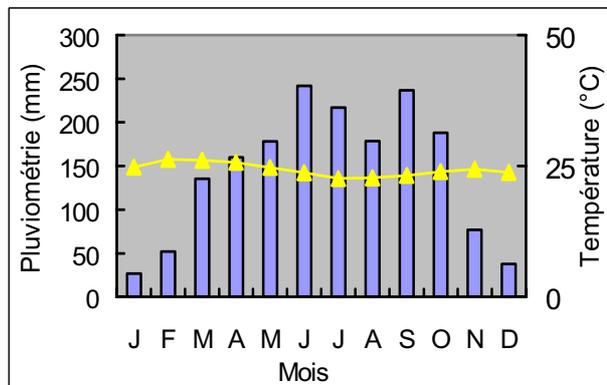
Dapaong 1981-1996 (Zone 1) (c)



Tabligbo 1974-1995 (Zone 5) (d)



Lomé 1974-1995 (Zone 5) (e)



Kouma-konda 1961-1996 (zone 4) (f)

**Fig.1.2 : Courbes de pluviométrie et de température pour différentes zones écologiques du Togo** (source : Station de la météorologie, Lomé) ▲ Température — Pluviométrie

## 1.2.1 – Généralités sur le climat du Togo

Le Togo appartient à la zone chaude plus ou moins humide des pays du littoral subéquatorial ouest-africain. Mais par son extension en latitude, la variété du climat dans le sens nord-sud est très marquée. Celui-ci est directement influencé par deux anticyclones :

- un saharien donnant naissance à un flux tropical continental sec et chaud de direction nord-est, l'Alizé continental boréal ou Harmattan ;
- un austral qui émet un flux d'air tropical maritime humide (Mousson) et chaud de direction sud-est.

L'installation de la Mousson correspond à la saison pluvieuse plus ou moins long du climat soudanien. L'installation de l'Harmattan correspond à la saison sèche. La zone de contact de ces deux types de masses d'air est appelée Front Intertropical (FIT). En fonction des gradients de pressions, ce FIT n'est pas stable au cours de l'année. En décembre-janvier, il se déplace vers le sud et l'Harmattan peut souffler sur l'ensemble du pays jusqu'à la côte. Ces mouvements atmosphériques suivent le déplacement apparent du soleil ; l'air sahélien se réchauffe, aspire l'air maritime chaud. Les deux masses d'air se déplacent alors vers le nord entraînant le FIT. La mousson envahit à son tour l'ensemble du pays. Ces mouvements de masses d'air confèrent au Togo deux types climatiques majeurs (Anonyme 1981) :

- le climat subéquatorial ou guinéen (au sud du pays) défini par 4 saisons (2 saisons sèches et 2 saisons de pluies). La saison de pluies dite grande, dure de mars à juillet (maximum en juin). La petite saison de pluies a lieu de septembre à novembre (maximum en octobre). L'amplitude thermique moyenne annuelle est très faible (3 à 4°). Les températures sont comprises entre 25° et 29°;
- le climat soudanien au nord du 8<sup>ème</sup> parallèle, caractérisé par une seule saison de pluies dont la durée est variable du centre du Togo vers le nord. L'amplitude thermique moyenne annuelle est légèrement plus marquée (4 à 6°) et les moyennes mensuelles peuvent être élevées (32°).

L'humidité relative est très variable d'une station à l'autre et d'une saison à l'autre. Dans le sud du Togo, elle est constamment élevée (plus de 80%). Dans le centre et le nord, elle est faible en saison sèche (18%) et très élevée en saison des pluies (80%).

## 1.2.2 - Caractéristiques climatiques des zones écologiques

La zone écologique 1 est caractérisée par un climat de type soudanien avec une saison des pluies de juin à octobre et une saison sèche de novembre à mai (soit six à sept mois écologiquement secs) (Fig.1.2c). Les températures varient entre 17 et 39°C en saison sèche et entre 22 et 34°C en saison des pluies. La zone 2 a un climat de type soudanien d'altitude (Batawila 2002). Il est caractérisé par une saison pluvieuse (avril-octobre) et une saison sèche (octobre-mars) marquée par l'Harmattan (Fig.1.2b). La température moyenne minimale est de 19-20°C en janvier alors que la maximale atteint 30°C en avril. La zone 3 (Fig.1.2a) a un climat tropical avec une longue saison de pluie. Les températures maximales se situent autour de 40°C et les minimales autour de 25°C. La zone écologiques 4 a un climat de type subéquatorial de transition (Trochain 1957), caractérisée par une grande saison pluvieuse de mars à octobre. Cette saison est marquée par une baisse de la pluviosité en août (Fig.1.2f). La saison sèche dure de 2 à 4 mois et se situe entre novembre et février (Guelly 1994). Cette région est une zone montagneuse et constitue avec la zone 3, les zones les plus arrosées du Togo. Les pluviométries sont de 1.300 à 1.600 mm de pluie par an, contrairement aux zones 1 et 2 où les précipitations annuelles sont en moyenne de 1.000 mm d'eau. La zone 5 est caractérisée par un climat de type subéquatorial ou guinéen à deux saisons de pluies (Kokou 1998). La grande saison des pluies dure de mars à juillet et la petite saison des pluies de septembre à novembre. En réalité, ce régime est subdivisé en deux sous climats (Aubréville 1949) : le sous climat subéquatorial côtier et le climat subéquatorial de transition. Cette zone est marquée par un déficit pluviométrique dû à la situation et à l'orientation de la côte qui est protégée du flux de la mousson. Par conséquent, Lomé (Fig.1.2e) est la station la moins arrosée du Togo (800 à 900 mm de pluies par an). Mais la pluviométrie augmente vers le nord (Fig.1.2d) et atteignent 1.200 mm par an à Notsé, limite nord de la zone 5.

## 1.3 – Sols des teckeraies du Togo

Au Togo, 8 grandes classes de sols sont décrites (Lamouroux 1969) mais trois seulement sont rencontrés dans les teckeraies (Tableau 1.1) :

**Les sols peu évolués** : ce groupe comprend les sols peu évolués d'érosion et les sols peu évolués d'apport. Ce type de sol se rencontre essentiellement dans les teckeraies de la zone 2. Ils sont associés aux sols minéraux bruts des régions montagneuses et résultent des phases d'érosion géologique (Faure et al. 1981). Ils ont une faible épaisseur et le plus souvent une

forte proportion d'éléments grossiers (cailloux, fragments de roche). Ce sont des sols peu profonds et leur potentialité agricole est très limitée (Lamouroux 1957).

***Les sols ferrugineux tropicaux*** : ces sols occupent la superficie la plus importante du Togo. Ils se rencontrent dans les plantations de teck de zones écologiques 1, 2, 3 et 5. Leurs caractéristiques sont très variées. Leur pédogenèse est marquée par une forte individualisation en sesquioxydes de fer répartis sur l'ensemble du profil ou accumulés dans l'un des horizons du sol. Ces oxydes de fer se manifestent sous forme de taches, de concrétions, de carapace ou de cuirasses. La valeur agronomique de ces sols dépend de l'importance du concrétionnement, de l'hydromorphie, de l'induration et de la profondeur à laquelle se manifestent ces processus (Faure et *al.* 1981). Selon le régime pluviométrique et le volume de sol exploitable par les racines, ces sols peuvent porter avec succès une gamme de cultures très variées. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés sur une grande profondeur (qu'on retrouve dans les teckeraies de la zone 1) sont des sols qui ont subi un appauvrissement en argile sur une forte épaisseur de leur profil et sont pauvres en réserve minérale (Lamouroux 1957). Leur texture, essentiellement sableuse ne permet pas d'assurer une bonne alimentation du Teck en saison sèche. En outre, ils sont souvent riches en éléments grossiers, ce qui limite encore plus le volume de terre exploitable par les racines.

***Les sols ferrallitiques*** : seules les plantations de la zone 4 sont cultivées sur ce type de sol. La pédogenèse des sols ferrallitiques est caractérisée par la prédominance des actions de dissolution d'hydrolyse et d'oxydation. Ces processus transforment complètement la roche mère et donnent de l'argile (kaolinite) à propriétés chimiques limitées et à forte proportion d'hydroxydes de fer et d'aluminium. Ces sols présentent un profil profond, relativement uniforme et sont de couleur rouge. D'une manière générale, ces sols associés au contexte climatique de la zone 4, possèdent les propriétés physiques les plus favorables aux cultures vivrières et industrielles (café, cacao, teck ...).

	Parcelle	Longitude Latitude	Age (année)	Densité (pieds/ha)	Diamètre moyen à 1,3 m (cm)	Hauteur moyenne (m)	Type de sol
<b>Zone 1</b>	Namon	0°43'159'' 9° 42'615''	13	1.700	12,9±2,1	7,4±2,7	Ferrugineux Texture sableuse
	Tandjoauré	0°13' 782'' 10°36' 851''	70	1.300	32,3±5,3	21,1±1,9	Ferrugineux Limoneux- gravillonnaire
<b>Zone 2</b>	Bassar	0°47'380 9°15'366''	67	800	41,9±9,4	36,8±1,2	Ferrugineux Limoneux-sableux
	Binaparba	0°46'013'' 9°13'484''	44	2.200	35,7±8,5	33,4±3,6	Ferrugineux Sablo-gravillonnaire
	Baghan	0°41'551'' 9°04'225''	48	2.000	32,5±10,3	37±6,7	Ferrugineux Sablo-limoneux
	Daco	1°11'179'' 6°11'621''	67	900	20,6±4,4	17,9±3,1	Sol peu évolué Sablo-gravillonnaire
	Daoudé	1°25'903'' 6°55'676''	67	1.000	27,1±8,9	19,3±3,2	Sol peu évolué Sablo-gravillonnaire

<b>Zone 3</b>	Avétonou	0°49'134'' 6°42'376''	12	2.500	11,3±4,2	8,4±1,8	Ferrugineux hydromorphe sablo- argileux
	Avétonou	0°48'017'' 6°45'388''	24	2.700	16,8±6,1	13,6±4,8	Ferrugineux hydromorphe sableux
	Avétonou	0°48'017'' 6°45'388''	36	1.825	26,1±7,5	20,5±4,2	Ferrugineux hydromorphe sablo- argileux
	Avétonou	0°47'976'' 6°48'205''	46	2.100	21,2±5,1	18,4±3,2	Ferrugineux Sableux
	Blitta	0°59'383'' 8°22'051''	06	1.600	11,8±2,1	11,8±1,5	Ferrugineux Sableux-limoneux
	Blitta	0°59'301'' 8°97'035''	14	2.368	17,9±2,3	14,6±1,8	Ferrugineux hydromorphe sableux limoneux
	Blitta	1°00'022'' 8°21'905''	25	2.320	26,8±3,8	22,1±1,4	Ferrugineux Limoneux-sableux
	Blitta	0°49'134'' 8°30'345''	39	2.000	21,4±4,1	16,7±2,3	Ferrugineux Limoneux-sableux
	Blitta	0°58'441'' 9°15'370''	44	2.000	20±5,5	17,6±5,5	Ferrugineux hydromorphe sablo- argileux
	Anié	1°11'504'' 7°46'416''	59	2.200	26,6±2,6	23,8±3,3	Ferrugineux Sablo-limoneux

<b>Zone 3</b>	Tchamba	1°24'572'' 9°06'236''	41	2.200	18,7±2,3	15,1±1,6	Ferrugineux Sableux
	Tchamba	1°29'022 8°59'934''	43	2.200	25,0±3,2	18,5±2,0	Ferrugineux Sableux-argileux
	Tchamba	1°28'925'' 8°59'796''	44	2.350	16,4±3,4	15,4±2,5	Ferrugineux Sableux- gravillonnaire
	Elavagnon	1°17'889'' 7°56'204''	41	2.236	22,6±3,4	21,6±2,1	Ferrugineux Sableux- gravillonnaire
	Atakpamé	1°07'624'' 7°32'743''	58	_____	26,6±2,6	23,8±3,3	Ferrugineux Sableux- gravillonnaire
	Xantho	1°02'551'' 6°58'962''	45	2.600	24,4±8,5	15,3±3,8	Ferrugineux Argileux-sableux

<b>Zone 4</b>	Agou		16	_____	21,6±3,4	16±1,4	Ferritique Limoneux-sableux
	Djitraré	0°47'796'' 7°43'057''	45	_____	29,2±3,7	20,3±6,4	Ferritique Limoneux-sableux
	Klabé- Efoukpa	0°44'449'' 7°36'249''	43	2.600	28,8±6,6	19,6±2,5	Ferritique Limoneux-sableux
<b>Zone 5</b>	Amakpavé	1°11'084'' 6°47'261''	44	2.600	23,7±6,8	20,5±2,5	Ferrugineux Sablo-argileuse
	Etô	1°06'640'' 6°32'236''	11	1.700	19,1±4,4	17,9±2,0	Ferrugineux Sablo-argileuse
	Lilicopé	1°09'911'' 6°34'719''	11	1.700	18,5±5,0	18,2±4,3	Ferrugineux Sablo-argileuse
	Lilicopé	1°10'238'' 6°34'506''	29	1.200	24,9±4,9	19,4±2,6	Ferrugineux Sablo-argileuse
	Tomety- kondji	1° 33'020'' 6°48'661''	32	2.600	31,3±3,5	27,5±2,2	Ferrugineux Sablo-argileuse

**Tableau 1.1 : Zones de prélèvement et caractéristiques des parcelles.** Les valeurs indiquées sont des moyennes calculées à partir des arbres comptés dans un carré de 25m de côté.

#### 1.4 - Ressources forestières au Togo

En terme d'occupation des terres, FAO (2001) estime la surface forestière totale du Togo à 510.115 ha soit 9% de la superficie totale du territoire, Tableau 1.2). Cette estimation concerne uniquement les formations forestières naturelles. Le taux de déforestation annuel moyen est d'environ 3%.

<b>Occupation du territoire</b>	<b>Superficie (ha)</b>
Superficie totale du pays	5.660.000
Superficie totale des forêts	510.115
Forêts denses semi-décidues	126.400
Forêts de montagne	52.500
Recrûs forestiers	61.500
Forêts denses sèches	31.500
Savanes arborées	604.800
Savanes arbustives et herbacées	272.000
Zone de cultures et autres	194.400

**Tableau 1.2 : Estimation des formations forestières du Togo (FAO 2001).**

Les surfaces érigées en aires protégées depuis la période coloniale sont demeurées pour la plupart non aménagées, à part quelques périmètres de reboisement où des plantations ont été réalisées. D'une façon générale, ces aires protégées sont actuellement envahies et occupées par les populations à des taux variables allant de 10 à 90%. L'ensemble des formations forestières de plantations est estimé à 130.400 ha (FAO 2001) y compris les plantations agricoles de cocotiers et de palmiers à huile, tous âges, toutes origines et toutes espèces confondues (Tableau 1.3). Cette superficie était estimée à 34734 ha à la fin de l'année 1996. L'Eucalyptus est quantitativement la plus plantée (Tableau 1.3) ; les plantations appartiennent aussi bien à l'Etat qu'aux privés. Elles sont utilisées essentiellement pour la production de bois énergie et de service.

<b>Espèces</b>	<b>Superficie (ha)</b>
<i>Eucalyptus spp.</i>	16.500
<i>Tectona grandis</i>	11.300
Autres feuillus	9.800
Cocotiers	2.200
Palmiers à huile	90.600
Total	130.400

**Tableau 1.3 : Superficie des plantations du Togo (FAO 2001).**

Parmi les espèces de bois d'œuvre, le Teck représente une superficie globale de 11300 ha. Il existe aussi des plantations et des régénérations naturelles installées sur des bandes étroites de terre en bordure des routes, dont la protection et l'aménagement sont rendus impossibles à cause des interventions délictueuses. Environ un tiers seulement des plantations est actuellement soumis à un plan d'aménagement.

L'industrie forestière ne connaît pas un développement important et seule une petite unité de sciage de l'ODEF permet d'exploiter du bois de petites et moyennes dimensions. Faute d'existence de statistiques forestières, la répartition des teckeraies du Togo par zone écologique n'est pas connue. La superficie des plantations par régions administratives a été établie par l'Organisation Internationale des Bois Tropicaux (OIBT 1995) mais les régions administratives au Togo ne correspondent pas aux zones écologiques.

### **1.5 - Utilisation des produits forestiers**

Thiam (1991) estime à 100 milliards FCFA soit environ 150 millions d'euros, la contribution annuelle du secteur forestier au PIB (soit 10%) si l'on prend en compte l'ensemble des filières d'exploitation (pharmacopée, éponges, cure-dents, fourrages, fruits et légumes sauvages). Ce secteur utilise près de 85.000 personnes (artisans, fournisseurs de bois de feu, etc) dans le secteur informel et environ 1.000 agents et techniciens forestiers dans la fonction publique. Environ 24.000 m<sup>3</sup> de bois d'œuvre et de service sont prélevés par an, soit l'équivalent à la moitié des besoins nationaux (FAO 2001).

Les statistiques sur l'utilisation du bois de teck au Togo sont inconnues. Une importante enquête réalisée pendant la période des travaux de terrain au Togo a pu fournir des données scientifiques aussi objectives que possible sur l'usage du teck. Elle s'est déroulée en un mois (15 juin au 15 juillet 2001) auprès des menuisiers et artisans de la ville de Lomé. Au total, 100 menuiseries tirées au sort dans 10 quartiers choisis au hasard ont été visitées. Il ressort que le bois de teck est très apprécié par le consommateur togolais puisque 95% des menuisiers interrogés affirment l'utiliser régulièrement. Le Teck est essentiellement demandé dans l'ameublement de luxe et dans la construction des bâtiments (charpente, plafonnage, accessoires de bâtiments). La sculpture reste un domaine non négligeable. Plus de 90% des artisans ont reconnu que le Teck est un bois de luxe et d'ameublement par excellence pour sa

couleur et pour la présence de figures dans le bois. D'autres raisons évoquées sont la conservation de la couleur des meubles dans le temps, l'adhésion du verni qui est facile et la résistance aux rongeurs et aux intempéries.

Par rapport à d'autres espèces forestières, la demande en bois de teck est très élevée mais les artisans évoquent certains défauts du bois liés à la présence de nœuds et de trous. En effet, pour des raisons de sylviculture déjà évoquées, le bois de teck issus des plantations togolaises présente souvent trop de nœuds. Ces nœuds sont souvent situés au centre de la bille dans le bois voisin du cœur ; le bois peut alors présenter le défaut de "cœur mou". Les propriétés physiques du bois sont énormément modifiées par la présence de ces nœuds qui font que le bois est très cassant, sans fibre et sans dureté (Sallenave 1964). La durabilité naturelle du bois de teck semble diminuer lorsque les arbres sont "vieux" (60-70 ans), de telle sorte que les insectes lignivores arriverait à percer l'aubier en y laissant des trous sur les arbres sur pied.

L'une des difficultés que connaît la filière «Teck» au Togo est le problème d'approvisionnement du marché local. La politique forestière de l'Etat fait de ce marché, une filière clandestine. Les menuisiers achètent fréquemment le bois de teck chez les exploitants privés. Ce sont des particuliers qui ont leur propre dépôt de bois. Ces dépôts sont alimentés par des filières clandestines de vente de Teck. Il existe des commerçants qui vont se ravitailler le plus souvent soit illégalement dans les plantations de l'Etat à l'intérieur du pays soit dans les pays limitrophes notamment le Ghana et le Bénin. Ce qui fait que les utilisateurs du bois de teck au Togo s'approvisionnent très peu auprès des dépôts de l'Office de Développement et d'Exploitation des Forêts (ODEF). Sur les 100 menuisiers interrogés, 25 seulement se font livrer directement le Teck par l'ODEF. Ce sont donc 75% des menuisiers qui s'approvisionnent sur le "marché noir". Selon les "enquêtés", on s'achemine vers une crise du bois de teck au Togo car l'ODEF préfère exporter le Teck sous forme de grumes que de le revendre sur le marché national sous forme de sciages. En effet, il existerait un trafic de grumes de teck qui quittent le port autonome de Lomé vers les pays asiatiques. L'exportation et la forte demande sur le marché local font du Teck un bois d'avenir pour le Togo, cependant il faudra mettre en place une bonne politique forestière. Sur le marché national, le Teck est vendu sous formes de planche, de chevron, de grume et de perches (Tableau 1.4). Les planches et les chevrons sont les plus utilisés dans l'ameublement tandis que les perches servent dans la construction des bâtiments.

Catégories	Dimensions			Prix moyen en FCFA et en euro		
	Épaisseur	Largeur	Longueur	1 <sup>er</sup> choix	2 <sup>ème</sup> choix	3 <sup>ème</sup> choix
Planche	3 cm	30 cm	2 m	3.700 (5,6 euros)	3.000 (4,6 euros)	2.400 (3,6 euros)
		25 cm	2 m	2.900 (4,4 euros)	2.200 (3,3 euros)	1.900 (2,9 euros)
		20 cm	2 m	2.200 (3,3 euros)	1.900 (2,9 euros)	1.600 (2,4 euros)
		16 cm	2 m	1.700 (2,5 euros)	1.400 (2,1 euros)	1.150 (1,7 euros)
	6 cm	30 cm	2 m	7.100 (10,8 euros)	6.200 (9,4 euros)	5.800 (8,8 euros)
		25 cm	2 m	5.800 (8,8 euros)	4.900 (7,5 euros)	4.700 (7,2 euros)
		20 cm	2 m	4.400 (6,71 euros)	3.900 (6,0 euros)	2.950 (4,5 euros)
		16 cm	2 m	3.200 (4,9 euros)	2.550 (3,9 euros)	2.150 (3,3 euros)
Chevron	8 cm	8 cm	2 m	2.050 (3,1 euros)	1.850 (2,8 euros)	1.600 (2,4 euros)
	10 cm	10 cm	2 m	2.700 (3,0 euros)	2.300 (3,5 euros)	1.950 (3,0 euros)

**Tableau 1.4 : Variation du prix de teck en fonction des dimensions et de la qualité du bois au Togo.**

1. Teck de 1<sup>er</sup> choix : bois ne renfermant que du cœur avec quelques traces d'aubier.
2. Teck de 2<sup>ème</sup> choix : bois de cœur avec une proportion importante d'aubier.
3. Teck de 3<sup>ème</sup> choix : bois généralement appelé déchet ; il renferme assez d'aubier, des nœuds, des trous d'insectes lignivores et des fissures.

Les grumes sont très peu utilisées par les menuisiers à cause du coût de revient de fabrication de planches à partir de ces grumes. Il n'existe pas une classification bien définie pour les grumes et les perches mais les prix moyens varient en fonction des dimensions du bois et du diamètre du duramen.

***- CHAPITRE 2 -***

---

***ANALYSE DU POURCENTAGE DE BOIS DE CŒUR ET  
RELATION AUBIER–BIOMASSE FOLIAIRE***

---



## **Introduction**

Les différents facteurs affectant la formation et le pourcentage du bois de cœur sont abordés dans ce chapitre. Il s'agit notamment de l'âge des arbres, de la vitesse de croissance à travers le diamètre des troncs et de la dynamique de croissance des houppiers. Le but étant de mieux comprendre le phénomène de duraminisation en terme de rentabilité dans les plantations de teck.

### ***Caractéristiques du bois de cœur***

Le duramen, encore appelé le bois parfait ou le bois de cœur, représente dans l'arbre les couches internes qui ne contiennent plus de cellules vivantes. Les matières de réserves comme l'amidon y ont disparu. Ne conduisant pas la sève, le bois de cœur est considéré comme du bois non fonctionnel. Par opposition au duramen, l'aubier correspond à la portion de bois renfermant les cellules vivantes et les matières de réserve. Ziegler (1968) distingue l'aubier conducteur assurant la conduction de la sève brute et l'aubier de stockage. Il existe aussi du bois intermédiaire représentant les couches les plus internes de l'aubier qui forment la transition entre ce dernier et le duramen (Klumpers 1994). La zone de transition a une épaisseur faible et est variable au cours d'un cycle de duraminisation (Bergström 2000). Cette zone apparaît comme le siège d'une intense activité enzymologique et chimique. Les substances de nature phénolique et réductrice, les peroxydases et les succinates y ont notamment été mises en évidence chez le Teck (Datta et al. 1987).

### ***Formation et propagation radiale***

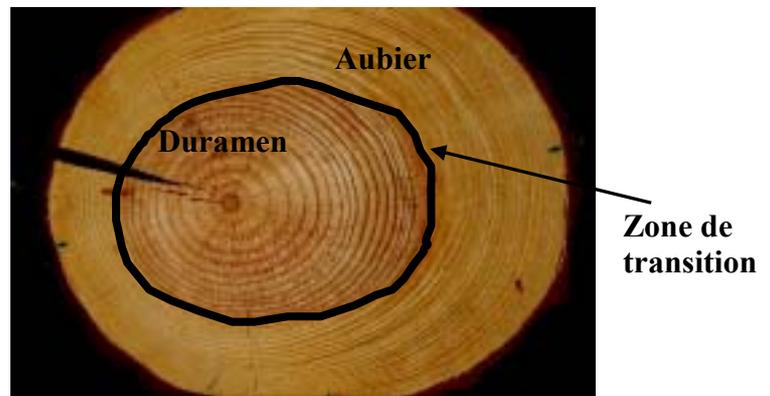
La formation du duramen est un aspect majeur de la qualité du bois. Elle améliore les propriétés mécaniques du bois, accroît sa durabilité et modifie sa couleur. Les processus conduisant à la formation et à l'extension du duramen n'ont jamais été réellement explicités jusqu'à présent. La duraminisation serait le résultat de changement biochimique et physiologique au niveau des cellules de parenchymes (Datta et al. 1987 ; Magel et al. 1994). L'extension de cette duraminisation, générée par des transformations biochimiques, semble être sous contrôle de facteurs environnementaux comme par exemple le vent (Berthier 2001) ou un stress mécanique (Stokes et Berthier 2000). Si le duramen est

souvent régulier, son contour épousant celui des cernes (Fig.2.3), la formation de duramen irrégulier est signalée chez de nombreuses espèces (Klumpers 1994 ; Timell 1986 ; Fig.2.1). Cette propagation radiale particulière a fait l'objet de nombreuses études (Kokutse 1999 ; Kokutse et al. 2000 ; Gachet 2000 ; Berthier et al. 2001 ; Stokes et Berthier 2000). Les différents travaux menés jusqu'alors chez des espèces comme le noyer (Beritognolo et al. 1999) ou le robinier (Magel et al. 1994) ont montré que la synthèse des polyphénols caractéristiques du duramen, était régulée, à l'échelle cellulaire, par l'expression de certains gènes qui codent des enzymes impliquées dans la synthèse de ces polyphénols. Il n'est pas exclu que des mouvements internes d'eau (aussi bien à l'échelle cellulaire qu'à l'échelle de l'arbre) ou de sucres puissent jouer dans la formation du duramen (Nobuchi et al. 1982 ; Gachet 2000). Le processus se déclenche à un âge qui dépend très fortement de l'espèce, 6-8 ans chez *Cryptomeria japonica* (Hillis 1987), 35 ans chez *Pinus canariensis* (Climent et al. 1998), jusqu'à plus de 100 ans chez *Alstonia scholaris* par exemple (Hillis 1987). Chez le Teck en plantation au Togo, le début de duraminisation s'observe entre 6 et 8 ans selon les sites.

Deux hypothèses sont généralement formulées pour expliquer le passage de l'aubier au duramen. D'après certains auteurs (Frey-Wysseling et Bosshard 1959 ; Bosshard 1965 ; Ziegler 1968), la duraminisation serait le résultat d'un vieillissement physiologique de l'arbre. Ce vieillissement serait dû à la mort des cellules de parenchymes. La disparition progressive de l'amidon, la désintégration progressive des nucléi, la réduction de l'activité mitochondriale, la réduction de l'activité respiratoire et la diminution de la teneur en ARN (acide ribonucléique) sont autant de phénomènes qui témoignent de cela. Une autre hypothèse est adoptée selon laquelle le passage de l'aubier au duramen est activement contrôlé par l'arbre et par conséquent, la mort des cellules de parenchymes serait le résultat de la duraminisation et non la cause. Des observations faites au niveau de la zone de transition, c'est-à-dire, située entre l'aubier et le duramen révèlent une augmentation de l'activité physiologique : maxima de volume des nucléi, activité enzymatique accrue (Loehle 1988 ; Bamber 1976). Hillis (1987) évoque le rôle éventuel de l'éthylène comme étant le déclencheur de la synthèse de polyphénols caractéristiques du duramen. L'éthylène est connu comme étant une réponse de l'arbre à des sollicitations mécaniques (Telewski 1990). Il interviendrait de manière directe ou indirecte dans la propagation radiale du duramen (Gachet 2000). On constate par ailleurs que la duraminisation s'accompagne d'un

dépôt de diverses substances phénoliques en surface et en périphérie des parois cellulaires (Chanson 1992 ; Hillis 1997).

Ces composés phénoliques donnent au bois une couleur caractéristiques et sont à l'origine de la durabilité naturelle du bois de cœur vis-à-vis des êtres lignivores (Bergström 2000 ; Dumonceaud 2001). La durabilité naturelle du bois de teck, reconnue depuis des siècles est attribuée à la présence de deux substances, la naphthoquinone et l'antraquinone (Pahup et al. 1989). Ces composés ne font pas partie de la structure même des parois cellulaires mais sont déposés pendant la duraminisation.



**Fig.2.1 : Rondelle de *Pinus pinaster* Ait montrant le duramen irrégulier, plus développé d'un côté que de l'autre.**

Si le duramen du teck présente une très bonne durabilité contre les pourritures et les termites (Yamamoto et al. 2000), il n'en est pas de même pour l'aubier. Plusieurs utilisations du bois de teck telles que la fabrication de parquets et des panneaux d'ébénisterie nécessitent l'élimination complète de l'aubier. Les sciages de teck ne concernent que le bois de cœur. L'une des caractéristiques désirée par les utilisateurs est donc le maximum de bois de cœur avec un minimum d'aubier. Chez le Teck, le pourcentage aubier/duramen est un facteur économique très important de la qualité du bois. Dans les plantations de teck, il est recommandé d'obtenir des proportions de bois de cœur élevé en terme de rentabilité pour la fabrication des produits finis de qualité supérieure comme les meubles ou de bois de sciages destiné particulièrement à la construction navale et aux usages extérieurs comme les terrasses.

La proportion du duramen peut varier énormément en fonction d'un certain nombre de facteurs. Beaucoup pensent que l'âge de l'arbre est l'un des facteurs essentiels qui contrôlent les quantités d'aubier et de duramen (Hillis 1987). Le taux de croissance influence également la formation du duramen. Le volume de duramen, à un certain âge peut varier largement d'une espèce à l'autre et même à l'intérieur d'une espèce (Hillis 1987). Bien que sous contrôle génétique, il apparaît que les conditions environnementales et les

pratiques sylvicoles interviennent au cours de la duraminisation (Morataya et *al.* 1999). Chez certaines espèces, la répartition spatiale des arbres peut influencer la production de duramen. Bert (*comm. pers.*) remarque que dans un peuplement de pin maritime (30 ans), les arbres dominants ont une proportion de duramen plus élevée que les autres. D'après des études réalisées en Inde, les Tecks âgés de 51 à 52 ans contiennent 77% de bois de cœur, contre 30% seulement pour les arbres de 8 ans (Bhat 1995). Il a été aussi démontré l'existence d'une corrélation positive entre le pourcentage de bois de cœur, la largeur de cernes et le diamètre à 1,30 m de hauteur du tronc (Bhat 1995 ; Kjaër et *al.* 1999). Ces résultats semblent indiquer qu'à âge égal chez le Teck, plus la croissance est rapide, plus le pourcentage de bois de cœur (bois de valeur) est élevé.

### ***La théorie du "Pipe Model"***

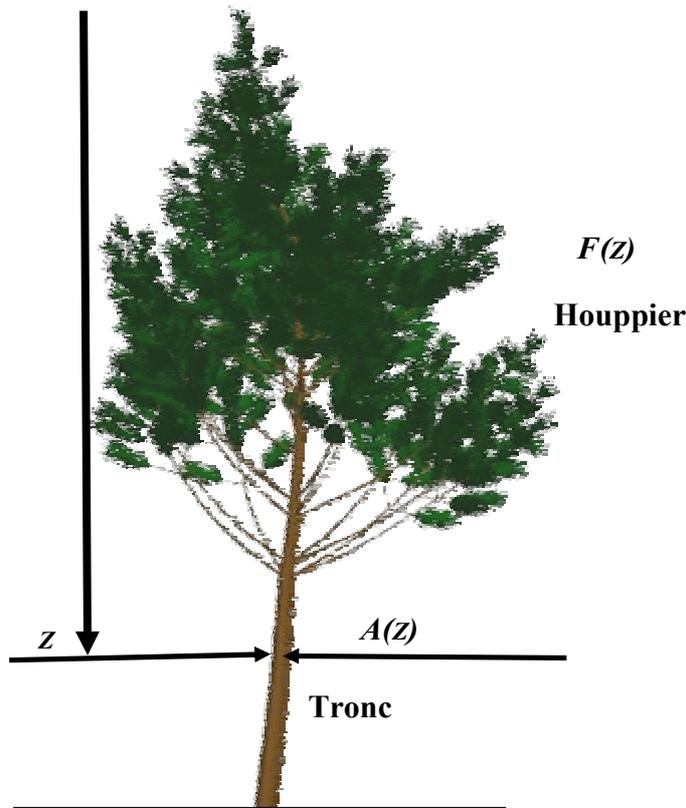
La théorie du modèle tubulaire encore appelée le "***Pipe Model***" fut développée la première fois par Shinozaki et *al.* (1964a). Elle explique que le tronc et les branches d'une plante peuvent être considérés comme un ensemble de tuyaux ; chacun supportant une certaine quantité bien définie de feuilles. Une unité de poids du feuillage de la couronne est alors alimentée par une surface transversale spécifique d'aubier conducteur. Ainsi la quantité de feuilles à un niveau horizontal donné chez une plante est directement proportionnelle à l'aire des organes non photosynthétiques (tronc et branches). Shinozaki et *al.* (1964a) expriment cette relation par l'équation [1], (Fig.2.2) :

$$F(z) = L A(z) \quad [1]$$

avec  $F(z)$  = poids des feuilles au dessus du niveau  $z$

$A(z)$  = aire de la section des organes non photosynthétiques  
au niveau  $z$

et  $L$  = une constante.



**Fig.2.2. Relation entre l'aire du tronc et le houppier chez un arbre (Shinozaki et *al.*1964).**

En application à cette théorie, plusieurs auteurs (Marchand 1983 ; Whitehead et *al.* 1984 ; Waring 1982) ont pu estimer la biomasse du feuillage sur différentes espèces de zones tempérées en se basant sur l'aire de surface de l'aubier conducteur. Ces auteurs concluent qu'il existe une relation physiologique entre les dimensions de la cime et l'aire de section du xylème conducteur nécessaire à l'alimentation en eau du feuillage. L'accroissement en aire (et en volume) du tronc est fortement corrélé à la biomasse foliaire (Morataya et *al.*1999 ; Vanninen et Mäkela 2000).

L'application de la théorie du modèle tubulaire aux espèces tropicales à forte croissance présente une opportunité puisque les processus dynamiques sont fortement accélérés en milieu tropical. En effet, l'augmentation de l'activité respiratoire due à la chaleur provoquerait la réduction d'hydrate de carbone. Ce qui se manifeste par une régression prématurée de la couronne et limite ainsi son développement dans les plantations non

éclaircies (Morataya et al. 1999). Les études montrent que la non réduction au moment opportun de la densité des arbres dans les plantations de teck conduit au dépérissement de la couronne et à la baisse/arrêt de la croissance en diamètre. Une éclaircie tardive permet la reprise de la croissance mais l'accroissement du tronc est largement inférieur à celui obtenue après une éclaircie réalisée à temps. Les résultats obtenues chez *Tectona grandis* et *Gmelina arborea* montrent que le régime sylvicultural de ces espèces doit prendre en compte l'augmentation de la biomasse du houppier au niveau des arbres dans le jeune âge lorsqu'on s'attend à une croissance rapide du diamètre des troncs (Morataya et al. 1999). A partir de l'analyse du fonctionnement physiologique des branches et des paramètres foliaires (quantité de lumière interceptée, aire et poids des feuilles) de trois espèces différentes, Kosei et al. (2002) concluent que l'architecture des arbres n'est pas simplement un ensemble de tuyaux comme décrite par la théorie du modèle tubulaire. L'accroissement des troncs dépendrait fortement de la quantité de lumière interceptée et de la distribution des matières photosynthétisées par les jeunes pousses plutôt que du poids/aire des feuilles.

## **2.1. Matériels et Méthodes**

### **2.1.1 Pourcentage de bois de cœur**

#### **2.1.1.1 Zone de prélèvement et matériel végétal**

L'ensemble des parcelles échantillonnées est situé dans les cinq zones écologiques du Togo (Fig.1.1). Les différentes caractéristiques de ces parcelles à savoir les densités de peuplement au moment de la présente étude, les diamètres moyens à 1,30m de hauteur des troncs, la hauteur moyenne et les types de sol ont été décrites (Tableau 2.1).

Afin d'apprécier la variation du pourcentage de bois de cœur, un échantillon de 80 arbres âgés de 6 à 70 ans a été prélevé sur 21 parcelles (Fig.1.1). Une première campagne menée sur les zones écologiques 1, 2 et 4 a permis de réaliser des mesures sur 30 arbres soit dix arbres par zone. Une deuxième campagne menée sur plus d'individus (27 arbres dans la zone 3 et 23 dans la zone 5) a permis de travailler sur les zones 3 et 5 ; ces 2 zones étant spatialement les plus cultivées en Teck (Fig.1.1).

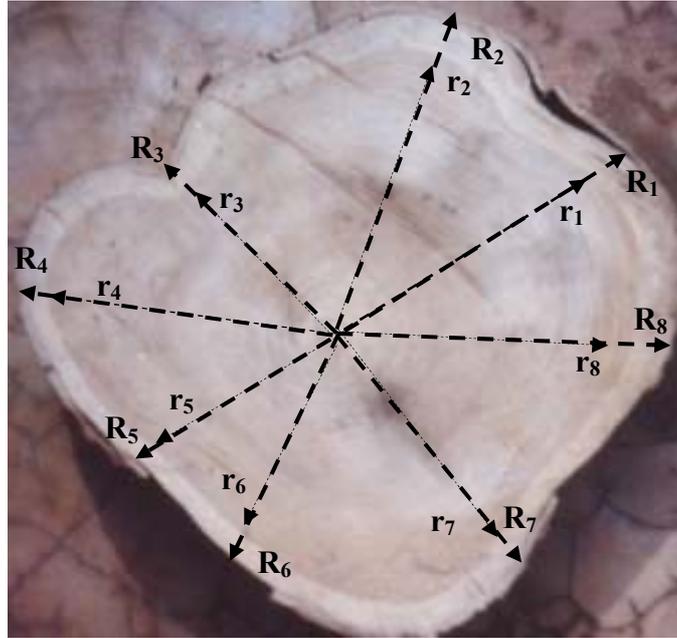
(NB : Toutes les teckeraies de la zone 4 sont gérées par les collectivités villageoises, on a pu travailler là que sur les arbres dominés et par conséquent de très faible diamètre).

Les divers procédés sur les arbres abattus sont les suivants :

- mesure de la hauteur de l'arbre (de la base du tronc à la base du houppier) ;
- prélèvement d'une rondelle d'environ 5 cm d'épaisseur à la base du tronc, à 1,30 m et à 5 m ;
- à partir de 5 m, prélèvement d'une rondelle d'environ 10 cm d'épaisseur tous les 5 m jusqu'à la base du houppier.

#### **2.1.1.2 Mesure du pourcentage de bois de cœur**

Après avoir raboté la surface supérieure des rondelles, huit rayons de la moelle à l'écorce ( $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8$ ) et huit rayons de la moelle à la limite du duramen ( $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8$ ) ont été mesurés (Fig.2.3).



**Fig.2.3. Rondelle de *Tectona grandis* montrant les 16 rayons mesurés.**

Les surfaces du duramen et de l'aubier ont été calculées pour chaque rondelle en utilisant la moyenne quadratique des rayons (Equations 2 et 3). Cette méthode est considérée comme étant la plus précise pour le calcul des surfaces proches de la circonférence (Pardé et Bouchon 1988 ; Kokutse 1999 ; Berthier et *al.* 2000). Saint-André (1998) en étudiant la précision du calcul de la surface du xylème sur des tiges à sections irrégulières, a d'ailleurs démontré mathématiquement que l'utilisation de quatre rayons orthogonaux était amplement suffisante. Chez les tiges à sections très irrégulières, l'estimation de la surface du duramen ou du xylème nécessite souvent un outil numérique. A défaut, 16 rayons ont été mesurés sur ce type de rondelle pour plus de précision.

$$S_t = \frac{\pi \left( \sum_{i=1}^8 R_i^2 \right)}{8} \quad [2]$$

$$S_{HW} = \frac{\pi \left( \sum_{i=1}^8 r_i^2 \right)}{8} \quad [3]$$

$$S_a = S_t - S_{HW} \quad [4]$$

avec :  $S_t$  = surface totale la rondelle ;

$S_{HW}$  = surface du duramen ;

$S_a$  = surface de l'aubier.

Le pourcentage de bois de cœur a été calculé par rapport à la surface totale de la rondelle sur 400 rondelles issues de 80 arbres. L'aire de l'aubier conducteur a été déterminée sur les rondelles prélevées en faisant une déduction entre l'aire totale de la rondelle et celle du bois de cœur (Equation 4). Des analyses de variance ont été faites pour déterminer les variations du taux de bois de cœur en fonction de l'âge des arbres et des zones écologiques où les arbres ont poussé.

### **2.1.2 Mesure de la biomasse foliaire**

Cette mesure a été réalisée durant les saisons pluvieuses afin d'avoir le poids maximal du houppier dans les plantations au cours de l'année. Sur l'échantillon de 80 arbres (1.1.1) qui ont été abattus pour le prélèvement des rondelles, 50 houppiers (soit dix houppiers par zones écologiques) ont été sectionnés et les biomasses fraîches déterminées par pesée à l'aide d'une balance. Cette biomasse comprend le poids des feuilles et celles des rameaux. Les tiges dans le houppier n'ont pas été pesées.

Pour l'application de la théorie du *Pipe Model*, des analyses de régression linéaire simple ont été faites entre la biomasse fraîche du houppier et l'aire de l'aubier conducteur.

## 2.2. Résultats

### 2.2.1 Pourcentage de Bois de cœur

#### *Comparaison selon les zones écologiques*

Les jeunes Tecks de 6 ans ne comportent pas de bois de cœur, par contre un début de duraminisation a été observé chez des arbres âgés de 7 ans. De manière générale, le taux de bois de cœur formé diminue progressivement de la base du tronc vers la base du houppier (Tableau 2.1).

Les pourcentages de bois de cœur varient fortement en fonction de l'âge et des zones écologiques (Tableau 2.1). Dans la zone 1, les arbres de 13 ans comportent 26,2% de bois de cœur à 1,30 m de hauteur. Dans la zone 3, les arbres de 12 ans comportent 36,7% de duramen, soit 40% de plus que les arbres de 13 ans de la zone 1. Les tecks de 11 ans de la zone 5 renferment jusqu'à 42,1% de duramen, ce qui représentent environ 61% de bois de cœur de plus que les Tecks de même âge de la zone 1.

Une comparaison du pourcentage de bois de cœur en fonction des zones écologiques et de l'âge des arbres montre que les arbres de la zone écologique 4 sont significativement différents de ceux de la zone 1 ( $P=0,048$  et  $F=4,56$ ) ; les arbres de la zone 5 sont significativement différents de ceux de la zone 1 ( $P=0,001$  et  $F=14,58$ ), de même que les tecks de la zone 3 et de la zone 1 ( $P=0,019$  et  $F=6,13$ ). Les tecks de 30 ans dans la zone 5 renferment environ 66% de bois de cœur à 1,30 m de hauteur, soit seulement 9% de moins que les tecks âgés de 70 ans de la zone 1. En outre, les tecks de 25 ans de la zone écologique 3 produisent jusqu'à 64% de duramen, ce qui correspond à 89% de bois de cœur formé par les arbres âgés de 70 ans de la zone 1. La zone écologique 2 n'est pas significativement différente des 4 autres zones.

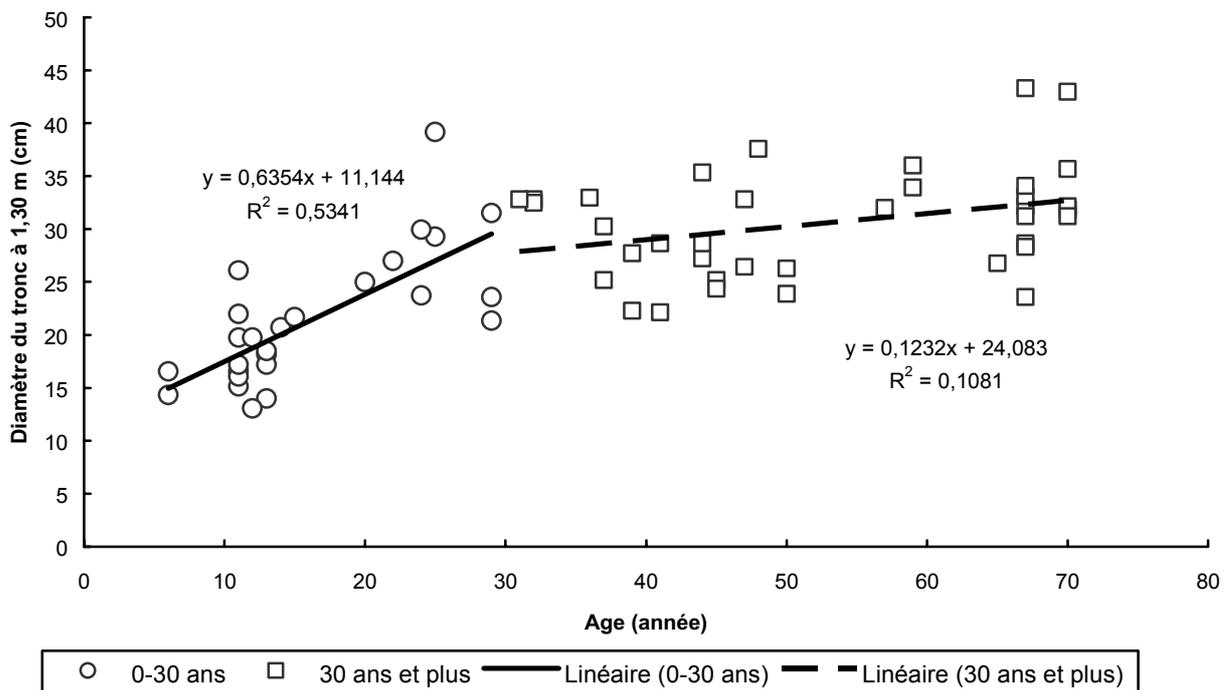
	Zone 1		Zone 2		Zone 3					Zone 4		Zone 5		
Age (année)	13	70	44-48	67	12	24-25	39	41-46	57-59	16-18	43-45	11	29-32	45-50
<b>Duramen</b>														
<b>Base du tronc</b>	35,1% ± 12,8	74,0% ± 9,4	65,9% ±11,6	69,5% ± 5,6	35,0% ± 14,5	60,9% ± 5,3	65,5% ± 4,5	69,8% ± 2,4	65,0% ± 7,7	35,6% ± 8,1	67,4% ± 3,5	44,3% ±10,9	69,1% ± 6,5	69,9% ± 9,3
<b>1,30m du tronc</b>	26,2% ± 12,6	72,3% ± 8,5	67,3% ±1,4	69,6% ± 2,2	36,7% ± 14	63,7% ± 1,7	62,0% ± 3,0	69,3% ± 2,3	63,5% ± 6,7	31,1% ± 9,8	66,1% ± 4,4	42,1% ±13,4	65,7% ± 6,6	65,6% ± 17,0
<b>5m du tronc</b>		61,0% ± 5,4	62,8% ± 0,2	59,5% ± 7,4	34,5% ± 15,8	59,5% ± 4,9	51,9% ± 6,1	63,4% ± 3,4	60,7% ± 7,8	35,45% ± 4,0	63,5% ± 3,9	31,5% ± 9,9	66,5% ± 8,45	59,5% ± 8,3
<b>sous houppier</b>		64,3% ± 7,0	43,8% ± 3,0	54,8% ± 4,6	26,4% ± 17,3	60,3% ± 5,07	45,5% ± 6,5	59,4% ± 2,5	50,9% ± 9,1	28,9% ± 8,4	54,6% ± 6,1	20,6% ±10,6	51,3% ± 8,8	52,3% ± 14,1

**Tableau 2.1 : Pourcentage de Bois de Cœur par âge et par zones écologiques.**

Le tableau 2.1 montre également la distribution longitudinale du duramen. Comme signalée chez la plupart des espèces, la surface du bois de cœur est maximale à la base du tronc puis diminue progressivement, jusqu'à s'annuler sur toute une portion terminale de la tige (Hillis 1987 ; Kokutse 1999 ; Berthier et *al.*2000). Les jeunes tecks de 13 ans de la zone 1 n'atteignent pas 5 m de hauteur et ne renferment pas de duramen sous le houppier.

### Effet de l'âge

Les analyses de régression montrent que le diamètre du tronc à 1,30m de hauteur est significativement lié à l'âge de l'arbre ( $R^2 = 0,53$  ;  $P < 0,001$ ) dans les plantations de moins de 30 ans (Fig.2.4). Au-delà de 30 ans, la croissance des troncs est fortement ralentie et les relations diamètre du tronc – âge de l'arbre ne sont plus significatives.



**Fig.2.4 : Relation entre le diamètre du tronc à 1,30 m de hauteur et l'âge des arbres.**  
La régression n'est significative que dans les plantations de moins de 30 ans.

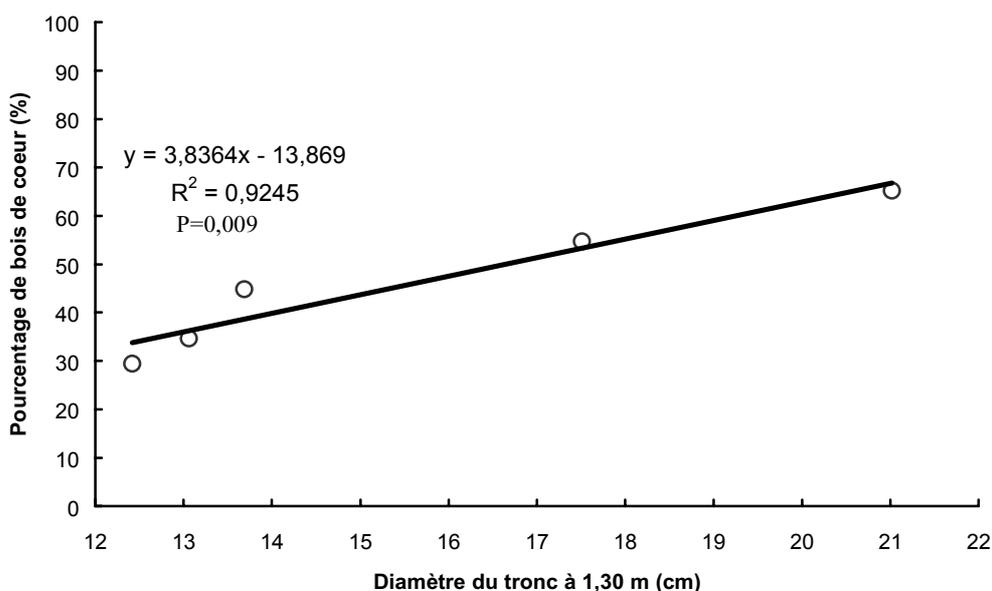
L'étude des relations entre le diamètre de bois de cœur et l'âge des arbres montre les mêmes tendances que celles décrites précédemment (Fig.2.4).

La comparaison des diamètres du tronc ( $n = 71$  arbres tout âge confondu) d'arbres issus de différentes zones révèlent des différences significatives ( $P=0,001$  et  $F=57,44$ ). Les arbres des zones 3 et 5 sont statistiquement les plus gros. A âge d'exploitabilité à peu près identique, les zones qui produisent plus de bois de cœur sont celles où les diamètres du tronc sont les plus élevés en moyenne (Tableau 2.2).

	Age (année)	Diamètre à 1,30m (cm)	Pourcentage de bois de cœur à 1,30 m (%)
<b>Zone 1</b>	13 (n=5)	13,00 ± 1,2	26,20 ± 12,6
<b>Zone 3</b>	12 (n=3)	15,18 ± 5,1	36,70 ± 14,0
<b>Zone 4*</b>	16 (n=3)	10,61 ± 0,6	31,10 ± 9,8
<b>Zone 5</b>	11 (n=5)	15,61 ± 3,0	42,10 ± 13,4

**Tableau 2.2 : Comparaison du pourcentage de bois de cœur en fonction du diamètre du tronc ; n représente le nombre d'arbre pris en compte. \* Les arbres de la zone 4 sont des arbres dominés, donc de diamètres très faibles.**

Dans une même plantation, les plus gros arbres produisent plus de duramen que les plus petits. L'exemple typique d'une plantation âgée de 11 ans de la zone 5 est présenté ( Fig. 2.5).

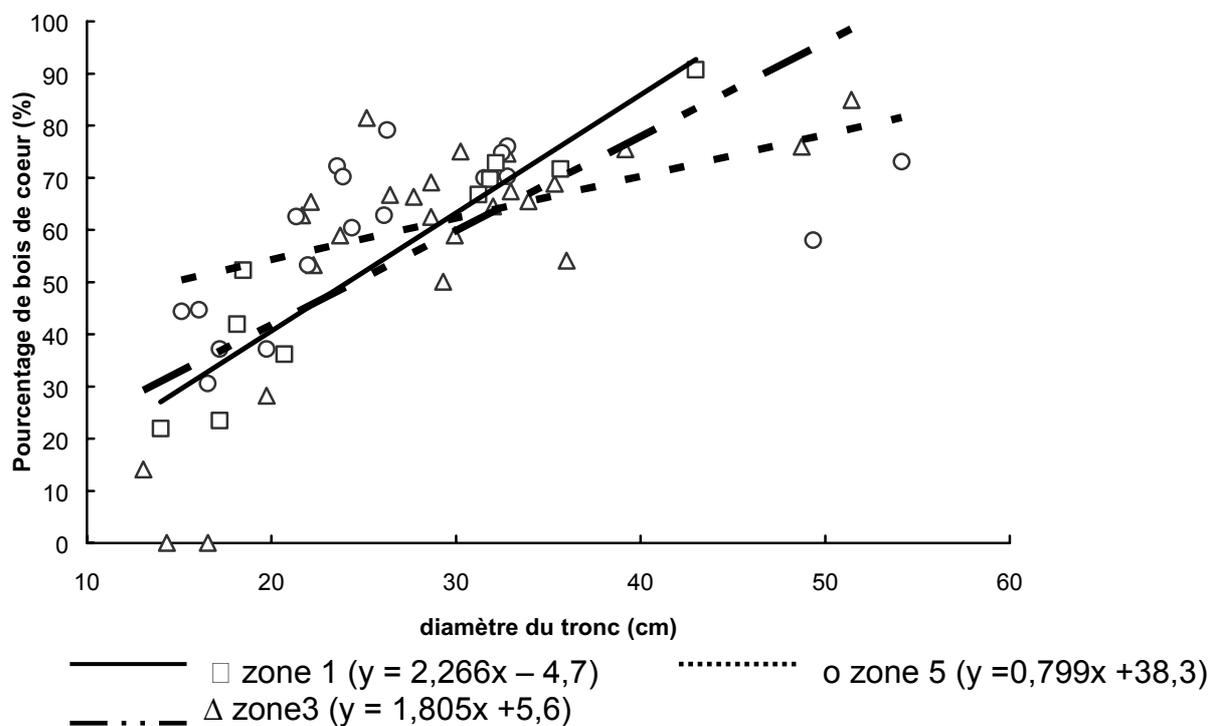


**Fig.2.5 : Relation entre le pourcentage de bois de cœur et le diamètre à 1,30 m de diamètre du tronc de 5 arbres issus d'une plantation âgée de 11 (zone 5).**

Le pourcentage de bois de cœur dépend donc étroitement de la vitesse de croissance du tronc dans les plantations de teck. La différence de la vitesse de croissance expliquerait dans ce cas les variations de taux de bois de cœur observées entre les différentes zones écologiques. Les résultats présentés dans le paragraphe suivant montreront que la production de duramen atteindrait son maximum autour de 40-45 ans dans les plantations. La transformation de l'aubier en bois parfait ne se produirait pas indéfiniment tout au long de la vie de l'arbre mais devient non significative à partir d'un certain âge chez le teck.

### Effet de la vitesse de croissance du tronc

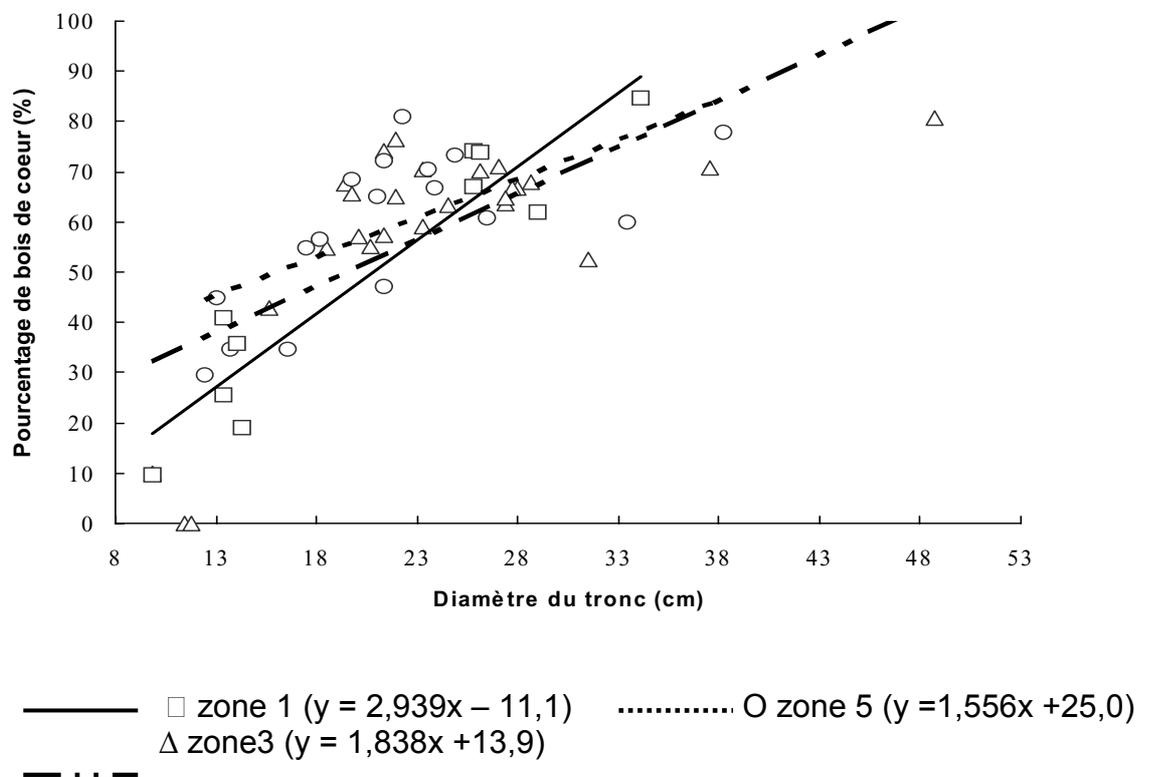
L'effet de l'âge sur la production du bois de cœur chez le teck en plantation est très lié à celui de la croissance en diamètre du tronc comme montré précédemment.



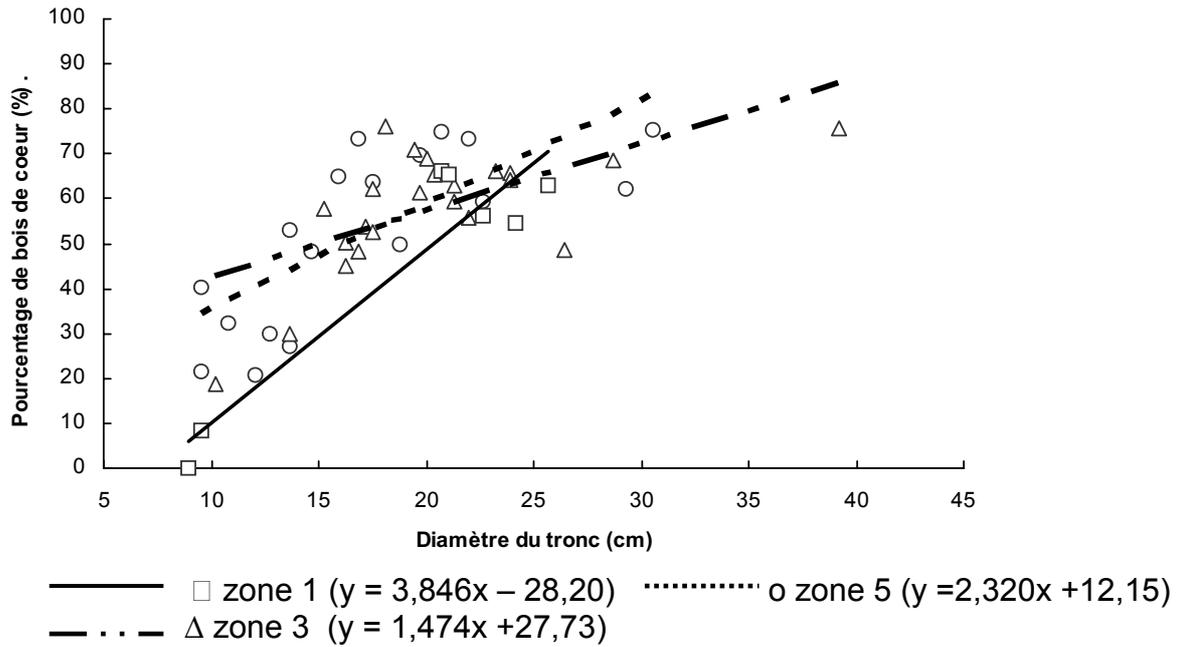
Le diamètre du tronc n'est pas significativement corrélé au pourcentage de bois de cœur formé dans les zones 2 et 4.

**Fig.2.6 : Relation entre le pourcentage de bois de cœur et le diamètre du tronc à la base de 53 arbres (tout âge confondus) issus de différentes zones écologiques.**

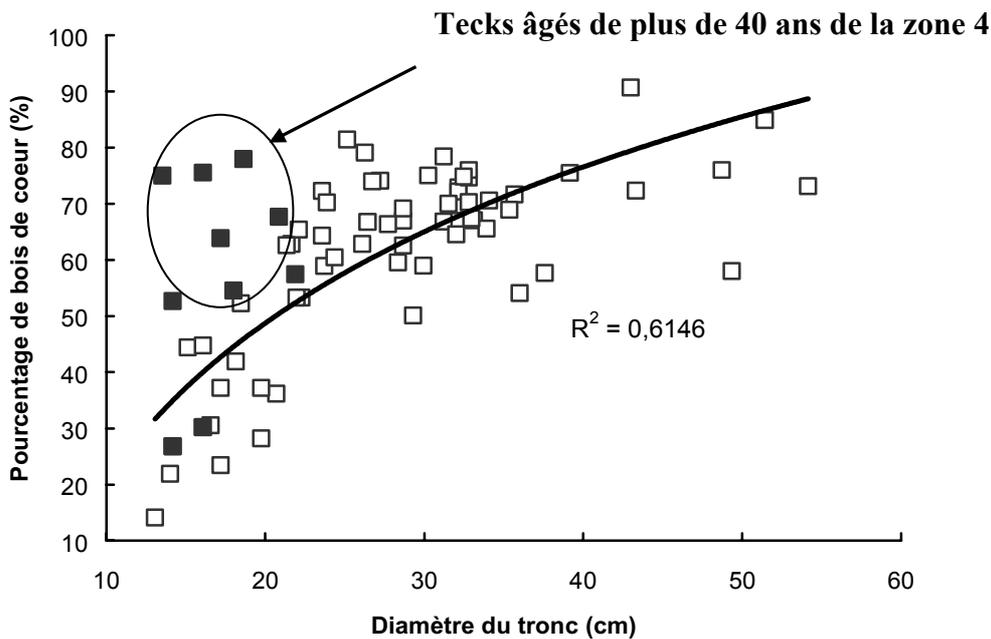
Le pourcentage de bois de cœur formé dans les zones écologiques 1, 3 et 5 augmente de manière significative lorsque le diamètre du tronc augmente. Cette relation a été vérifiée à la base du tronc (Fig.2.6), à 1,30m de hauteur du tronc (Fig.2.7) et à 5 m (Fig.2.8). Les coefficients de corrélation sont pour la zone 1 ( $R^2 = 0,90$  et  $P < 0,001$ ) ; zone 3 ( $R^2 = 0,52$  et  $P < 0,001$ ) ; zone 5 ( $R^2 = 0,32$  et  $P = 0,015$ ) à la base du tronc. A 1,30 m de hauteur, les coefficients sont pour la zone 1 ( $R^2 = 0,88$  et  $P < 0,001$ ) ; zone 3 ( $R^2 = 0,48$  et  $P < 0,001$ ) ; zone 5 ( $R^2 = 0,45$  et  $P = 0,003$ ). A 5 m de hauteur, les coefficients de corrélation sont pour la zone 1 ( $R^2 = 0,88$  et  $P = 0,002$ ) ; zone 3 ( $R^2 = 0,53$  et  $P < 0,001$ ) ; zone 5 ( $R^2 = 0,54$  et  $P < 0,001$ ).



**Figure 2.7 : Relation entre le pourcentage de bois de cœur et le diamètre à la base du tronc de 53 arbres (tout âge confondu) issus de différentes zones écologiques**



**Fig. 2.8 : Relation entre le pourcentage de bois de cœur et le diamètre du tronc à 5m de 53 arbres (tout âge confondus) issus de différentes zones écologiques.**



**Fig. 2.9 : Relation entre le pourcentage de bois de cœur et le diamètre du tronc à 1,30m de hauteur ( 74 arbres toutes zones confondues).**

□ Teck des zones 1, 2, 3 et 4 ; ■ Teck de la zone 4

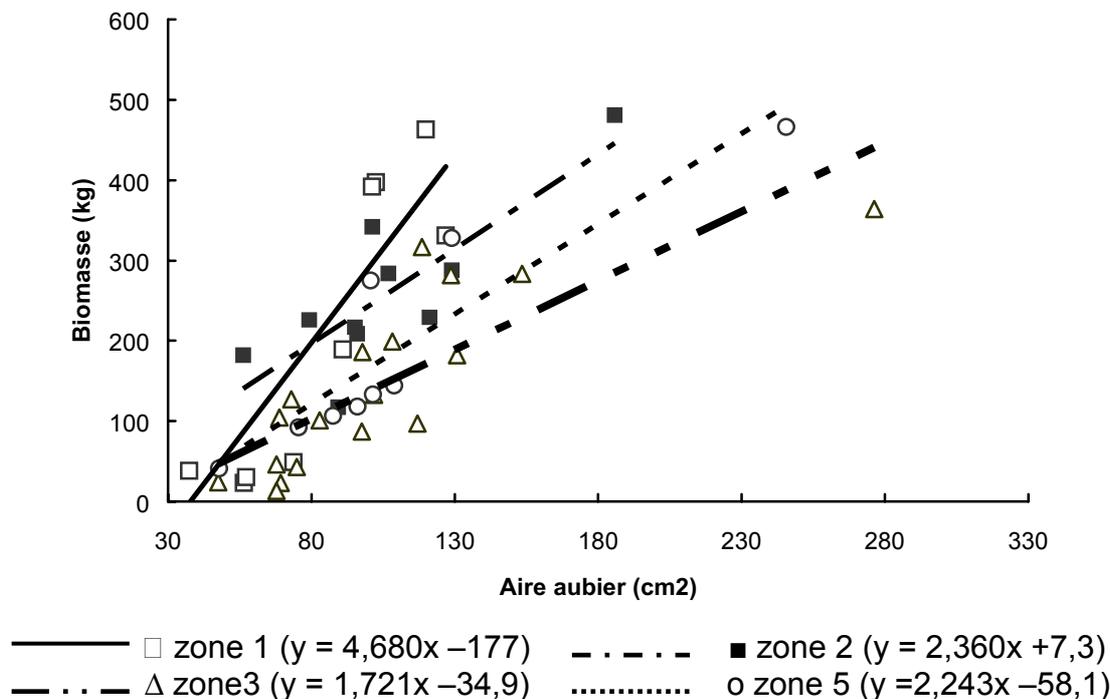
L'analyse du taux de bois de cœur en fonction du diamètre du tronc pour tous les arbres (n = 74) indépendamment des zones écologiques montre que la corrélation entre ces deux paramètres n'existe que dans les jeunes plantations avec moins de 30 cm de diamètre à 1,30 m

(Fig.2.9). Entre 10-25 cm de diamètre à 1,30m de hauteur, le pourcentage de bois de cœur augmente rapidement avec le diamètre du tronc, l'équation de corrélation  $y = 1,95 x + 4,66$  ( $R^2 = 0,54$  et  $P < 0,001$ ). Au-delà de 25 cm de diamètre, ce qui correspond aux arbres âgés de plus de 30-35 ans, la formation du duramen est fortement ralentie même si le diamètre du tronc augmente. L'équation de régression  $y = 60\%$  ( $R^2 = 0,09$  et  $P = 0,04$ ).

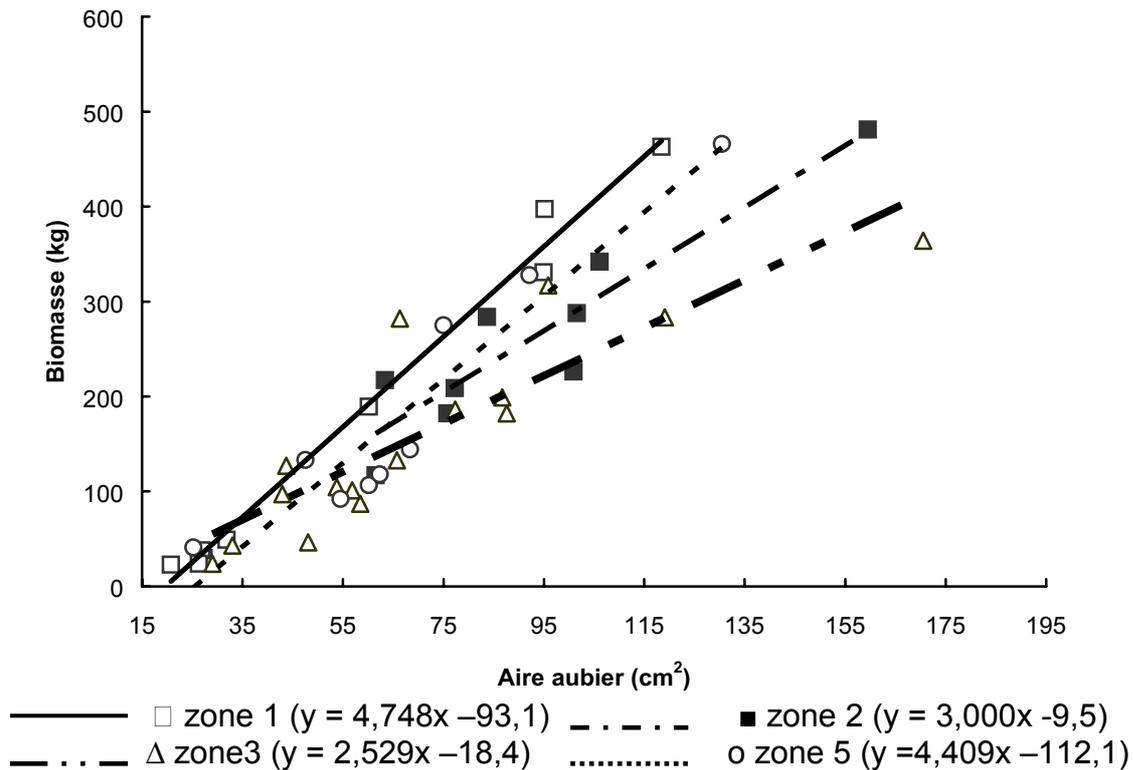
En résumé, le pourcentage de duramen augmente de façon linéaire avec le diamètre du tronc dans les jeunes plantations et atteint environ 60% autour de 30-35 ans. Au-delà de cet âge, le pourcentage de bois de cœur ne dépend plus du diamètre du tronc. Ce qui se traduit par une mauvaise corrélation entre les deux paramètres dans les plantations âgées en particulier dans la zone 2 où l'on a travaillé que sur des tecks âgés de plus de 40 ans. Ces résultats confirment ceux du paragraphe sur l'analyse du taux de bois de cœur en fonction de l'âge des arbres. Contrairement, les tecks de la zone 4 (Fig.2.9) présentent des taux de bois de cœur élevé (plus de 55%) par rapport à leur diamètre faible (compris entre 13-20 cm). Les plantations de la zone 4 sont des domaines appartenant à des communautés villageoises, de ce fait, on a pu travaillé que sur des arbres dominés, donc par conséquent ayant de très faibles diamètres.

## 2.2.2 Relation biomasse foliaire et aire aubier

La théorie du '*Pipe Model*' se vérifie dans les teckeraies du Togo à l'exception de la zone écologique 4 (Fig.2.10 et Fig.2.11). La biomasse foliaire est significativement liée à l'aire de l'aubier conducteur tout le long du tronc. Les modèles linéaires développées permettent de prédire la biomasse foliaire en se basant sur l'aire de l'aubier. L'aire de l'aubier sous houppier semble être meilleur prédicateur par rapport à l'aire de l'aubier à 1,30 m de hauteur du tronc . Les coefficients de corrélation à 1,30 m de hauteur sont pour la zone 1 ( $R^2 = 0,78$  et  $P < 0,001$ ) ; zone 2 ( $R^2 = 0,67$  et  $P = 0,004$ ) ; zone 3 ( $R^2 = 0,66$  et  $P < 0,001$ ) ; zone 5 ( $R^2 = 0,82$  et  $P < 0,001$ ). Les coefficients de corrélation en considérant l'aire de l'aubier sous houppier sont pour la zone 1 ( $R^2 = 0,98$  et  $P < 0,001$ ) ; zone 2 ( $R^2 = 0,84$  et  $P = 0,001$ ) ; zone 3 ( $R^2 = 0,77$  et  $P < 0,001$ ) et la zone 5 ( $R^2 = 0,90$  et  $P < 0,001$ ).



**Fig.2.10 : Relation entre la biomasse foliaire et l'aire de l'aubier à 1,30m de hauteur de 50 arbres (tout âge confondu).**



**Fig.2.11 : Relation entre la biomasse foliaire et l'aire de l'aubier sous houppier de 50 arbres (tout âge confondu).**

L'aire de l'aubier et par conséquent le diamètre du tronc augmente de façon significative lorsque la biomasse foliaire augmente. En considérant le modèle linéaire à 1,30 m de hauteur de hauteur (Fig.2.10), à biomasse foliaire égale, les tecks des zones 3 et 5 présentent une surface d'aubier plus large que ceux des zones 1 et 2. Par exemple, à une biomasse de 300 kg, l'aire d'aubier correspondant est d'environ 100 cm<sup>2</sup> chez les arbres des zone1 et 2 alors qu'elle est en moyenne de 150 cm<sup>2</sup> chez les tecks en plantation dans la zone 5 et d'environ 200 cm<sup>2</sup> dans les plantations de la zone 3. Pour avoir une surface d'aubier conducteur égale à celle des tecks de la zone 5 (150 cm<sup>2</sup>), il aurait fallu une biomasse foliaire d'environ 550 kg pour les arbres de la zone 1 et de 375 kg pour la zone 2. De même, pour avoir une surface d'aubier de 100 cm<sup>2</sup>, les tecks des zones 3 et 5 doivent avoir une biomasse foliaire de 150 kg soit 50% de feuilles en moins par rapport aux tecks de la zone 1. Ces résultats indiquent que les tecks en plantation dans la zone 1 auraient besoin de beaucoup de feuillages, par conséquent de beaucoup plus d'espaces autour des arbres pour avoir une surface d'aubier égale à celle des zones 3 et 5.

## **Discussion et conclusion**

La duraminisation commence assez tôt chez le teck (autour de 7 ans) au Togo. Les jeunes tecks de 11-13 ans en plantation au Togo forment déjà environ 30% de bois de cœur. Ce pourcentage est équivalent à celui trouvé chez les tecks de 8 ans en plantation en Inde, région de Kerala (Bhat 1995). Même si les rendements de bois parfait dans les plantations en Inde sont supérieurs à ceux des plantations au Togo, cette proportion de duramen est très intéressante pour la valorisation des produits de premières éclaircies.

Les proportions de bois de cœur sont très variables avec l'âge des arbres et avec l'ensemble des facteurs écologiques. Les résultats révèlent qu'en terme de production de bois de cœur, les zones écologiques 3, 4 et 5 sont les plus productives. Les tecks de 25 ans de la zone 3 produisent presque autant de duramen que les arbres de 45-50 ans de la zone 2 et autant que les tecks de 70 ans de la zone 1. De même, les plantations de 29-32 ans de la zone 5 forment autant de bois de cœur que les tecks âgés de 60-70 ans des zones 1, 2 et 3. Inversement, la zone écologique 1 représente la région la moins productive de teck en terme de proportion de bois de cœur formé. La zone 2 ne se distingue pas significativement des autres zones. Elle ne comporte pas de jeunes plantations pouvant servir à faire la comparaison avec les autres mais les conditions écologiques dans cette région laissent penser qu'elle serait peu favorable à la croissance du teck. En effet, les sols des zones 1 et 2 sont soit de type cuirassé, soit des sols peu évolués et appauvri par une saison sèche très longue de plus de 5 mois, encore accentuée par l'Harmattan. Ces types de sols sont peu profonds, et assez pauvres en éléments fertilisants. Ils sont de ce fait peu favorables au teck à cause des problèmes d'enracinement (Lamouroux 1957). D'autre part, la pluviométrie annuelle dans ces zones est nettement inférieure à celle des autres zones. Elle est très mal répartie au cours de l'année et subit des variations interannuelles importantes. Les moyennes annuelles sont d'environ 1.000 mm de pluie alors que dans les zones 3 et 4, elles peuvent atteindre 1.500 mm d'eau dans l'année. Ces facteurs écologiques influencent directement la vitesse de croissance du tronc dans les plantations. De ce fait, les tecks des zones 1 et 2 ont une croissance très lente, sont rabougris et ont une mauvaise tenue (Delvaux 1973).

Les résultats révèlent aussi que les tecks âgés de 45 ans et ceux de 60 ans ne montrent pas de différence significative de pourcentage de bois de cœur. Bhat (2000) a également montré que chez le teck, il n'existe pas de différences significatives de proportion de bois de cœur

lorsqu'on considère les arbres de 55 ans et de 65 ans. Ce qui suppose que chez le teck en plantation, à partir de 40-45 ans environ, le pourcentage de duramen ne varie plus de manière significative. Deux tendances semblent se dégager lors de la formation et de la propagation radiale du bois de cœur chez le teck :

- 1 - dans les jeunes plantations (0-35 ans), la duraminisation est fortement influencée par le taux de croissance du tronc. Le taux de bois de cœur augmente significativement lorsque la croissance en largeur du tronc est favorisée. On a pu démontrer une corrélation positive entre le diamètre du tronc et le taux de bois de cœur dans les zones écologiques 1, 3 et 5 qui comportent des jeunes plantations. Dans une plantation de même âge, les arbres qui ont les plus gros troncs, donc les arbres dominants seront ceux qui auront un diamètre élevé de duramen. Par conséquent, le taux de duramen dépend plus du diamètre du tronc que de l'âge dans les jeunes plantations. Yamamoto *et al.* (2000) et Ferguston (1934) ont montré la même tendance dans les plantations de teck en Indonésie. Bhat (1995) et Kjaer *et al.* (1999) ont aussi démontré que la proportion de duramen chez le teck en plantation est positivement corrélée au diamètre du tronc et à la largeur du cerne.
- 2 - la duraminisation chez le teck atteint son niveau maximum autour de 35-40 ans. Au-delà de cet âge, le taux de bois de cœur ne varie plus de manière significative même si la croissance en diamètre du tronc est favorisée. Selon Ferguston (1934), la largeur de l'aubier reste constante même si le diamètre du tronc augmente au-delà de cet âge. Cela expliquerait pourquoi les tecks de 45 et de 60-70 ans ne montrent pas de différence significative de diamètre de bois de cœur. La corrélation entre le pourcentage de duramen et l'âge n'existerait que dans les jeunes plantations de moins de 40 ans.

Il apparaît clairement que la sylviculture du teck doit prendre en compte ces facteurs. Les éclaircies doivent intervenir dans le jeune âge lorsque des taux de bois de cœur importants sont recherchés. Les différences de vitesse de croissance dues aux facteurs écologiques seraient donc à l'origine du faible taux de duramen constaté dans les plantations des zones 1 et 2 à âge d'exploitabilité égal par rapport aux zones 3, 4 et 5.

Les densités de plantation, particulièrement très élevées dans les teckeraies pourraient également expliquer les faibles rendements de bois de cœur observés dans la zone 1. La productivité des jeunes tecks dans les plantations togolaises notamment dans la zone 1

pourrait être amélioré si de bonnes pratiques sylvicoles y étaient faites. En effet, les plantations de teck au Togo datent des époques coloniales, cependant elles n'ont fait l'objet d'aucun aménagement et certaines n'ont jamais été éclaircies. Plusieurs teckeraies togolaises n'ont pas suivi une évolution normale. Selon Delvaux (1973), les plantations ne connurent pas d'entretiens (pas d'éclaircies) et les nombres de tiges à l'hectare sont trop élevés (1500-2000 pieds/ha). Les vieilles plantations ont subi des éclaircies tardives dites de "rattrapage". La faible corrélation entre le diamètre du tronc et celui du duramen dans les plantations âgées de plus de 40 ans montre que la reprise de la croissance du tronc obtenue après ces éclaircies ne compenserait pas les coûts relatifs à cette intervention dans le cas particulier du Togo.

Les études révèlent que les non réductions au moment opportun de la densité des arbres dans les plantations de teck conduisent au dépérissement de la couronne et à la baisse de la croissance en diamètre (Moratoya et *al.* 1999). Une éclaircie tardive permet la reprise de la croissance en largeur du tronc mais toujours inférieure à celle obtenue par une intervention juste à la fin de croissance en hauteur. L'application de la théorie du modèle tubulaire chez le Teck au Togo montre l'importance des éclaircies dans les plantations particulièrement celles de la zone 1. Le régime sylvicultural du teck doit prendre en compte l'expansion du houppier au niveau des arbres pris individuellement. Les relations existantes entre la biomasse foliaire et l'aire de l'aubier d'une part, entre le pourcentage de bois de cœur et le diamètre du tronc d'autre part démontrent de façon évidente que l'augmentation de biomasse foliaire doit être favorisée lorsque de taux de bois cœur importants sont attendus dans les plantations de teck. Selon Moratoya et *al.* (1999), les premières éclaircies doivent intervenir dès la fin de la croissance en hauteur des jeunes tecks c'est-à-dire vers 6-8 ans. Il semble que les plantations de la zone 1 n'aient pas une densité différente des autres (Tableau 1.1). Le manque de suivi des plantations fait qu'on ne dispose pas de données fiables ni sur les densités ni sur l'histoire de ces teckeraies. Les nombres de pied de teck à l'hectare (Tableau 1.1) sont ceux comptés au moment de la présente étude. Ces données ne peuvent donc pas servir à comprendre les différences de taux de bois de cœur formé dans les différentes zones écologiques du Togo. Ces résultats ne peuvent pas non plus être tout à fait expliqués par les facteurs écologiques et la sylviculture pratiquée puisque les provenances des tecks au Togo ne sont pas très bien connues. Les premières graines seraient venues du Nigeria qui elles même seraient originaires d'Inde (Souvannavong 1986). Les pourcentages de duramen varient en fonction de l'âge des arbres, des pratiques sylvicoles et des conditions environnementales mais sont aussi significativement différents suivant les provenances de teck considérées (Kjaer et *al.* 1999).

Seuls les tests de provenance génétique pourront servir à comprendre parfaitement l'effet des facteurs écologiques dans les plantations au Togo.

Ces résultats sur le Teck au Togo reposent les problèmes de la durée de rotation des plantations de teck dans le monde. Ils montrent en outre que dans le cas particulier du Togo, les teckeraies devront subir des coupes rases lorsqu'elles sont âgées de 45 ans. Dans les zones 1 et 2 où les conditions écologiques sont plus rudes, la sylviculture devrait être plus intense afin de permettre aux troncs de développer des houppiers plus importants. L'étude de la croissance secondaire des troncs chez trois espèces feuillues montre que dans un peuplement, il existe une forte corrélation entre l'accroissement du tronc, la biomasse foliaire, la surface foliaire et la quantité de lumière interceptée par les feuilles (Kosei et *al.* 2002). Il faudrait soit baisser au maximum la compétition pour la lumière entre les troncs essentiellement dans les zones 1 et 2 si l'on veut obtenir des taux de croissance égale à celle des autres zones, soit augmenter la potentialité agricole des sols en utilisant des fertilisants. La faible relation entre la biomasse foliaire et l'aire de l'aubier conducteur dans les plantations de la zone 4 démontre une fois encore l'inconvénient des éclaircies tardives chez le Teck. Les parcelles sur lesquelles avaient été prélevés les Tecks venaient juste de subir une éclaircie très intensive qui a enlevé tous les gros arbres. Les houppiers des individus restants, donc les arbres dominés ont pu pousser rapidement. La biomasse foliaire des arbres âgés de 45 ans ( $283 \text{ kg} \pm 80$ ) devrait être indicateur d'une bonne croissance en diamètre du tronc, ce qui n'est pas le cas. Le diamètre des troncs en moyenne inférieure à 20 cm laissent penser que ces arbres auraient perdu leur capacité de croissance en diamètre ou bien que l'effet de l'éclaircie n'était pas encore visible au moment de l'abattage des arbres. L'application de la théorie du model tubulaire chez les espèces en plantation comme le Teck pourrait être améliorée en considérant l'accroissement de la largeur de cernes de l'année suivante au lieu du diamètre du tronc si l'on veut estimer de façon réaliste l'effet d'une éclaircie, surtout dans le cas particulier de cette étude où l'on ne dispose pas de données fiables sur l'histoire des plantations.



## ***CHAPITRE 3***

---

### ***ETUDE DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES : DENSITE ET MODULE D'ELASTICITE***

---



## Introduction

Ce chapitre analyse les variations de la densité à 12% d'humidité et le module d'élasticité longitudinal chez le Teck au Togo. L'étude de ces deux propriétés chez le Teck en plantation en Afrique, et plus particulièrement au Togo est d'autant plus importante qu'elles interviennent pour la valorisation du bois de premières et deuxième éclaircies, utilisé localement comme perches dans la construction des bâtiments. La variation de ces deux propriétés en fonction de l'âge cambial et en fonction de l'âge des arbres sera montrée. L'effet de la zone écologique sur la variation de ces deux propriétés du bois sera également analysé.

La densité représente l'une des premières caractéristiques de base pour qualifier tout matériau. La "densité absolue" d'un corps encore appelée la "masse spécifique" est la masse de l'unité de volume de corps. Dans le cas particulier du bois, on définit plusieurs sortes de densités : la densité anhydre qui est le rapport entre la masse et le volume de l'échantillon anhydre, l'infradensité ou densité basale qui s'obtient en rapportant la masse de l'échantillon anhydre au volume du même échantillon saturé d'eau et la densité à une humidité donnée qui est utilisée dans le cas de la présente étude (densité à 12% d'humidité). La densité du bois a des conséquences énormes sur le rendement et la qualité des fibres, mais aussi sur la qualité technologique du bois produit. Elle peut être largement affectée par les pratiques sylvicoles et les manipulations génétiques (Zobel et *al.*1989). De même, le module d'élasticité est une propriété de première importance dès lors que l'on s'intéresse aux emplois en structure. Soumis à un effort, tout solide est le siège de déformations dont les intensités sont caractéristiques du matériau. Le module d'élasticité est le paramètre de lien entre l'effort fourni et la déformation qui s'en suit.

Les propriétés tant mécaniques que physiques varient d'un point à un autre à l'intérieur de l'arbre et aussi entre arbre d'une même espèce. La présence de cernes de croissance, dans lesquels se distinguent parfois le bois initial et le bois final, ainsi que la variabilité de la croissance radiale saisonnière contribuent à augmenter l'hétérogénéité des propriétés du bois au niveau intra-arbre (Guitard et Fournier 1994). Une autre source de variabilité des propriétés à l'intérieur de l'arbre est la présence de bois juvénile et de bois adulte. Les cernes les plus proches de la moelle de bas en haut de l'arbre présentent chez toutes les espèces des caractéristiques singulières par rapport aux cernes plus âgés. On désigne par "bois juvénile" l'ensemble de ces cernes (Polge 1964 ; Zobel et *al.*1989). Le bois juvénile provoque une

hétérogénéité radiale continue des propriétés du bois (densité, retraits, module d'élasticité...) qui évoluent rapidement lors des premières années d'activité du cambium, de sorte que l'on observe dans la zone entourant la moelle, un bois aux qualités technologiques très variables, souvent qualifiées de médiocres. Sur le plan anatomique, le bois juvénile des résineux est caractérisé, du cœur vers l'écorce, par une diminution de l'angle des microfibrilles de la paroi S<sub>2</sub>, une augmentation de la longueur des trachéides et de l'épaisseur des parois. Chez les feuillus, il se distingue du bois adulte essentiellement par la longueur des fibres, le diamètre des vaisseaux et l'angle des microfibrilles. Sa structure particulière s'expliquerait par la proximité des méristèmes primaires (branches vivantes) dont la production d'auxines pourrait affecter le fonctionnement du méristème secondaire (cambium libéro-ligneux) situé à leur proximité immédiate (Nepveu 1994 ; Zobel et *al.* 1989). En raison des différences de propriétés physiques et chimiques observées entre ces deux types de bois, il est important de définir pour une espèce donnée une limite entre la zone de bois juvénile et de bois adulte. Cette définition repose sur l'étude de l'évolution des propriétés du bois en fonction de l'âge depuis la moelle. Les propriétés du bois sont très variables dans la zone de bois juvénile et sont plus constantes dans le bois adulte (Zobel et *al.* 1989).

En se basant sur l'étude de la variation de l'angle des microfibrilles, le diamètre des vaisseaux, les modules de rupture et de cisaillement et la largeur de cernes, Bhat et *al.* (2001) situent la limite bois juvénile-bois adulte entre le 15<sup>ème</sup> cerne et le 20<sup>ème</sup> cerne compté depuis la moelle chez le Teck. Kedharnath et *al.* (1963), en prenant comme critère la variation de la longueur des fibres, situent la zone du bois juvénile chez les tecks âgés de 60 ans en plantation en Inde au niveau des neuf premiers cernes à partir de la moelle. De même, Sanwo (1987), considère les neuf premiers cernes comme étant le zone de bois juvénile chez le Teck en plantation au Nigeria. Il y a lieu de noter que la détermination de la zone juvénile chez un arbre donnée dépend fortement des "marqueurs" de l'état juvénile choisis et par conséquent, la définition de la limite bois juvénile-bois adulte chez une espèce peut être très variable suivant les références considérées.

L'étude de la variabilité des propriétés physiques et mécaniques chez le teck présente un grand intérêt puisqu'il est souvent admis que les plantations de teck issus de sylviculture intense ont un bois moins dense (et par conséquent des propriétés mécaniques plus faibles) que ceux issus de sylviculture "classique" (Bryce 1966). Les études récentes sur le bois de teck en Inde (Bhat 1995 ; Bhat et *al.* 2001) montrent que dans les plantations à croissance

rapide, la densité du bois en phase juvénile n'est pas significativement différente de celle du bois adulte. De même, les études sur les propriétés mécaniques du bois de teck en plantation au Nigeria (Sanwo 1987) démontrent que les propriétés mécaniques (module d'élasticité et module de rupture) du bois en phase juvénile ne sont pas significativement différentes de celles du bois adulte. Ces observations si elles se confirment, posent la question sur la réduction de la durée de rotation dans les plantations de teck. En effet, pour des raisons d'ordre économiques, les gestionnaires et aménageurs proposent une réduction de la durée de rotation dans les plantations (25-30 ans au lieu de 60-70 ans) (Baillères et Durand 2000, Bhat et Okuyama 1997). *A priori*, cette réduction ne sera pas sans conséquence sur les propriétés physiques et mécaniques du bois. Mais il semblerait que chez le teck en plantation, le bois en phase juvénile ne présente pas de densité et de propriétés mécaniques très inférieure à celui du bois adulte (Sanwo 1987). Les jeunes tecks âgés de 8 ans en Inde sont seulement de 5% moins denses que des tecks plus âgés (51-52 ans) (Bhat 1995).

### **3.1 - Caractéristiques généraux du bois de teck**

Les caractéristiques des grumes, la structure, l'aspect et les propriétés technologiques (en annexe) du bois de teck ont été décrits en détail (CTFT 1990). Les cernes sont généralement bien visibles après un ponçage au grain fin. L'aubier, large de 2 à 6 cm est nettement différencié du bois parfait par sa couleur blanc jaunâtre. Le Teck se présente comme un bois mi-lourd, mi-dur, à retrait faible et peu nerveux. Le bois contient une oléorésine qui le rend gras au toucher ; il se révèle également siliceux et se prête bien aux assemblages.

### 3.2 - Matériel végétal

31 arbres sélectionnés de façon aléatoire du lot des 80 arbres abattus pour la mesure du pourcentage de bois de cœur décrits en chapitre 2, ont servis pour l'étude de la densité du bois et du module d'élasticité longitudinal (Fig.3.1). Après avoir prélevé les rondelles, un plateau dans le plan radial, de la moelle à l'écorce a été découpé sur chaque arbre à 1,30 m de hauteur du tronc. Les plateaux ont environ 55 cm de longueur et 5 cm d'épaisseur (Fig.3.2). Ils ont été stabilisés à 12% d'humidité dans une chambre conditionnée (température de 20°C et 65% d'humidité pendant 3 mois) jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Ils ont ensuite été débités en barreaux dont le nombre dépend de la largeur du plateau diamétral. Chaque barreau a été découpé en deux éprouvettes (A et B) de **500 mm x 15 mm x 20 mm (éprouvette type 1)** selon les directions longitudinale, tangentielle et radiale (L, T, R). Au total 8 éprouvettes (**éprouvette type 1**) si possibles (parfois moins) ont été découpées par arbre dans le duramen et une éprouvette dans l'aubier en fonction de sa largeur.

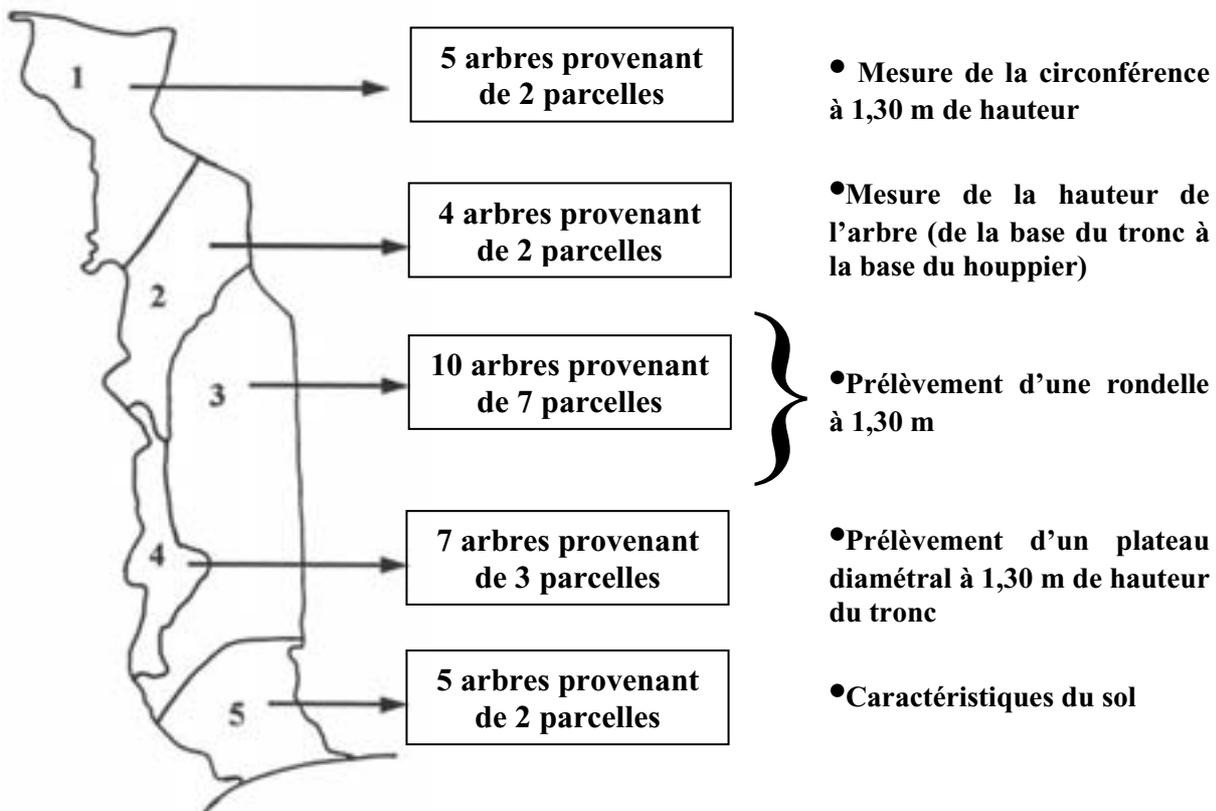
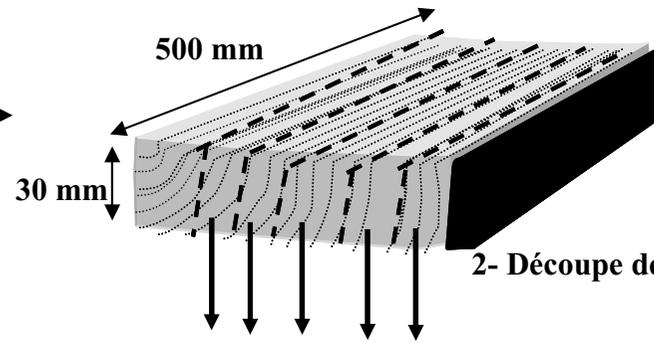
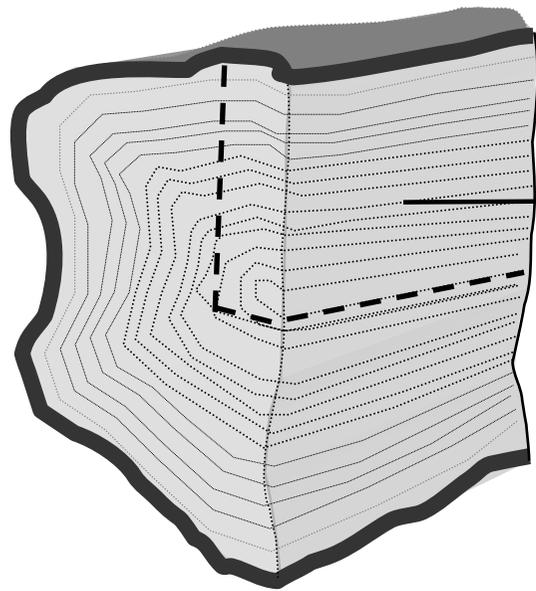
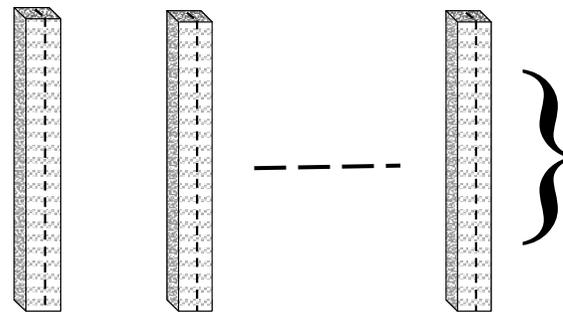


Figure 3.1 : Répartition des arbres par zones écologiques

1- Prélèvement d'un plateau diamétral dans le tronc



2- Découpe de barreaux suivant le fil du bois



N = 3 à 5 barreaux par arbre  
selon la largeur du plateau diamétral  
L = 500 mm  
R = 20 mm  
T = 30 mm

3 – Chaque barreau a été découpé en 2 éprouvettes A et B qui ont servi aux mesures de densité et du module d'élasticité longitudinal  
L = 500 mm  
T = 15 mm  
R = 20 mm  
Les éprouvettes A et B sont appelées "épreuve type 1"

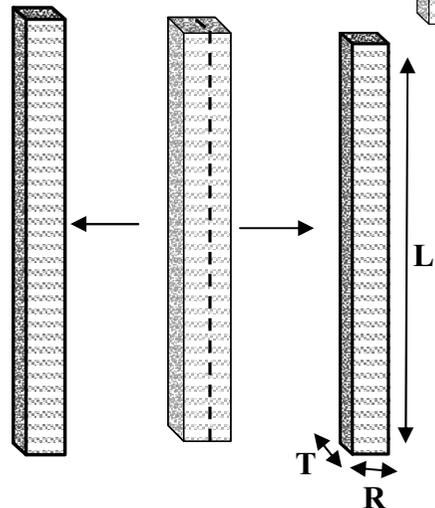


Fig.3.2 : Schéma général de l'échantillonnage des éprouvettes de densité et du module d'élasticité longitudinal, toutes les éprouvettes ont été prélevées à 1,30 m de hauteur du tronc.

La position dans l'arbre de chaque éprouvette a été rigoureusement identifiée par l'âge cambial (cerne central de l'éprouvette) et la distance à la moelle. L'âge cambial correspond à l'âge compté depuis la moelle (Thibaut 1997). La densité et le module longitudinal ont été mesurés sur 238 éprouvettes (éprouvette type 1) au total (Tableau 3.1).

Zone écologique	1	2	3	4	5
Nombre d'arbre	5	4	10	7	5
Effectif des éprouvettes type 1	31 (3)	36 (2)	58 (5)	54 (7)	42 (0)

**Tableau 3.1 : Récapitulatif des éprouvettes ayant servi aux mesures de densité et de module d'élasticité longitudinal.** Les valeurs en caractères normales et entre parenthèses (en caractères italiques) correspondent respectivement aux effectifs des éprouvettes de bois de cœur et d'aubier.

### 3.3 – Mesure de la densité à 12% et du module d'élasticité longitudinal $E_L$ : Méthode

La densité du bois a été mesurée sur chaque éprouvette à l'aide d'une balance et d'un pied à coulisse servant à mesurer les côtes (hauteur et largeur) de l'éprouvette en trois points de sa longueur. Les éprouvettes ont ensuite été pesées pour obtenir leur masse  $M$  (g). La densité du bois a été calculée avec l'équation 3

$$D \text{ (kg/m}^3\text{)} = M/V \quad \text{équation [3].}$$

$$\text{Avec } V \text{ (m}^3\text{)} = L_e \times L \times e$$

$$L_e \text{ (m)} = \text{longueur de l'éprouvette à 12\% d'humidité}$$

$$L \text{ (m)} = \text{largeur moyenne de l'éprouvette à 12\%}$$

$$e \text{ (m)} = \text{hauteur moyenne de l'éprouvette à 12\%}$$

$L$  et  $e$  sont les moyennes de trois mesures sur la longueur. L'incertitude relative sur cette mesure est faible, elle est de l'ordre de 3% (Gerard 1994, Dumonceaud 2001).

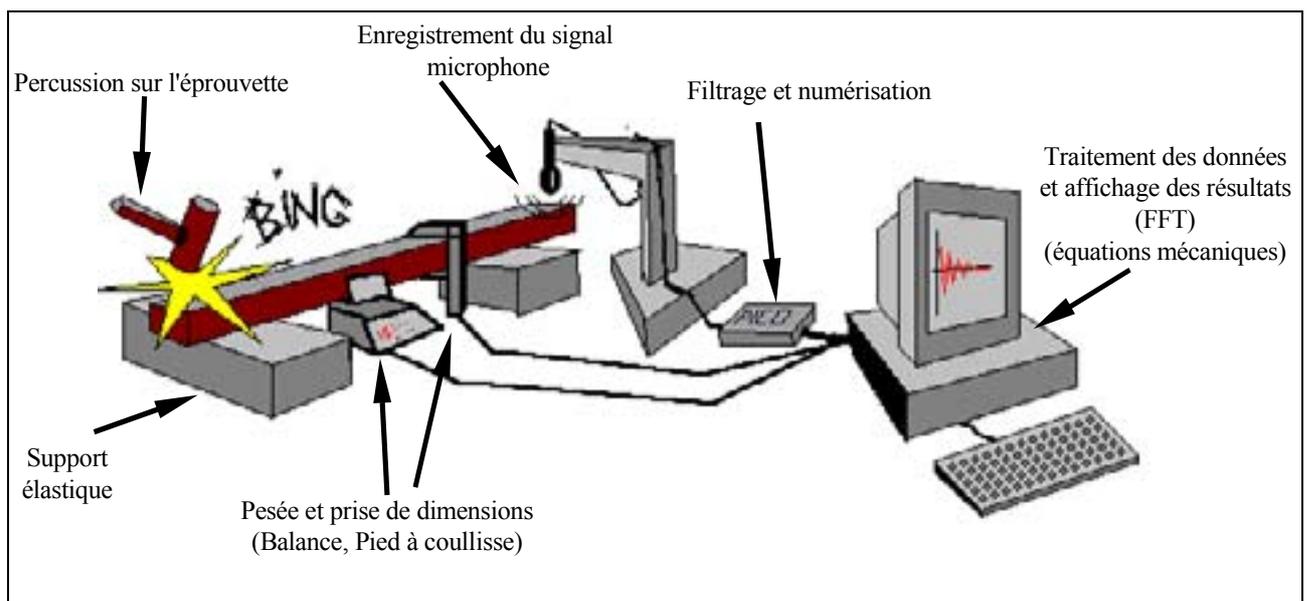
Le module d'élasticité longitudinal a été mesuré grâce à l'appareillage développé au Cirad-forêt ([http://www.indexld.com/bing/description\\_detail\\_bing.htm](http://www.indexld.com/bing/description_detail_bing.htm)). La méthode retenue utilise le principe de l'analyse spectrale des vibrations naturelles de flexion. Ce procédé permet de déterminer les fréquences propres d'une poutre à partir de sa réponse à une excitation impulsionnelle appliquée à une des extrémités de façon à solliciter simultanément tous les

modes propres de vibration. Ce dispositif peut être utilisé pour des pièces couvrant une large gamme de dimensions. Des procédures nommées BING pour la sélection des fréquences à travers un programme informatique ont été développées par le CIRAD (Baillères et *al.* 1998).

L'essai peut être décrit comme suit (Fig.3.3) :

- mesure des dimensions et de la masse de l'éprouvette (voir mesure densité) ;
- positionnement sur les supports élastiques ;
- application d'un choc à l'une des extrémités de l'éprouvette.

La réponse est enregistrée à l'autre extrémité au moyen d'un microphone disposé perpendiculairement à l'axe de l'éprouvette. Les vibrations sont ensuite transmises à un ordinateur. Le signal est traité par une procédure FFT (transformé de Fourier). Un ajustement sur les premiers modes, basée sur la théorie de Timoshenko sur les poutres flottantes permet alors la détermination du module d'élasticité.



**Fig.3.3 : Schéma de l'essai relatif à la mesure du module d'élasticité  $E_L$ .**

Le principe de calcul repose sur l'exploitation de l'équation du mouvement donnée par Timoshenko à partir d'hypothèses simplificatrices. Bordonné (1989) donne une solution approchée de cette équation tout à fait acceptable (erreur inférieure à 0,5%) :

$$\left(\frac{E}{\rho}\right)_k = \frac{(2\pi f_k L)^2}{\alpha X_k} \left[ 1 + \alpha F_{1k}(m_k) + \alpha \frac{E}{KG} F_{2k}(m_k) - \frac{\alpha \rho (2\pi f_k L)^2}{KG} \right]$$

Avec :

$\alpha = \frac{I}{AL^2}$  et I module d'inertie, A aire de la section, L longueur de l'éprouvette

$I = \frac{bh^3}{12}$  H hauteur, b largeur de l'éprouvette

G module de cisaillement

E module d'élasticité

$\rho$  masse volumique

K facteur de forme , il vaut 5/6 si l'on applique les hypothèses de la résistance des matériaux pour des poutres de section rectangulaire.

$$\alpha = \frac{h^2}{12L^2}$$

$X_k = m_k^4$  avec  $m_k$   $k^{ieme}$  solution de  $\cos(m)ch(m) = 1$

$K = \frac{5}{6}$  coefficient de forme

$$F_{1k} = \Theta^2(m_k) + 6\Theta(m_k)$$

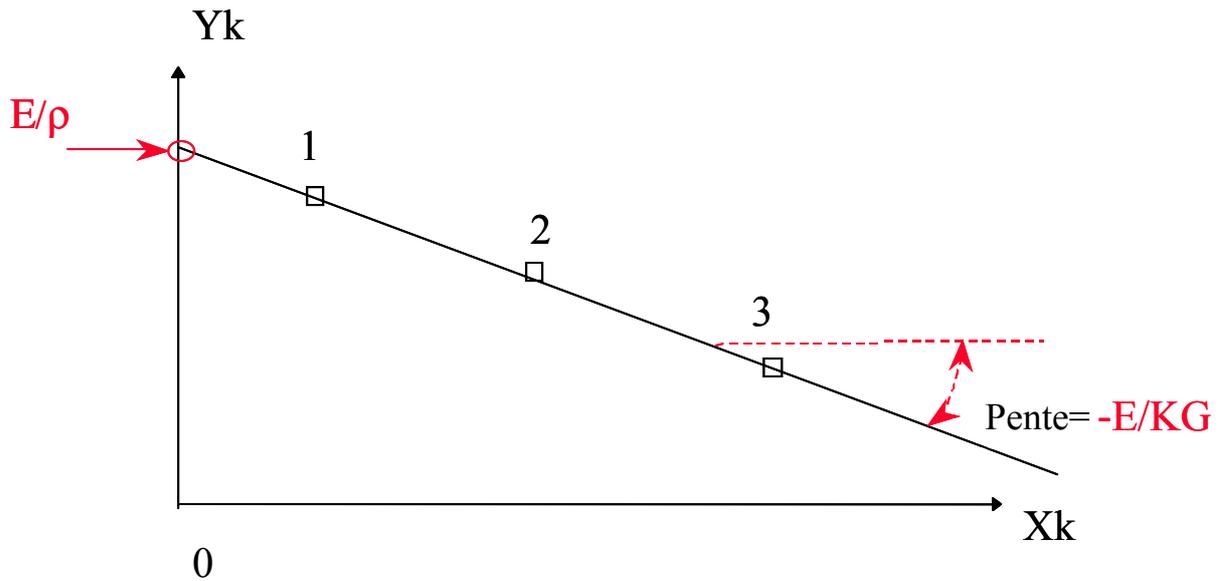
$$F_{2k} = \Theta^2(m_k) - 2\Theta(m_k)$$

$$\Theta(m_k) = m_k \frac{tg(m_k)th(m_k)}{tg(m_k) - th(m_k)}$$

En séparant les termes on obtient une équation linéaire sur  $x_k, y_k$ :

$$y_k = -\frac{E}{kG}x_k + \frac{E}{\rho} \quad \text{avec} \quad x_k = \frac{4\pi^2 l^2 f_k^2 F_{2k}}{X_k} \quad \text{et} \quad y_k = \frac{4\pi^2 l^2 f_k^2 (1 + \alpha F_{1k})}{\alpha X_k}$$

$E/\rho$  est donc l'ordonnée à l'origine et  $E/kG$  la pente de la droite passant par les points  $(x_k, y_k)$ ; on détermine ces coefficients par régression linéaire sur au moins trois modes de vibration (Fig.3.4).



**Fig.3.4 : Plan de régression sur les termes de la solution de Bordonné (1989).**

Bordonné (1989), Brancheriau et Baillères (2001) ont montré que cette méthode est très précise pour déterminer  $E$  avec un élancement ( $L/h$ ) supérieur à 10 et pour les cinq premiers modes de vibration. Dans cette étude les trois premiers modes de flexion ont été retenus. Des essais comparatifs ont révélé que les résultats obtenus par la méthode Bing sont parfaitement corrélés à ceux obtenus par les méthodes conventionnelles (flexion 3 et 4 points). Ces essais ont été réalisés sur des éprouvettes de diverses dimensions avec ou sans défauts (Bordonné 1989 ; Gerard 1994 ; Baillères et *al.* 1998).

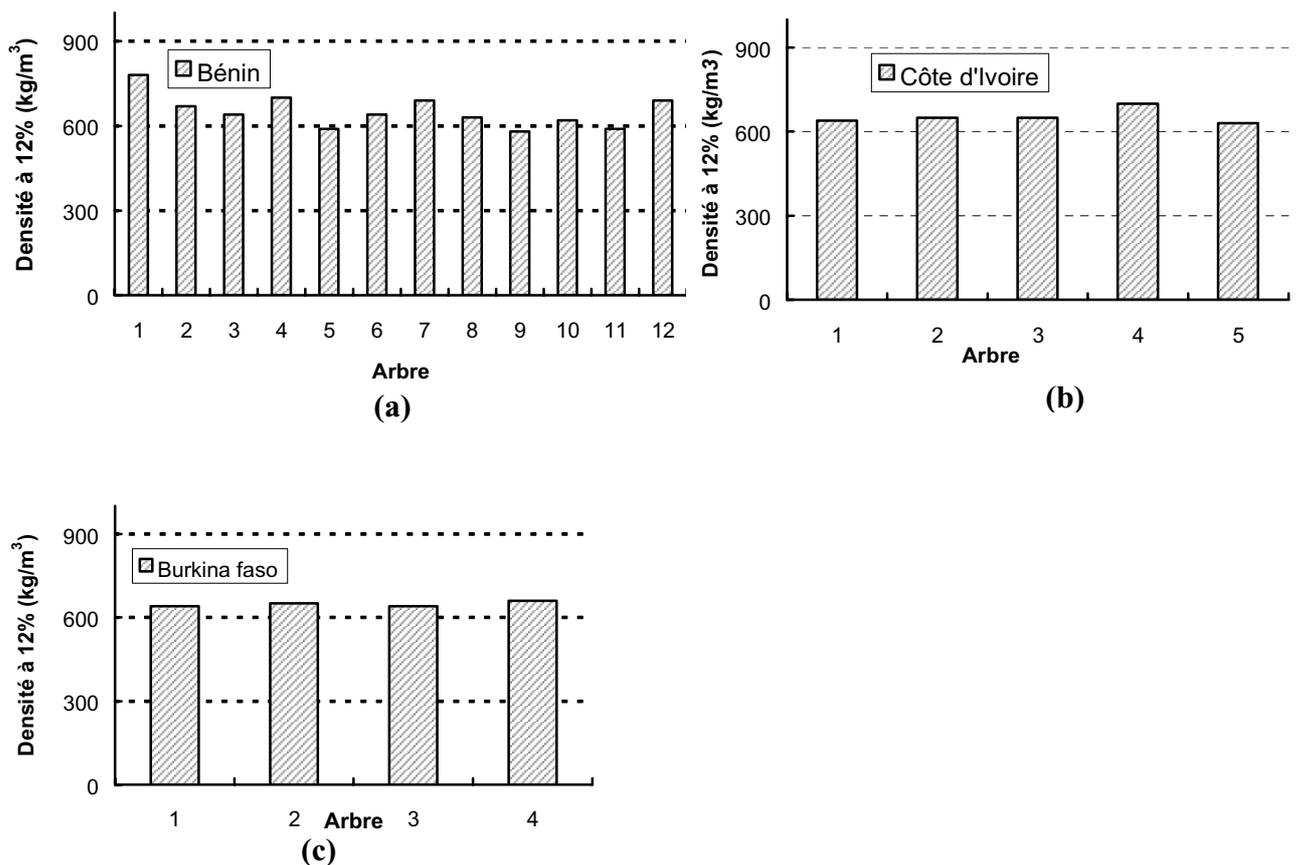
Afin de comparer les résultats obtenus sur les plantations du Togo à d'autres provenances de teck, des analyses de variance ont été réalisées sur ces deux propriétés ( $E_L$  et densité du bois à 12%) à l'aide du test de Fisher. Ce même type d'analyse a servi à comparer les valeurs moyennes par arbre d'une zone écologique à l'autre. Les analyses de régression linéaire ont permis d'étudier l'effet de l'âge cambial (nombre de cernes compté depuis la moelle) et l'effet de l'âge des arbres sur les propriétés physiques et mécaniques.

### 3.4 – Résultats

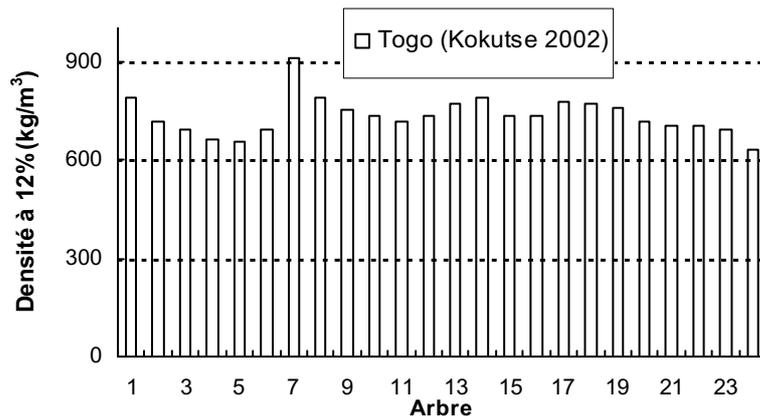
#### 3.4.1 – Densité

##### 3.4.1.1 – Valeurs moyennes par arbres – comparaison avec d'autres provenances de teck

Les densités moyennes par arbre du teck en plantation sont tout à fait comparables à celles des individus en forêt naturelle. Les valeurs moyennes des échantillons à 12% d'humidité des forêts naturelles Indonésienne, Thaïlandaise et de Myanmar sont respectivement de 690 ; 620 et de 700 kg/m<sup>3</sup> (Baillères et Durand 2000). Le bois de teck issus des plantations du Bénin, de la Côte d'Ivoire, du Burkina Faso et du Togo a une densité moyenne de 650 kg/m<sup>3</sup> (Fig.3.5 et Fig.3.6).



**Fig.3.5 : Densités moyennes par arbres**, les tecks sont issus de plantations âgées d'environ 30 ans. Il s'agit des valeurs moyennes par arbre pour au moins une dizaine d'échantillons pour chaque individu. Les essais sont réalisés selon les normes AFNOR et à 12% d'humidité. Les valeurs sont extraites de la base de données du Cirad – forêt sur les propriétés du bois (Baillères et Durand 2000).

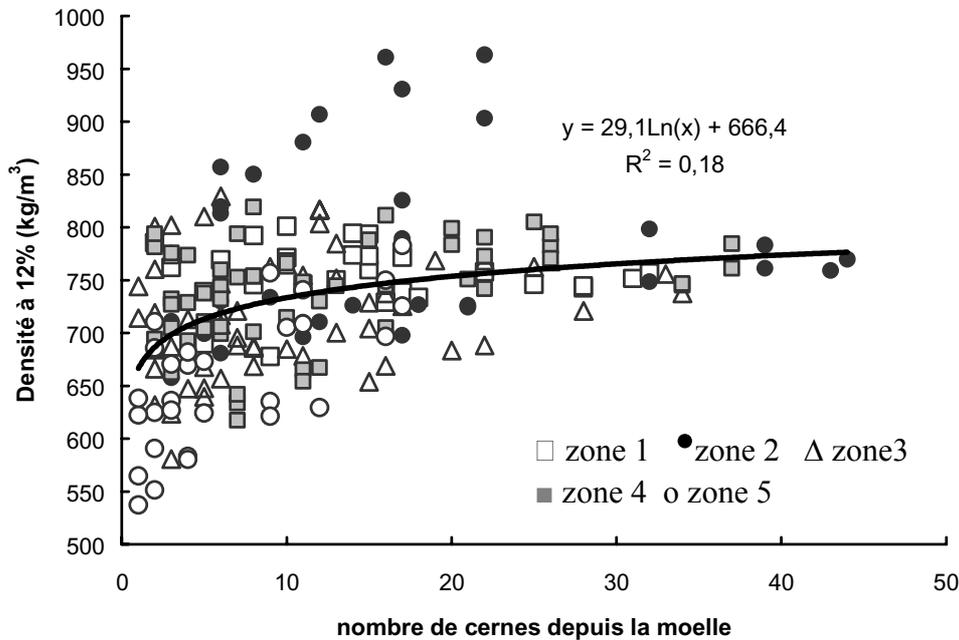


**Fig.3.6 : Densité moyenne par arbre des individus âgés de plus 30 ans du Togo (Kokutse 2002).**

Cependant, au sein même des individus en plantation, on note parfois une variabilité inter-arbre importante, ce qui est surtout le cas du Bénin et du Togo. Les plantations de ces deux pays ont des valeurs moyennes de densité du bois très élevées, allant jusqu'à  $900 \text{ kg/m}^3$  (Fig.3.6 et Fig.3.5a) et aussi des valeurs faibles ( $600 \text{ kg/m}^3$ ). L'écart maximum de densité moyenne entre arbre est du même ordre pour les deux pays (8-9%). Celui des tecks du Burkina est de 0,9% et celui de la Côte d'Ivoire est de 2,7%. Comparées aux valeurs moyennes obtenues par arbre dans les deux derniers pays, les plantations de teck du Togo et Bénin sont très hétérogènes en ce qui concerne la densité du bois.

### 3.4.1.2 - Variabilité intra-arbre

L'analyse de la densité en fonction du nombre de cernes compté depuis la moelle montre que la densité est significativement corrélée à l'âge cambial ( $R^2 = 0,18$  ;  $P < 0,001$ ).



**Fig.3.7 : Variation de la densité en fonction du nombre de cernes compté depuis la moelle (échantillons duramen, tous arbres confondus).**

La dispersion autour de la courbe de régression est très importante. Cette variabilité s'explique par la présence du bois juvénile. Sur la période comprise entre 0 et 25 ans, la densité est très hétérogène (Fig.3.7). Le coefficient de variation est très élevé (10,0%). Cette hétérogénéité tend à s'atténuer lorsque le bois devient plus mature, le coefficient de variation est seulement de 2,7% au delà de 25 ans. Ce qui signifie que la densité sera très hétérogène lorsque les arbres sont jeunes et aura tendance à devenir plus homogène avec l'âge. Ce phénomène est bien illustré par quelques exemples typiques (Tableau 3.2).

N° arbre	Age en année	Densité de la moelle vers l'écorce (kg/m <sup>3</sup> )		Moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	Coeff. de variation (%) 0-25 ans	Coeff. de variation (%) 25-60 ans
		0-25 ans	25-60 ans			
32	37	639, 687, 684, 737	762, 720, 738, 755	715	5,8	2,5
50	67	819, 850, 880, 906, 960, 930	903, 963, 933, 935	908	5,8	2,6
51	67	813, 857, 789, 825	798, 748, 761, 782, 759, 770	790	3,4	2,3
73	43	694, 662, 760, 705, 715, 667, 745	799, 794, 770	730	5,2	2,0
70	40	732, 776, 794, 819, 811, 788	782, 805, 761, 784	785	3,9	2,3

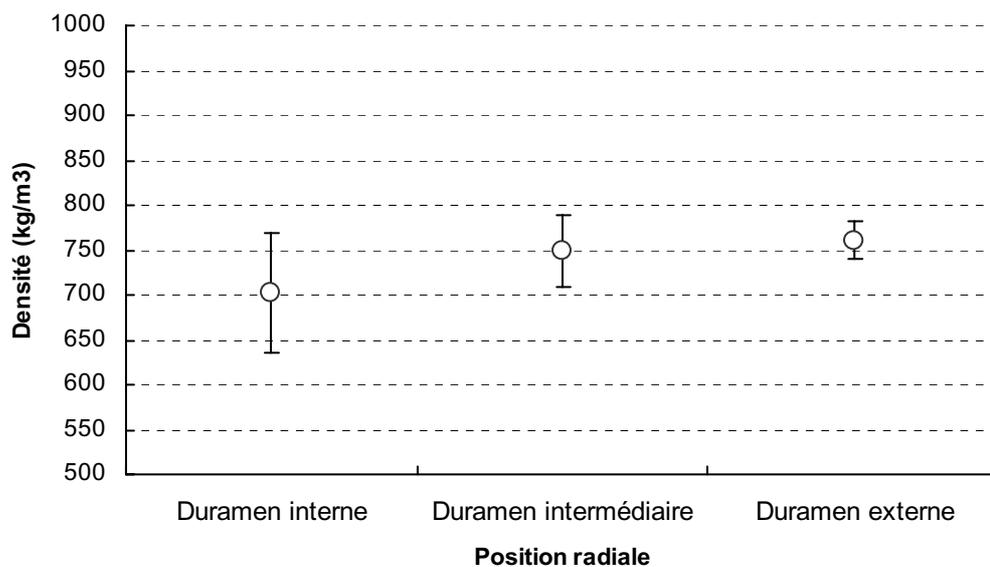
**Tableau 3.2 : Evolution de la densité sur le rayon pour 5 tecks à 1,30 m de hauteur, la densité est très hétérogène dans la zone 0-25 ans et se stabilise dans la zone 25-60 ans.**

L'influence de la position radiale sur la densité a été analysée à partir des valeurs mesurées sur 139 éprouvettes prélevées selon 3 positions dans le duramen. Les éprouvettes de duramen interne, intermédiaire et externe correspondent respectivement à des positions radiales de 5-10 ans, 20 ans, et 30-50 ans, il s'agit du nombre de cernes comptés de la moelle vers l'écorce (Tableau 3.3).

Position radiale	Duramen interne	Duramen intermédiaire	Duramen externe
Age cambial correspondant	5-10 ans	20 ans	30-50 ans

**Tableau 3.3 : Positionnement des éprouvettes sur le rayon.**

L'analyse de variance montre que le duramen interne diffère significativement du duramen intermédiaire ( $P=0,001$  ;  $F_{117,1}=11,00$ ) et du duramen externe ( $P<0,001$  ;  $F_{112,1}=4,11$ ). Par contre, le duramen intermédiaire et le duramen externe ne sont statistiquement différents. Cet effet position radiale se traduit par une augmentation de la densité du cœur vers la périphérie de l'arbre (Fig.3.8). En moyenne, le duramen interne est d'environ 8% moins dense que le duramen externe et ce dernier a une densité supérieure d'environ 3% au duramen intermédiaire. Cet effet est celui du passage progressif du bois de la phase juvénile à l'état adulte.

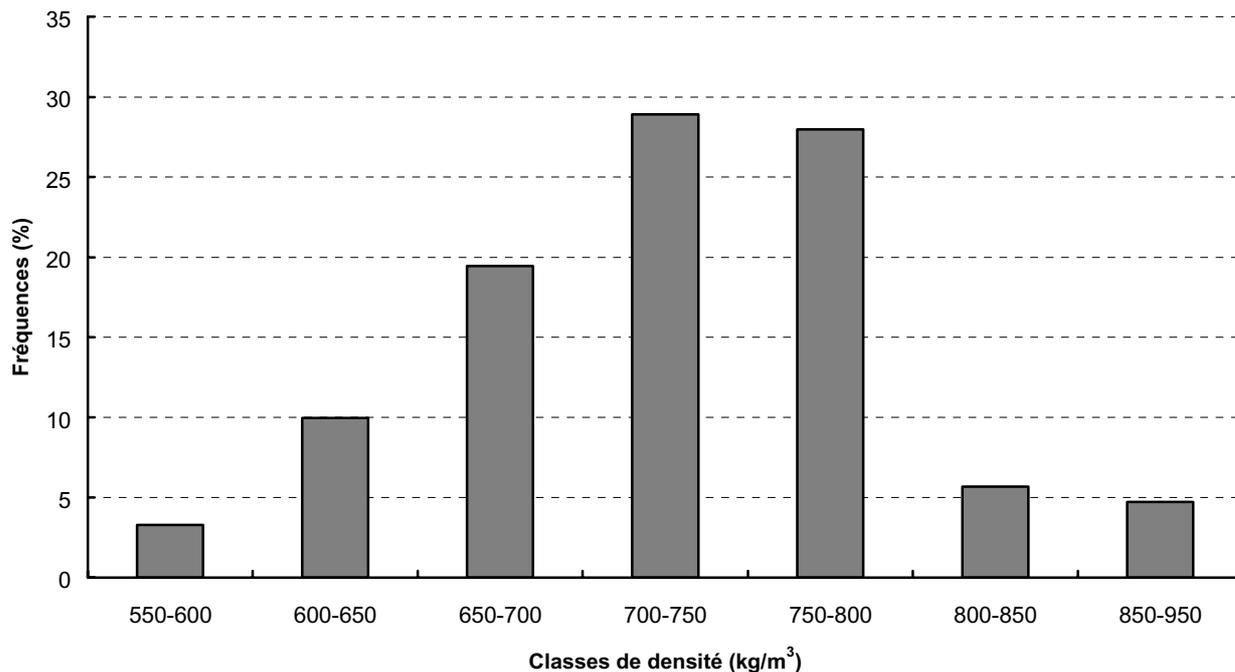


**Fig.3.8 : La densité du duramen interne du teck diffère significativement de celle du duramen intermédiaire et externe, les valeurs sont des moyennes  $\pm$  écart-type.**

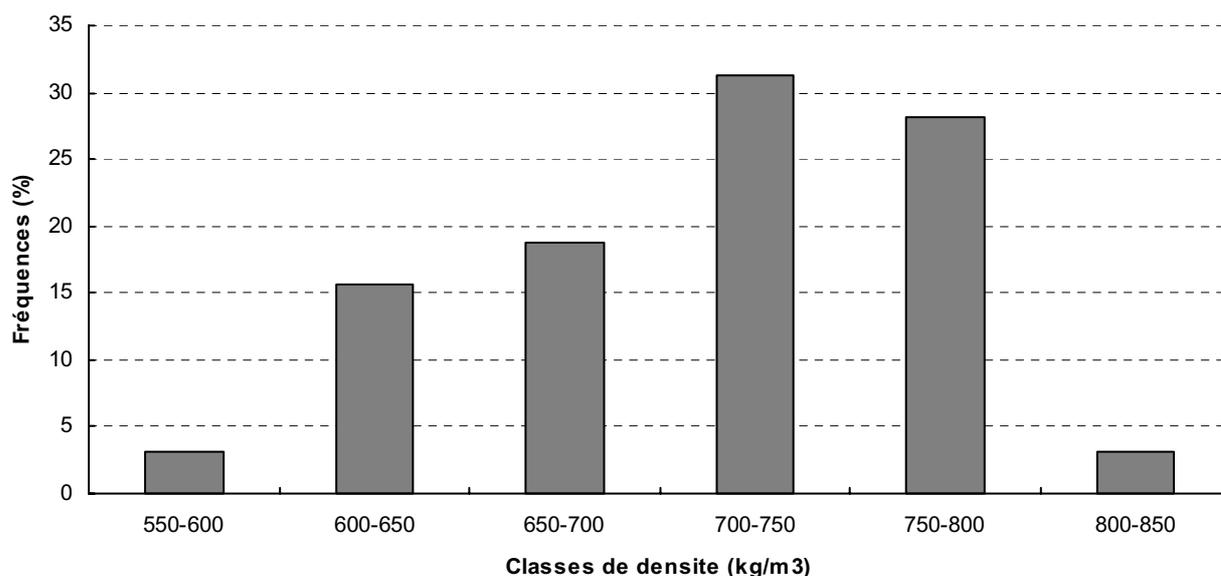
### 3.4.1.3 - Variabilité inter-arbre : effet de l'âge de l'arbre

La distribution des valeurs de densité mesurées sur 238 éprouvettes (bois de cœur et aubier) prélevées sur les 31 arbres et celle des densités moyennes par arbre a été réalisée (Fig.3.9 et Fig.3.10). Environ 80% des éprouvettes et des arbres ont une densité comprise entre 650 et 800 kg/m<sup>3</sup>. Un seul arbre présente une densité moyenne inférieure à 600 kg/m<sup>3</sup>, il s'agit d'un individu jeune de 11 ans. A peu près 12% des éprouvettes ont une densité largement au dessus de la moyenne de l'échantillon c'est-à-dire comprise entre 800 et 900 kg/m<sup>3</sup> et parmi les individus âgés de plus de 60 ans, un arbre est très particulier avec une densité moyenne par arbre de 900 kg/m<sup>3</sup>.

L'âge est positivement lié à la densité du bois à 1,30 m de hauteur (Fig.3.11). La densité des jeunes tecks de 11-16 ans est significativement différente ( $646,7 \pm 54,9 \text{ kgm}^{-3}$ ) de celle des tecks de 40-45 ans ( $738,7 \pm 38,0 \text{ kgm}^{-3}$ ) ( $F_{10,1} = 9,48$  ;  $P=0,01$ ) et de celle des arbres de 67-70 ans ( $779,4 \pm 77,26$ ) ( $F_{10,1} = 9,79$  ;  $P=0,01$ ). Cependant, l'effet "âge de l'arbre" sur la densité n'est pas significatif entre les arbres de 40-45 ans et ceux 67-70 ans. Les tecks de 40-45 ans sont seulement de 10% moins denses que les tecks de 70 ans. Cet effet est étroitement lié au passage du bois de la phase juvénile à l'état adulte. La densité moyenne de l'arbre varie énormément dans le jeune âge et se stabilise ensuite vers 30 ans, âge à partir duquel, elle ne varie plus de façon significative.



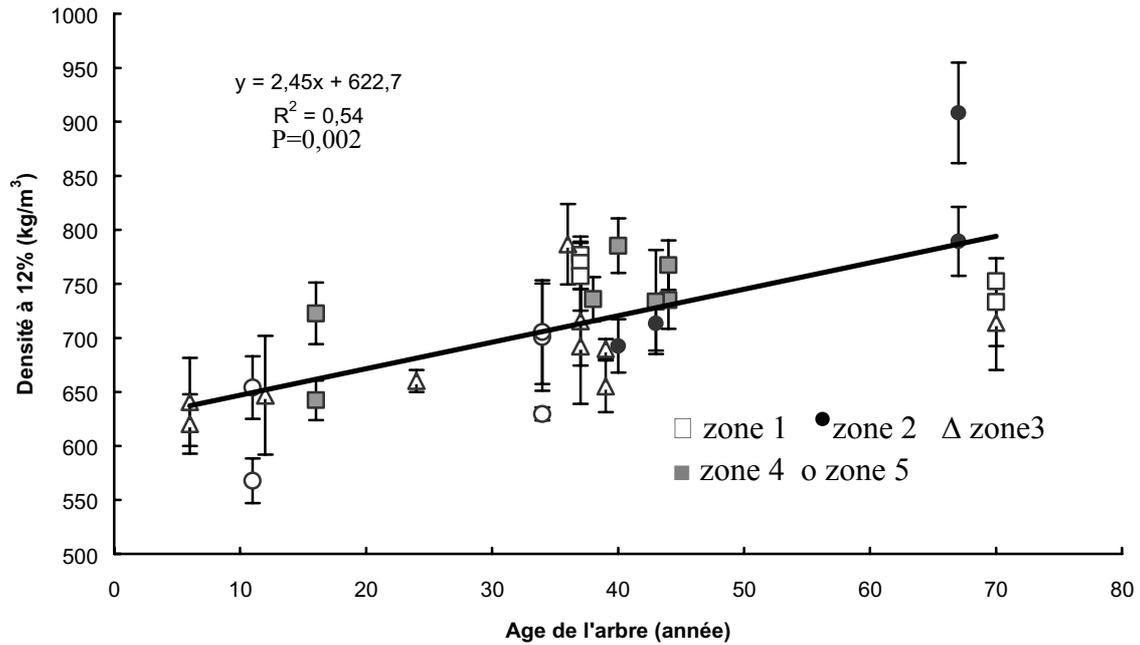
**Fig.3. 9 : Distribution des densités (238 éprouvettes, tous arbres confondus).**



**Fig.3.10 : Distribution des densités moyenne par arbres (31).**

#### **3.4.1.4 - Variabilité inter arbre : effet de la zone écologique**

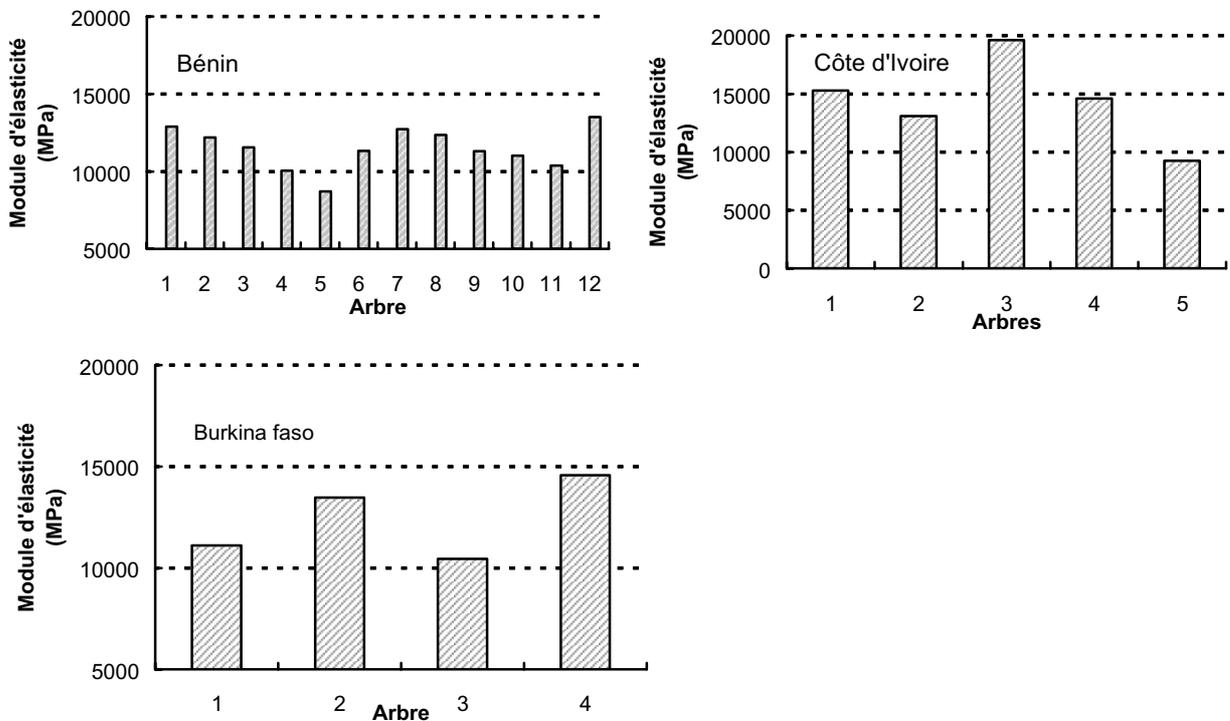
L'analyse de variance réalisée sur les valeurs moyennes de densité par arbres montre qu'il n'existe pas un effet "zone écologique", c'est-à-dire que les 31 arbres ne diffèrent pas significativement du point de vue de la densité d'une zone écologique à l'autre (Fig.3.11).



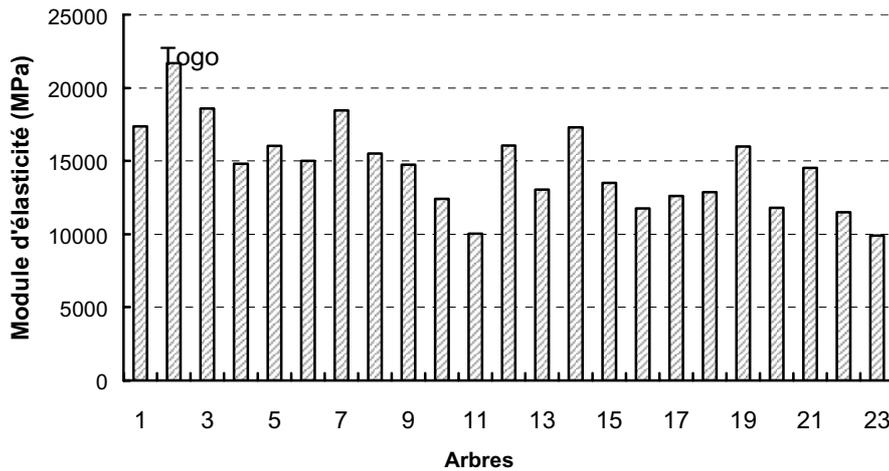
**Fig.3.11: Moyennes et écart-type des densités par arbre et relation entre l'âge de l'arbre et la densité à 1,30 m de hauteur du tronc.**

### 3.4.2 – Le module d'élasticité longitudinal $E_L$

#### 3.4.2.1 – Valeurs moyennes par arbres – comparaison avec d'autres provenances de teck



**Fig.3.12 : Module d'élasticité moyen par arbre, les tecks sont âgés d'environ 30 ans. Au moins une dizaine d'échantillons ont été pris par arbre. Les essais sont réalisés selon les normes AFNOR et à 12% d'humidité. Les valeurs sont extraites de la base de données du Cirad – forêt sur les propriétés du bois (Baillères et Durand 2000).**

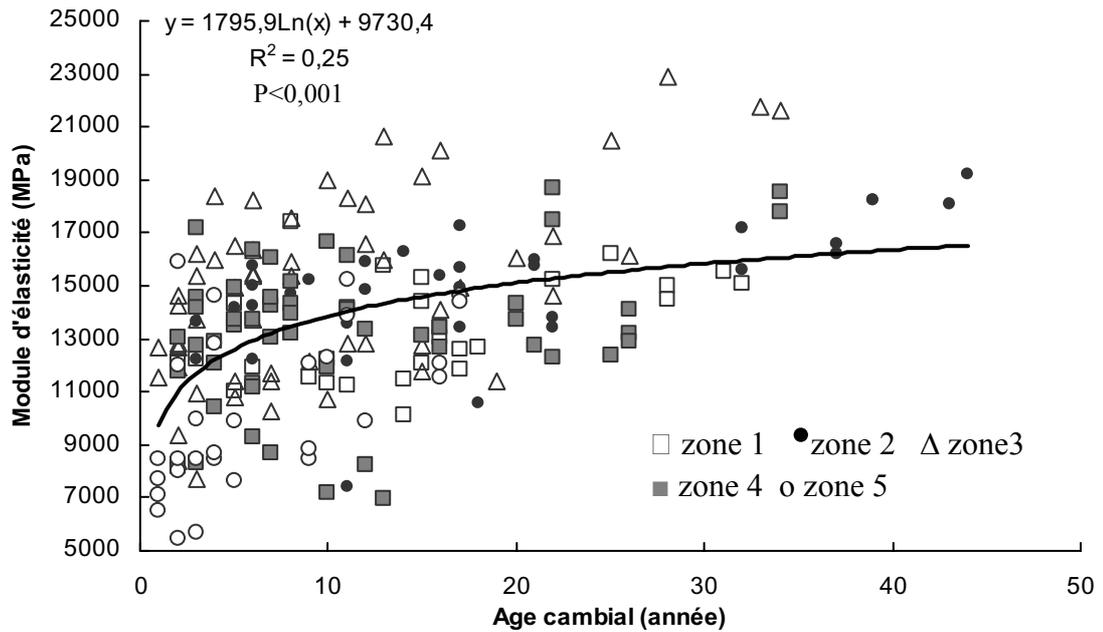


**Fig.3.13 : Module d'élasticité moyen par arbre des individus âgés de plus 30 ans du Togo (Kokutse 2002).**

Le module d'élasticité est très hétérogène d'une provenance à l'autre. Sur trois provenances de forêt naturelle, l'Indonésie-Java et la Thaïlande présentent des valeurs moyennes inférieures à 10000 MPa alors que les tecks de Myanmar ont un module d'élasticité moyen de 13000 MPa (Baillères et Durand 2000). Les tecks en plantation par contre présentent des valeurs situées entre 11000 et 14000 MPa. Le module d'élasticité longitudinal des tecks du Togo est en moyenne très proche de celui de la Côte d'Ivoire (14000 MPa). Ceux du Burkina Faso et du Bénin sont plus faibles et sont d'environ 12000 MPa (Fig.3.12 et Fig.3.13). Cependant la variabilité inter-arbre est très importante au niveau des plantations des quatre pays. La figure 3.13 montre l'exemple typique du Togo où les valeurs moyennes par arbre varient entre 10000 et 21000 MPa.

### 3.4.2.2 - Variabilité intra arbre

L'évolution du module d'élasticité mesurée sur 207 éprouvettes provenant du duramen montre une très forte variation sur le rayon (Fig.3.14). Entre 1 et 60 ans,  $E_L$  passe de 5000 MPa à 23000 MPa. Contrairement aux observations précédemment faites sur la densité, le module d'élasticité ne semble pas tendre vers une stabilisation mais augmente de façon significative avec l'âge. Si l'on prend des limites en se référant à la zone de stabilisation de la densité (0-25 et 25-60 ans), le coefficient de variation de  $E_L$  est aussi forte dans le jeune âge (23%) que dans la zone de bois âgés (19%).



**Fig.3.14 : Variation du module d'élasticité longitudinal en fonction du nombre de cernes compté depuis la moelle (échantillons de duramen, 31 arbres).**

Le module d'élasticité est significativement lié au nombre de cernes compté depuis la moelle donc à la position radiale ( $R^2 = 0,24$  ;  $P < 0,001$ ). Comme pour la densité, il existe une importante dispersion autour de la courbe. L'analyse de variance montre que les échantillons prélevés dans le jeune âge (0-25 ans) diffèrent significativement de celles prélevées dans la zone 25-60 ans du point de vue de  $E_L$  ( $F_{201,1} = 36,48$  ;  $P < 0,001$ ). Les échantillons de la zone 25-60 ans ont un module d'élasticité ( $E_L = 16704 \pm 3158$  MPa) largement supérieure à celles des échantillons moins âgés 0-25 ans ( $E_L = 13163 \pm 2976$  MPa).

### 3.4.2.3 Variabilité inter-arbre : effet de la zone écologique

La distribution du module d'élasticité longitudinal mesuré sur 238 éprouvettes prélevées sur les 31 arbres est donnée par les figures 3.15 et 3.16. Les individus jeunes (6-11 ans) sont ceux qui présentent les modules d'élasticité les plus faibles (6000-9000 MPa) (Fig.3.14).

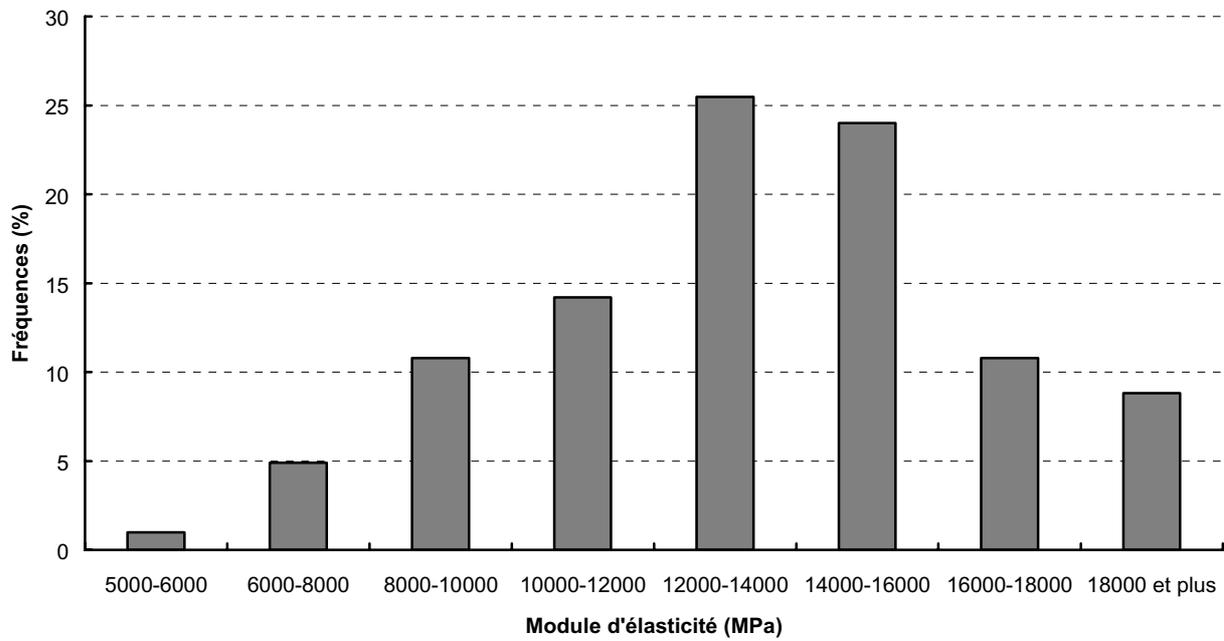


Fig.3.15 : Distribution de  $E_L$  (238 éprouvettes de bois de cœur).

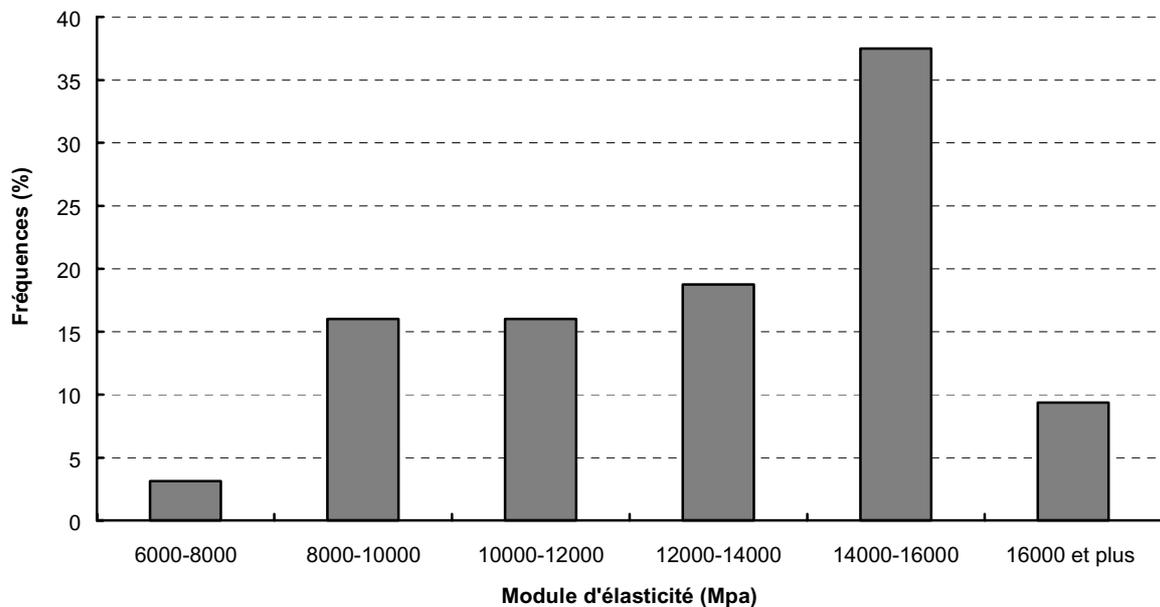


Fig.3.16 : Distribution de  $E_L$  par arbre.

L'analyse de variance montre qu'il n'existe pas un effet zone écologique sur le module d'élasticité c'est à dire que les arbres ne diffèrent pas significativement du point de vue de  $E_L$  selon la zone écologique où ils ont poussés. Néanmoins, des différences importantes existent entre arbres adultes,  $E_L$  varie de 9000 à 20000 MPa, ce qui pourrait justifier un classement mécanique du bois.

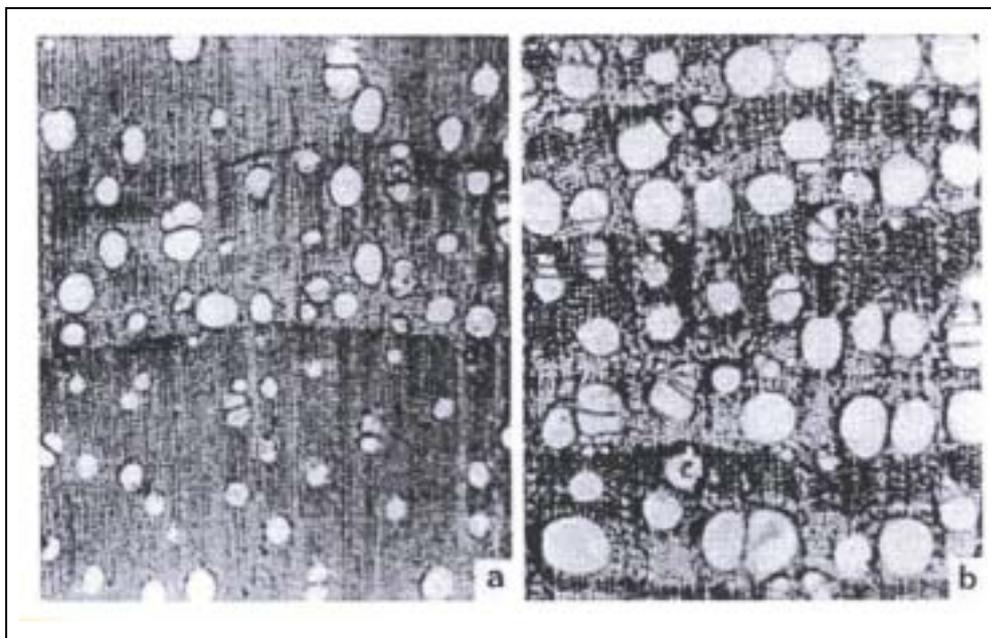
## **Conclusion**

Le bois de teck en plantation au Togo est aussi dense que ceux en plantation dans d'autres régions du monde (Bhat 1995 ; Baillères et Durand 2000 ; Sanwo 1986 et 1987 ; Bhat et *al.* 2001, Kjaer et *al.* 1995). Sur 238 éprouvettes mesurées, environ 80% ont une densité comprise entre 650 et 800 kg/m<sup>3</sup>. L'étude de l'évolution de la densité sur le rayon montre qu'il existe un effet significatif de la position radiale lié à la présence du bois juvénile. En considérant la zone de bois juvénile comme celle correspondant à la zone de forte hétérogénéité de la densité (Zobel et *al.* 1989), la limite du bois juvénile se situerait autour de 25 ans chez le teck en plantation au Togo. Les connaissances usuelles sur le bois juvénile montrent qu'une stabilisation des propriétés du bois peut être atteinte à des âges plus avancés, en particulier pour la densité (Baillères 1994) et pour les caractéristiques anatomiques (diamètre et pourcentage des vaisseaux, longueur des fibres) (Bhat et *al.* 2001).

Même s'il existe une relation significative entre la position radiale et la densité du bois, cette dernière varie relativement peu de la moelle vers l'écorce lorsqu'on considère les arbres pris individuellement. Chez les individus de plus de 20 ans, le bois prélevé au niveau du duramen externe est au maximum de 10% plus dense que le bois proche de la moelle. La densité du bois varie très peu une fois que l'arbre a dépassé l'âge de 25-30 ans. En moyenne, les individus de 35-45 ans ont du bois environ 10% moins denses que ceux de 67-70 ans. Il n'existe pas de différence significative de la densité du bois entre les arbres de 40-45 ans et ceux de 67-70 ans. Les diverses études sur la qualité du teck (Krishnapillay 2000) en plantation dans le monde ont, par ailleurs, montré que les jeunes arbres n'étaient pas nécessairement inférieurs aux arbres plus âgés du point de vue de la densité. Ce qui pourrait signifier que le bois de teck en phase juvénile est presque aussi dense que le bois adulte. Cependant, il faudrait tenir compte de la grande variabilité entre les individus surtout dans le cas particulier du Togo. Bhat et *al.* (2001), attribuent cette faible différence de densité entre ces deux types de bois chez le teck au pourcentage très élevé de vaisseaux dans les cernes du

bois "mature"(Fig.17). En section transversale, le bois adulte renfermait très peu de fibres (éléments qui assurent la fonction de résistance mécanique). En effet, la densité du bois dépend de la proportion relative des fibres par rapport aux éléments de vaisseaux (Keller 1994).

La densité semble peu variable une fois que le bois devient mature. Par conséquent, dans les plantations de teck à croissance rapide, la densité du bois ne serait pas forcément inférieure à celle des plantations "classique", mais il faudrait s'attendre à une hétérogénéité marquée de la densité, les tecks issus de plantation à croissance rapide contenant une plus forte proportion de bois en phase juvénile (Bhat et *al.* 2001).



**Fig.3.17 : Coupe transversale dans le bois juvénile (a) et dans le bois adulte (b) du teck (Bhat et *al.* 2001).**

Contrairement à la densité qui peut devenir stable avec l'âge, le module d'élasticité reste très hétérogène à des âges plus avancés. Dans le jeune âge, la forte variabilité de  $E_L$  pourrait s'expliquer par celle de la densité, il a été montré qu'il existe une relation module-densité lorsque les arbres sont jeunes (Baillères 1994). Cette hétérogénéité peut s'expliquer aussi par la présence de nombreux défauts, dus aux manques d'éclaircies dans les plantations.

Certes le nombre d'éprouvettes prélevées dans la phase de bois mature (25-60 ans) est relativement inférieure à celui prélevé dans la phase de bois juvénile, mais une forte augmentation de la rigidité avec l'âge cambial a été observée. Cette augmentation est de

l'ordre de 20% entre le bois juvénile et le bois adulte. Bhat et *al.* (2001) ont montré que chez les tecks de 63 ans, issus des plantations en Inde, le module d'élasticité varie de 20-21% entre le bois adulte et le bois juvénile. Au niveau des individus adultes, indépendamment des zones écologiques et de la sylviculture, une grande variabilité est notée entre arbres pour le module d'élasticité. Cette variabilité pourrait être exploitée pour la sélection génétique des individus présentant les meilleures aptitudes technologiques.

Du point de vue de la densité, l'âge de rotation des tecks en plantation au Togo peut être abaissé à 25-30 ans. Cependant, des rotations plus longues devront être envisagées si l'on prévoit des utilisations du bois nécessitant des rigidités plus grandes. Dans le cas de la densité comme du module d'élasticité longitudinal, aucun effet significatif de la zone écologique n'a pu être mis en évidence.

Les trois caractéristiques du bois de teck étudiées jusqu'alors, c'est-à-dire le pourcentage de bois de cœur, la densité et le module d'élasticité longitudinal permettent de dire que la durée de rotation dans les plantations pourrait être réduite sans risque à 30-40 ans au lieu de 70 ans dans les plantations "classiques". Sur les propriétés mécaniques et physiques, la qualité du teck en plantation n'est pas inférieure à celle des forêts naturelles. Le Teck étant particulièrement apprécié à cause de sa bonne durabilité naturelle et des qualités esthétiques, il est évident de se poser la question de l'effet de cette réduction de la durée de rotation sur les autres propriétés de ce bois. Etant donné le rôle de la duraminisation et des substances extractibles du bois dans la durabilité, il est possible que la résistance du bois face aux agents de dégradation soit affectée. Dans les deux chapitres suivants, il sera question d'analyser les facteurs de variabilité de ces deux propriétés en relation avec l'âge des échantillons et les zones écologiques au Togo.

## ***CHAPITRE 4***

---

### ***LA DURABILITE NATURELLE DU BOIS DE TECK***

---



## Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter la variabilité de la durabilité naturelle du teck face à deux groupes de champignons, les champignons des régions tropicales et ceux des régions tempérées ; puis face à une famille de termites de milieu tropical. La première partie qui est essentiellement descriptive, expose les divers agents de détérioration, leur mode d'action et résume le protocole expérimental de la mesure de la durabilité naturelle. Ce genre de mesure, qui fait appelle à des essais biologiques, est très compliqué à mettre en place. Au-delà de l'incertitude expérimentale, il faut s'attendre à une grande variabilité à la fois du bois et de la souche utilisée. La seconde partie présente les résultats sur le Teck en plantation au Togo en relation avec les diverses sources de variabilité ci-dessous évoquées.

La durabilité naturelle d'un bois est son aptitude à demeurer inaltéré dans un emploi défini, pendant une période donnée, en l'absence de tout traitement protecteur (Loubinoux et *al.* 1994). Dans cette définition, la notion "d'emploi défini" est très importante. En effet, on ne peut dire d'un bois qu'il est durable sans préciser dans quelles conditions définies d'emploi. Ce sont donc les emplois qui déterminent les risques, surtout dans le cas des bactéries, moisissures et champignons.

La préservation chimique des bois, bien qu'efficace pose encore des problèmes sur le plan technique (résistance à l'imprégnation de certaines essences, répartition inégale des produits de protection dans les cellules du bois, etc), et sur le plan écologique. La toxicité des produits de préservation chimique, facteur de pollution préoccupe de plus en plus l'opinion dans les pays industrialisés. De ce fait, l'utilisation des biocides naturels extraits d'essences très durables est de plus en plus évoquée. L'étude des essences naturellement durables comme le Teck constitue un enjeu prometteur à l'heure actuelle.

La teneur et la composition des substances extractibles contenues dans le duramen du teck, confèrent au bois une durabilité naturelle et une stabilité dimensionnelle particulièrement recherchées. Cultivés dans des milieux à propriétés édaphiques et climatiques extrêmement variés, il est évident qu'une variabilité considérable s'observe au niveau de la résistance biologique des tecks de plantation. Il faut noter que pour une essence donnée la durabilité naturelle peut être très variable d'un individu à l'autre voire même au sein de l'arbre. Il est à

l'heure actuelle difficile d'identifier la durabilité naturelle d'une essence de bois, car elle n'est pas seulement reliée à l'essence mais également à l'origine génétique et à certains facteurs de croissance (climat, nature du sol, sylviculture). A l'exception de quelques résultats scientifiques disponibles (Baillères et Durand 2000), très peu de données existent dans la littérature sur la variabilité de la durabilité naturelle du teck. Ce chapitre constitue donc un apport particulièrement intéressant.

#### **4.1– Les 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.

##### **Les micro-organismes**

Ces organismes sont subdivisés en deux groupes (Tableau 4.1) :

- les moisissures et les bactéries ;
- les champignons.

Il existe des champignons de discoloration (champignons de bleuissement et d'échauffures) et des champignons lignivores. Les premiers sont incapables d'altérer les parois des cellules ligneuses mais peuvent provoquer des modifications d'aspect et de volume (Vernay et *al.* 1997). Les seconds sont soit des champignons de pourriture cubique ou brune, soit des champignons de pourriture fibreuse ou blanche, soit des champignons de pourriture molle. La pourriture du bois consiste en une modification irréversible de toutes les propriétés du bois. Par conséquent, les champignons de pourriture sont ceux qui causent les dégâts les plus graves. Ils mènent une vie saprophytique et transforment par action diastasique la matière ligneuse en substance assimilable. Ces champignons, se distinguent suivant les enzymes qu'ils sont capables d'élaborer pour attaquer la paroi cellulaire.



*Les champignons de pourriture brune* (par exemple *Gloeophyllum trabeum*) dites encore cubiques sont des organismes qui dégradent de façon préférentielle les chaînes de cellulose. Cette dernière est ainsi transformée en éléments solubles assimilables. Le bois est ainsi fragmenté en petits cubes rappelant l'aspect d'un bois ayant subi un début de calcination (Fig 4.1).

**Fig 4.1 : *Dicorynia guianensis* attaqué par une pourriture brune.**

*Les champignons de pourriture blanche ou fibreuse* (par exemple *Coriolus versicolor*) dégraderait tous les constituants du bois y compris la lignine. Le bois ainsi attaqué, présente un aspect fibreux et une décoloration très importante (Fig 4.2). Ces deux types de champignons (pourriture brune et blanche) appartiennent à l'ordre des Basidiomycètes.



**Fig 4.2 : *Dicorynia guianensis* attaqué par une pourriture blanche.**



**Fig 4.3 : *Dicorynia guianensis* attaqué par une pourriture molle.**

*Les champignons de pourriture molle* (par exemple *Humicola sp.*) se rencontrent plutôt dans les conditions d'extrême humidité et de taux d'oxygène très faible. C'est le cas des bois immergés ou du bois au contact du sol. Ces champignons appartiennent à l'ordre des

Ascomycètes ou des Deutéromycètes. Ils causent à long terme de graves dégâts puisqu'ils réduisent le bois en une pâte molle (Fig 4.3). Par ailleurs, leur mode d'attaque est très particulier, ils ne se propagent pas à l'intérieur des cellules mais dans les parois secondaires.

Agent de détérioration	Types	Constituant dégradé préférentiellement dans le bois	Inconvénients majeurs sur le bois	Conditions de croissance (H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , T°)
Champignons lignivores	Pourriture brune ou cubique	Cellulose	Perte de la résistance mécanique	H = 35-40% O <sub>2</sub> = 20% T° = 20-36°C
	Pourriture blanche ou fibreuse	Lignine		
	Pourriture molle ou pâte	Cellulose + Hémicellulose + Lignine		Endroit très humide et pas assez oxygéné
Champignons de discoloration	Echauffures Ex (Stereum) Bleuissement Ex (Ceratocystis)	Contenu des cellules de parenchyme de (aubier)	Modification de la couleur du bois	Endroit très humide
Moisissures				
Bactéries			Augmentation de la perméabilité	

**Tableau 4.1 : Types de micro-organismes pouvant attaquer le bois et leur conditions de croissance.**

### Les insectes

Parmi les insectes, il en existe ceux responsables des piqûres noires (platypes et scolytes), ceux qui sont à cycle larvaires (capricornes des maisons, lyctus, vrillettes, bostryches) et ceux qui sont sociaux (termites, abeilles et fourmis charpentières), (Giordano 1971). Les termites constituent dans les pays tropicaux un redoutable fléau pour les constructions en bois (Fig 4.4). Ils appartiennent à l'ordre des Isoptères.



On distingue les termites dits "souterrains" (genre *Reticulitermes* et *Coptotermes*) dont les besoins en eau sont relativement importants et les termites dits "de bois sec" (genre *Cryptotermes*) dont les besoins en eau sont faibles. La biologie des insectes laisse penser que leurs attaques seraient liées à la teneur du bois en amidon, substance de réserve localisée dans l'aubier.

**Fig 4.4 : Attaque de termites (*Coptotermes testaceus*) sur *Qualea rosea*.**  
(Vernay et *al.*1997)

En résumé, les agents de détérioration du bois sont de natures diverses et leurs modes d'action sont très variables. Il est de ce fait important d'étudier leurs effets, si l'on veut parvenir à un classement de la durabilité naturelle à l'intérieur des plantations de teck et comparativement au Teck des forêts naturelles. Il est également nécessaire de tester les champignons des zones tropicales et tempérées sur le Teck de plantation étant donnée son utilisation croissante dans diverses régions du monde.

#### **4.2 – Les classes de risques biologiques**

La durabilité naturelle d'un bois s'apprécie en fonction des conditions ambiantes auxquelles il se trouve exposé dans un emploi considéré. Chaque type d'organisme qui attaque le bois possède des exigences spécifiques (disponibilité en eau, en oxygène et température du milieu). En fonction des conditions d'usage du bois, la norme européenne EN 335-1 définit 5 classes de risques d'attaques (Tableau 4.2). Selon la classe de risque, les agents d'altération susceptibles d'attaquer sont donc variables. Il est essentiel d'utiliser pour les ouvrages correspondant aux classes de risque 3, 4 et 5 des essences de durabilité naturelle suffisante dont on aura pris soin d'éliminer les parties aubieuses.

Classes de risques	situations d'emploi	Etat	Humidité	Agents d'altération selon la classe de risque
1	hors sol, à l'abri des intempéries	toujours sec	< 18%	Insectes à larves Termites
2	hors sol, à l'abri des intempéries	humidification accidentelle	parfois > 18%	Insectes à larves Termites/Pourritures
3	hors sol, non abrité	souvent humide	souvent > 20%	Insectes à larves Termites/ Pourriture
4	contact du sol ou eau douce	humidité permanente	>20%	Insectes à larves Termites/Pourriture y compris molle
5	eau salée	humidité permanente	>20%	Térébrants marins Pourriture y compris molle

**Tableau 4.2 : Classes de risques selon les conditions d'utilisation.**

### 4.3 – Les classes de durabilité naturelle

#### *Mesure de la durabilité naturelle*

Les connaissances actuelles sur la durabilité naturelle sont basées sur trois sources :

- les connaissances traditionnelles sur l'usage de certaines essences réputées pour leur duramen exceptionnellement durable. L'utilisation de *Cedrus libani* dans la construction de certains temples datant de plusieurs siècles en est l'exemple (Willeitner et Peek 1997) ;
- les essais de champ au contact du sol. Ce type d'essai présente l'avantage d'être réalisé en plein air, prenant en compte les facteurs environnementaux. Cependant, il faut choisir des sites adéquats et la durée des essais est très longue ;
- les essais en laboratoire sont basés sur les mesures de perte de masse d'échantillons de bois exposés à une espèce de champignon ou de termite. Les durées d'exposition sont beaucoup plus courtes (quelques mois) que dans le cas des essais de champ.

L'une des difficultés rencontrées lors des travaux de durabilité naturelle est l'utilisation d'une terminologie pour caractériser la résistance du bois à la fin des essais. Pour une essence donnée, les pertes de masse mesurées au laboratoire doivent correspondre à la résistance du bois observé pratiquement *in situ*. L'interprétation des résultats à la fin des essais en laboratoire doit également tenir compte des conditions environnementales d'utilisation du

bois. En milieu tropical à climat constamment humide et chaud par exemple, les processus de biodégradation du bois sont plus rapides. La correspondance entre perte de masse du bois vis-à-vis des champignons, mesurée en laboratoire et la durée de vie en plein air (Tableau 4.3) a été proposée par Findlay (1985).

Classe de durabilité naturelle	Perte de masse mesurées en laboratoire (%)	Durée de vie (années)	
		Milieu tempéré	Milieu tropical
Très durable	<1	>25	>10
Durable	1-5	15-25	5-10
Moyennement durable	5-10	10-15	—
Non durable	10-30	5-10	2-5
Périssable	>30	<5	<2

**Tableau 4.3 : Correspondances entre pertes de masse mesurées en laboratoire et durée de vie à l'extérieur, Findlay 1985 (dans Eaton et al. 1993).**

En conclusion, les essais de laboratoire sont des indicateurs fiables de la résistance relative à la dégradation.

#### ***Les normes européennes de classification***

Afin de permettre une harmonisation lors des essais de durabilité (échantillonnage, méthodes et interprétation des résultats), des normes ont été établies à partir de 1994 (NF EN 350-1, NF EN 350-2, NF EN 113). La durabilité d'une essence est classée selon une échelle à cinq niveaux pour les champignons lignivores, à deux niveaux pour les coléoptères xylophages de bois sec et à trois niveaux pour les termites et les térébrants marins. Le principe de classification pour les champignons s'appuie sur le calcul de la perte de masse absolue  $x$  et de la perte de masse relative  $X$  (Tableau 4.4). Cette dernière est obtenue en rapportant la perte de masse absolue ( $x$ ) de l'essence (dont on mesure la durabilité) à celle mesurée sur une espèce de référence de faible durabilité.

Classe de durabilité	Description	Perte de masse absolue $x$ (en %)	Perte de masse relative $X$
1	Très durable	$x \leq 5$	$X \leq 0,15$
2	Durable	$5 < x \leq 10$	$0,15 < X \leq 0,30$
3	Moyennement durable	$10 < x \leq 20$	$0,30 < X \leq 0,60$
4	Peu durable	$20 < x \leq 30$	$0,60 < X \leq 0,90$
5	Non durable	$x > 30$	$X > 0,90$

**Tableau 4.4 : Classes de durabilité naturelle du bois vis-à-vis des champignons lignivores définie selon la norme EN 350-1.**

Il faut remarquer que le fait de travailler sur les pertes de masse relative signifie que l'on est moins tributaire des conditions opératoires, cela offre donc la possibilité de comparer des séries d'essai réalisés dans des conditions légèrement différentes.

#### **4.4 – Le rôle des substances macromoléculaires des parois cellulaires**

Les substances macromoléculaires des parois cellulaires sont constituées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. Contrairement aux extraits qui sont généralement plus spécifiques de certaines espèces de bois, ces trois substances macromoléculaires sont présentes en quantité abondante dans toutes les essences. Les proportions et la composition monomérique de la lignine varient chez les conifères et les feuillus, tandis que la cellulose est un constituant uniforme de toutes les essences. La lignification de la paroi cellulaire est un facteur très important dans la dégradation du bois, la lignine apparaît surtout comme une barrière physique. En effet, il s'agit d'un polymère assez complexe, localisé dans la lamelle moyenne et dans les parois secondaires. Elle empêche les enzymes de rupture des polysaccharides des champignons d'atteindre un nombre suffisant de liaisons glycosidiques pour permettre une hydrolyse suffisante (Scheffer et Cowling 1966). De ce fait, tous les organismes qui attaquent le bois doivent posséder des enzymes leur permettant de dégrader les polysaccharides mais aussi de dépolymériser la lignine. La teneur en lignine des essences joue donc un rôle important dans leur durabilité face aux champignons et aux insectes.

La structure même de la lignine semble jouer un rôle important : il existe des différences structurales entre les lignines de conifères et de feuillus (Haluk 1994). Celles des conifères sont essentiellement constituées d'unités guaïacyles alors que celles des feuillus sont constituées de mélange d'unités guaïacyles, syringyles et parahydroxyphényles. Une étude de la durabilité naturelle chez des feuillus tropicaux a montrée que les espèces les plus durables vis-à-vis de *Coriolus versicolor* sont celles qui possèdent une proportion d'unités guaïacyles élevée (Syafii et al. 1988). Il semblerait que *Coriolus versicolor* dégrade en premier les unités syringyles et ensuite les unités guaïacyles. La résistance de plusieurs résineux aux champignons de pourriture molle serait pour cette raison supérieure à celle des feuillus.

Le degré de cristallinité de la cellulose semble aussi intervenir dans les mécanismes de résistance aux microbes de détérioration du bois. Lorsque la proportion de cellulose cristalline

est élevée, la surface moléculaire accessible aux enzymes du champignon est plus petite, ce qui augmenterait la résistance à la détérioration.

#### **4.5 – Le rôle des extraits dans la durabilité naturelle du bois**

La durabilité naturelle de certaines espèces est attribuée en particulier à l'activité des extraits qu'elles renferment (Schultz et *al.* 1995). Les teneurs en extraits varient d'une essence à l'autre mais généralement, ils représentent 1 à 5% du poids du bois. Les études sur les processus de vieillissement de l'arbre laissent penser que les substances responsables de la durabilité du bois se forment lors de la duraminisation. Bamber (1976) et Climent et *al.* (1998) ont cherché à mettre en évidence la nature des cellules intervenant dans la formation de ces substances. Les cellules de parenchyme apparaissent être le lieu de synthèse des substances extractibles du duramen (Bamber et Fuzakawa 1985). Il est évident que ces cellules jouent un rôle important puisqu'elles constituent les seuls éléments vivants du bois avant la duraminisation. Les observations faites chez *Pinus canariensis* montrent que les cellules de parenchymes de l'aubier contiennent d'abondants grains d'amidon. Cet amidon est transformé en résine et en tannins phénoliques lors de la duraminisation. Ces substances, une fois formées, diffusent dans les cellules de fibres et s'y déposent. Les extraits du bois sont de nature diverse et sont extractibles à l'eau ou aux solvants organiques. Ces substances peuvent être des polymères (tanins) ou des molécules de faibles poids moléculaire telles que les flavonoïdes, les stilbènes, les lignanes, les terpénoïdes, les tropolones, etc (Haluk et Roussel 2000). L'extraction et l'étude de la structure moléculaire de ces composées ont fait l'objet de plusieurs études. Ainsi, Déon et *al.* (1980), ont étudié les activités antifongiques des extraits contenus dans le bois de six espèces tropicales. La très haute toxicité envers les champignons de la thujaplicine (substance extraite du bois de *Thuja plicata*) a été également démontrée (Haluk et Roussel 2000 ; Fougerousse 1960). La forte durabilité naturelle de l'oranger des osanges (*Maclura pomifera*) serait due à la présence dans le duramen de taux élevé d'oxyresveratrol et de dihydromorin qui sont des composés de type stilbène (Schultz et *al.* 1995). Il faut noter que toutes les substances extraites du bois n'ont pas forcément un pouvoir fongicide.

Chez le teck, plus de 40 composés extractibles ont été identifiés. Ce sont essentiellement les quinones (naphthoquinones et anthraquinones), les terpenoïdes et d'autres composés dérivés du déhydronaphthol (tectol et déhydrotectol). La composition chimique d'un certain nombre

de ces extraits a largement été étudiée (Sandermann et Simatupang 1966 ; Pahup et *al.*1989 ; Yamamoto et *al.* 1998 ; Simatupang et Yamamoto 1999 ; Haluk et *al.* 2001). Les résultats ont montré que seuls quelques uns de ces extraits ont des propriétés antifongiques. Ainsi, les anthraquinones (spécialement le tectoquinone), le lapachol et le désoxylapachol interviennent dans la durabilité vis à vis des termites, ce qui ne semble pas être le cas du tectol et du déhydrotectol. Ces deux substances semblent jouer un rôle dans les processus de retrait (Simatupang et Yamamoto1999). Les anthraquinones du Teck n'ont aucune efficacité antifongique, ce sont des substances répulsives et non toxiques. Les substances intervenant dans la toxicité vis-à-vis des champignons ne sont pas encore bien connues mais l'effet synergique entre les extraits à l'éthanol et le latex contenu dans les cellules du bois de cœur expliquerait la résistance du Teck aux champignons (Yamamoto et *al.* 1998). En effet le latex joue le rôle de barrière physique tandis que certains composés sont répulsifs voire toxiques.

Le mode d'action des substances extractibles du bois est très variable. Chez les angiospermes, les tannins inhibent les phénols-oxidases extracellulaires. Chez les gymnospermes, les thujaplicines sont des agents de dissociation qui inhibent la phosphorylation oxydative, principale source d'énergie du champignon. Chez le Teck, le processus par lequel le latex influence la résistance à la pourriture n'est pas bien connu mais ses propriétés hydrophobes seraient d'une grande importance. En outre, le latex est très sensible à l'oxydation et la présence dans le bois d'antioxydants retarderait sa dégradation (Yamamoto et *al.* 1998). Les extraits du bois auraient en réalité deux propriétés : une antifongique et une autre qui serait celle de balayeurs de radicaux libres (antioxydant). Le mode d'attaque des pourritures brune et blanche montre que ces champignons utiliseraient certains radicaux libres pour casser la paroi cellulaire afin de permettre la pénétration des enzymes extracellulaires. La combinaison entre ces deux propriétés des extraits du bois seraient donc à l'origine de la durabilité vis-à-vis des champignons (Schultz et Nicholas 2000).

## 4.6 - Matériel végétal

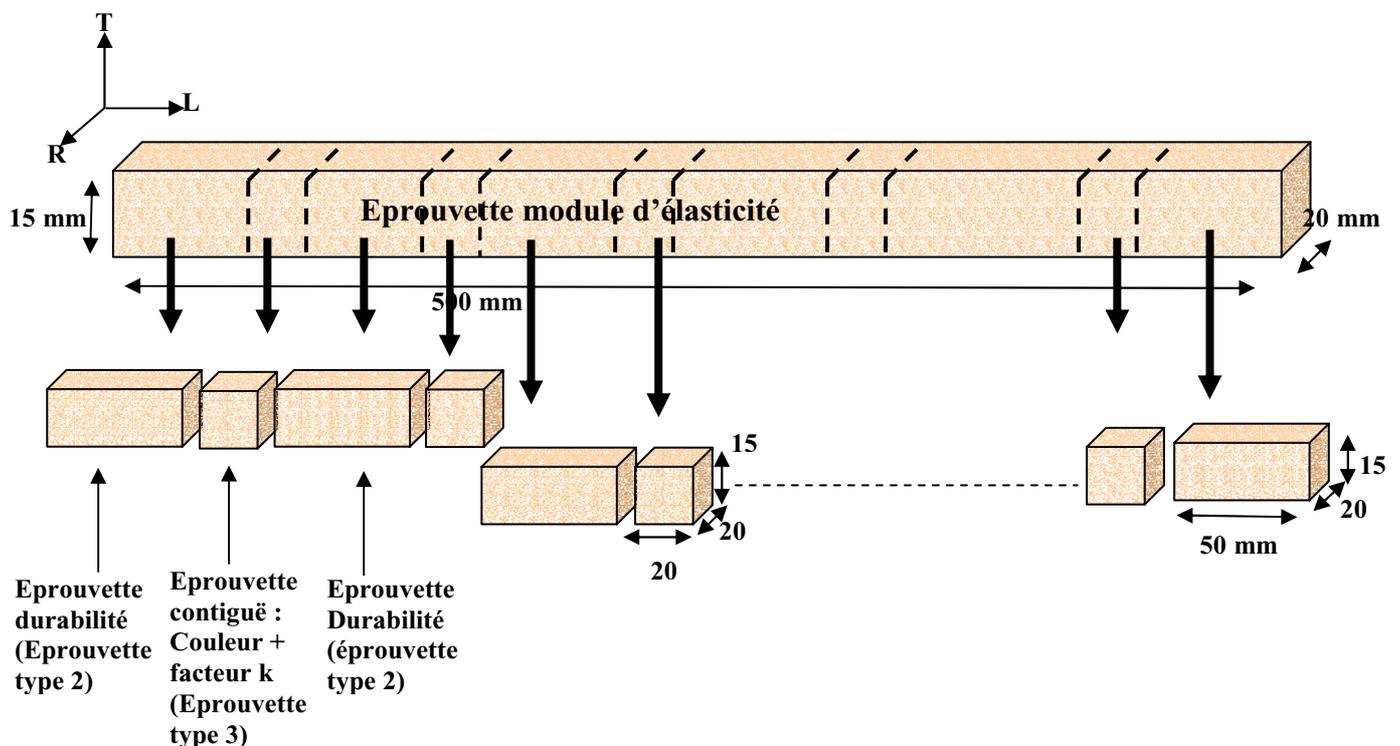
### 4.6.1 – Durabilité naturelle vis à vis des champignons

Les essais de durabilité aux champignons ont été réalisés en deux séries (février 2001 à septembre 2001 et novembre 2001 à juin 2002). Ces deux séries correspondent à deux lots d'essai distincts.

Le premier lot d'essai a été réalisé sur neuf arbres vis à vis de deux champignons :

- *Pycnoporus Sanguineus* (Souche 27O), une pourriture fibreuse de zone tropicale ;
- *Antrodia sp.* (Souche 57A), une pourriture cubique de zone tropicale.

Chacune des éprouvettes ayant servi à la mesure du module d'élasticité (**épreuve type 1**) a été découpée en cinq éprouvettes (**épreuve type 2**) de dimensions **50 x15 x20 mm** selon les directions (L, T, R), soit au total 360 éprouvettes de type 2. La durabilité naturelle aux champignons a été mesurée sur 269 éprouvettes de type 2 (Fig.4.5 ; Tableau 4.5). Il faut noter qu'il reste 91 éprouvettes de type 2 qui n'ont pas servi aux essais «champignons».



**Fig 4.5 : Principaux types d'éprouvettes utilisées pour la mesure des propriétés du bois**

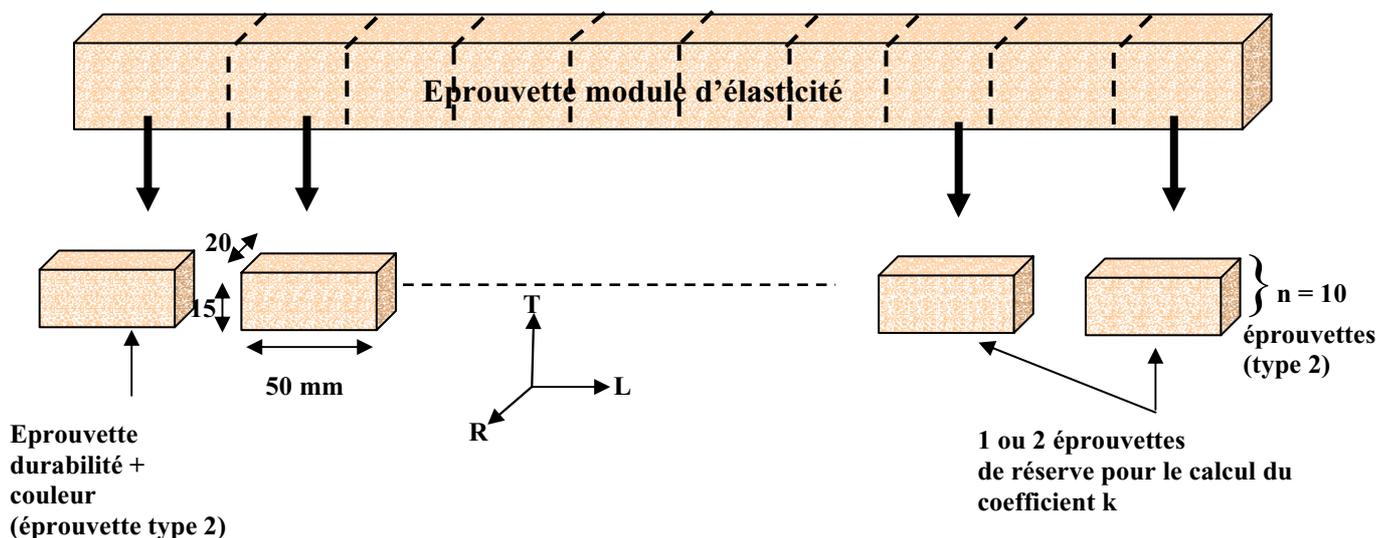
**du 1<sup>er</sup> lot d'essai.** Dans l'éprouvette initiale (épreuve module d'élasticité), on a découpé de manière répétée une éprouvette de type 2 et une éprouvette de type 3.

A chaque éprouvette de type 2, est associée une éprouvette jumelle (**éprouvette type 3**) de dimensions **20 × 15 × 20 mm**. Les éprouvettes de **type 3** ont servi aux calculs d'un facteur k, et aux mesures spectrophotométriques (Chapitre 5). Le facteur k est un coefficient permettant d'estimer la masse anhydre théorique des éprouvettes (type 2) avant l'essai. Cet échantillonnage permet de comparer les différentes propriétés du bois entre les arbres et à l'intérieur de l'arbre suivant l'âge cambial de l'éprouvette. Dans cette série d'essai, les propriétés du bois sont supposées ne varier pas de façon sensible sur un barreau de 50 cm de longueur. En définitive, ce sont 133 et 136 éprouvettes de type 2 qui ont été mis en contact respectivement avec *Pycnoporus Sanguineus* et *Antrodia sp.* lors du premier essai.

Le second essai a été réalisé sur 17 arbres vis-à-vis de 4 champignons, les deux tropicaux précédemment utilisés et deux champignons recommandés par la norme EN 113. Il s'agit de :

- *Gloephyllum trabeum* (BAM Ebw.109), une pourriture brune de zone tempérée ;
- et de *Coriolus versicolor* (CTB 863-A), une pourriture blanche de zone tempérée.

Chacune des éprouvettes ayant servi à la mesure du module d'élasticité a été découpée en 20 éprouvettes de type 2 dont 16 ont servi à la détermination de la durabilité naturelle (soit quatre éprouvettes par champignon et par baguette).



**Fig 4.6 : Principaux types d'éprouvettes utilisées pour la mesure des propriétés du bois du 2<sup>ème</sup> lot d'essai.**

Les quatre éprouvettes restantes ont servi à la détermination du facteur de correction k (Fig 4.6). La seconde série d'essai a donc été réalisée sur 849 éprouvettes de teck. Compte tenu de la qualité des éprouvettes de type 1 (présence ou non de fentes, de nœuds ou de trous), trois à cinq positions radiales ont été prises en compte par arbre (éprouvettes de duramen). L'aubier (considéré comme non durable quelque soit l'essence) a été échantillonné sur quelques arbres à titre de comparaison avec le duramen.

		Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone5
Lot 1	Nombre d'arbre	2	2	5	-----	-----
	Eprouvette test pour champignon	Eprouvette type 2				
	Eprouvette pour K	Eprouvette type 3				
Lot 2	Nombre d'arbre	3	2	-----	7	5
	Eprouvette test pour champignon	Eprouvette type 2				
	Eprouvette pour K	Eprouvette type 2				

**Tableau 4.5 : Récapitulatif des différents types d'éprouvettes utilisées lors des essais de durabilité naturelle aux champignons.**

#### 4.6.2 – Durabilité naturelle vis à vis des termites

La durabilité naturelle aux termites a été testée sur les **éprouvettes de type 2**, uniquement sur la 1<sup>ère</sup> série d'essai (chapitre 4.6.1). Les 91 éprouvettes (de type 2) restantes du lot 1, qui n'ont pas été mises en présence des champignons, ont servi à faire les essais "termites". Ces éprouvettes ont été classées en trois positions radiales selon les modalités suivantes :

Position radiale	Arbre 61	Arbre 32	Arbre 40	Arbre 51	Arbre 70	Arbre 50	Arbre 33
1	5 ± 2	10 ± 2	8 ± 3	8 ± 2	4 ± 2	8 ± 1	3 ± 2
2	20 ± 5	27 ± 4	15 ± 1	20 ± 1	10 ± 1	22 ± 2	8 ± 1
3	30 ± 2	33 ± 1	22 ± 2	39 ± 2	17 ± 1	35 ± 5	18 ± 2

**Tableau 4.6 : Age cambial (année) par position radiale et par arbre des éprouvettes exposées à *Heterotermes indicola*.**

L'âge cambial représente le nombre de cernes compté depuis la moelle (Tableau 4.6). Une seule espèce de termite souterrain de régions tropicales (*Heterotermes indicola*) a été retenue pour cet essai.

## 4.7 - Méthodes

### *Durabilité face aux champignons*

Les étapes de cette méthode d'évaluation au laboratoire de la durabilité naturelle du bois sont très nombreuses et très délicates. Elles se réfèrent à la norme européenne EN 350-1 (1994). Les diverses étapes de ces essais biologiques après la découpe des éprouvettes sont les suivantes :

- peser les éprouvettes pour avoir la masse initiale avant l'essai ( $P_i$ ) ;
- les mettre en sachet hermétique et les faire stériliser par irradiation ionisante (Rayons gamma) de façon à éliminer tout germe éventuel avant essai ;
- préparer le milieu de culture : mettre dans un ballon 40 g d'agar-agar + 80g de malt en poudre et deux litres d'eau distillée, agiter le mélange avec une baguette. Placer le ballon dans un autoclave 121°C pendant 20 minutes pour une dissolution complète du mélange. Mettre 60 ml de milieu ainsi préparé dans chaque flacon d'essai à l'aide d'une pompe péristatique. Fermer le flacon avec un bouchon muni d'un tampon en coton permettant les échanges gazeux. Placer les flacons pendant 20 minutes à 121°C dans l'autoclave, puis les laisser refroidir couchés à plat ;
- inoculer les milieux de culture par des fragments de culture de champignon une semaine (au maximum) après cette préparation. Cette opération doit se faire en milieu stérile pour éviter toute contamination. Il faut travailler sous une hotte à flux laminaire horizontal, les manipulations s'effectuant à l'aide d'une tige à anse de platine sans cesse passée sous la flamme d'un bec Bunsen. Après l'inoculation, déposer quelques gouttes d'un anti-acarien (Rhodiatox dilué à 5%) sur le coton du bouchon des flacons et les fermer ;
- entreposer les flacons dans une pièce conditionnée (22°C et 65% d'humidité relative) pendant environ 15 jours. Ce délai est nécessaire pour que le mycélium inoculé, pousse et recouvre entièrement la surface du milieu de culture ;
- exposer les éprouvettes de bois aux champignons cultivés dans un délai ne dépassant pas 4 semaines après l'inoculation du milieu. Cette étape se fait toujours sous la hotte donc en milieu stérile. Placer deux éprouvettes par flacons d'essai en les déposant avec une pince saine sur des supports métalliques préalablement stérilisés à l'autoclave ;
- replacer les flacons dans la pièce conditionnée. Le temps d'exposition des éprouvettes aux champignons est de 16 semaines conformément à la norme (Fig.4.7).



**Fig.4.7 : Eprouvettes de teck après 16 semaines d'exposition aux champignons.**

Ces éprouvettes sont soumises à l'attaque des champignons en même temps que les éprouvettes de teck et constituent des témoins pour les tests de virulence des souches de champignons utilisés lors de l'essai.

Pour le premier lot, le coefficient de correction  $k$  a été calculé sur les éprouvettes jumelles (**éprouvette type 3**). Ce sont donc 269 éprouvettes de type 3 qui ont été pesées successivement dans le même état d'équilibre que les éprouvettes de type 2 avant l'essai ( $P_i$ ). Elles ont ensuite été pesées à l'état anhydre après passage à l'étuve ( $103^\circ\text{C}$  pendant 48h).

Pour le second lot, le coefficient  $k$  a été calculé sur les éprouvettes de réserve, soit 120 éprouvettes de type 2 (Fig.4.6).  $K$  est le rapport entre la masse à 12% des éprouvettes jumelles ou des éprouvettes de réserves ( $m_{12}$ ) et la masse anhydre ( $103^\circ\text{C}$ ) de ces mêmes éprouvettes ( $m_a$ ).

$$K = \frac{m_a}{m_{12}}$$

Où  $m_a$  est la masse (g) à  $103^\circ\text{C}$

et  $m_{12}$  est la masse (g) stabilisée à 12 %

A la fin de l'essai, les éprouvettes sont retirées et débarrassées du mycélium adhérent à l'aide d'une brosse à dent. Elles sont ensuite pesées, c'est la masse humide ( $P_h$ ). Il faut les sécher dans une étuve ( $103 \pm 2^\circ\text{C}$ ) pendant 48 heures jusqu'à masse constante et de nouveau les peser pour obtenir leurs masses finales anhydres ( $P_f$ ). L'humidité de chaque éprouvette ( $H_f$ ) est calculée à la fin de l'essai en exprimant sa teneur en eau [ $P_h - P_f$ ] en pourcentage de sa

masse sèche [ $H_f = (P_h - P_f)/P_f$ ]. Après ce calcul, toute éprouvette ayant une humidité  $H_f < 25\%$  ou  $>85\%$  est rejetée. La perte de masse ( $P_M$ ) de chaque éprouvette est calculée en utilisant la formule suivante [1].  $P_M$  est exprimée en pourcentage de masse anhydre initiale.

$$P_M = \frac{(P_s - P_f)}{P_s} \quad [1]$$

avec :

$P_f$  la masse anhydre réellement mesurée de l'échantillon après l'attaque du champignon ;

$P_s$  la masse anhydre supposée de cet échantillon avant l'attaque du champignon, il est estimé par la formule [2].

$$P_s = K \times P_i \quad [2]$$

$P_i$  est la masse de l'éprouvette réellement mesurée avant le début de l'essai, cette masse correspond à une humidité supposée de 12% c'est-à-dire au moment où elle a été conditionnée (température de 20°C et 65% d'humidité jusqu'à masse constante) et  $k$  est le coefficient correcteur.

#### 4.7.1 – Validité des résultats : test de virulence des souches utilisées

La durabilité naturelle de chaque éprouvette de teck mise en contact avec les champignons est évaluée en faisant le rapport entre sa perte de masse précédemment calculée et la perte de masse observée sur le lot d'éprouvette de référence (Pin sylvestre ou Hêtre). L'essai pour un champignon donné n'est validé que si une perte de masse minimale est observée sur les éprouvettes de référence. Ainsi, les pertes de masse mesurées doivent être d'au moins 20% pour le Hêtre et le Pin (Tableaux 4.7 et 4.8).

Champignon	N° de souche	Nombre d'éprouvette	Perte de masse observée ( $\bar{x} \pm \sigma_x$ )	Perte de masse minimale préconisée par la norme
<i>Pycnoporus sanguineus</i>	27O	6	38,16% ± 3,02	20%
<i>Antrodia sp</i>	57A	6	39,80% ± 4,10	20%

**Tableau 4.7 : Données relatives à la validité des essais de durabilité naturelle du lot 1.** L'essence de référence est le Pin sylvestre pour *Antrodia sp* et le Hêtre pour *Pycnoporus sanguineus*.

Champignon	N° de souche	Nombre d'éprouvette	Perte de masse observée ( $\bar{x} \pm \sigma_x$ )	Perte de masse minimale préconisée par la norme
<i>Pycnoporus sanguineus</i>	27O	6	23,64% $\pm$ 5,06	20%
<i>Antrodia sp</i>	57A	8	26,62 $\pm$ 2,67	20%
<i>G. trabeum</i>	67D	8	21,90 $\pm$ 1,89	20%
<i>C. versicolor</i>	8A	6	23,77 $\pm$ 2,47	20%

**Tableau 4.8 : Données relatives à la validité des essais de durabilité naturelle du lot 2.**

L'essence de référence est le Pin sylvestre pour *Gloeophyllum trabeum* et le Hêtre pour *Coriolus versicolor*.

Toutes les éprouvettes de référence du lot 1 ainsi que celles du lot 2 montrent des pertes de masse supérieures à celles indiquées par la norme, attestant ainsi d'une virulence des souches suffisante. Les essais sont de ce fait validés.

#### 4.7.2 - Calcul d'incertitude maximale expérimentale sur les mesures de pertes de masse

L'équation utilisée pour le calcul de la perte de masse est la suivante :

$$P_M = \frac{(P_s - P_f)}{P_s}$$

Le calcul classique de l'incertitude sur la perte de masse donne :

$$\frac{\Delta P_M}{P_M} = \frac{\Delta P_s}{P_s} + \frac{\Delta P_f}{P_f} + \frac{\Delta P_s}{P_s}$$

$$P_s = K \times P_i \Rightarrow \frac{\Delta P_s}{P_s} = \frac{\Delta P_i}{P_i} + \frac{\Delta K}{K}$$

$$K = \frac{m_{12}}{m_a}$$

L'incertitude maximale sur la pesée d'une éprouvette est de 0,01g soit  $10^{-2}$  g

$$\Rightarrow \frac{\Delta P_s}{P_s} = \frac{\Delta P_i}{P_i} + \frac{\Delta m_{12}}{m_{12}} + \frac{\Delta m_a}{m_a} = \frac{10^{-2}}{P_i} + \frac{10^{-2}}{m_{12}} + \frac{10^{-2}}{m_a}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta P_M}{P_M} = 2 \left( \frac{\Delta P_i}{P_i} + \frac{\Delta m_{12}}{m_{12}} + \frac{\Delta m_a}{m_a} \right) + \frac{\Delta P_f}{P_f} = 2 \left( \frac{10^{-2}}{P_i} + \frac{10^{-2}}{m_{12}} + \frac{10^{-2}}{m_a} \right) + \frac{10^{-2}}{P_f}$$

L'incertitude expérimentale sur la mesure de la perte de masse dans les essais est au maximum de 2% dans le cas des éprouvettes du 1<sup>er</sup> lot et au maximum de 1% dans le cas des éprouvettes du second lot.

La durabilité naturelle de chaque éprouvette est ensuite classée selon les critères définis par la norme EN 350-1 (Tableau 4.4). On note  $x$  la perte de masse absolue observée sur l'échantillon et  $X$  sa perte de masse relative, c'est-à-dire le rapport entre la perte de masse absolue de l'échantillon et la perte de masse absolue des échantillons de référence.

#### **4.7.3 - Estimation de la masse anhydre théorique des éprouvettes avant l'essai**

Les pertes de masse sont calculées par rapport à la masse sèche des éprouvettes. Il faudrait donc connaître cette masse sèche avant et après l'essai. Dans le but de préserver la constitution chimique du bois, les éprouvettes soumises à l'attaque du champignon ne sont pas séchées artificiellement à 103°C avant l'essai. La norme utilisée (EN 350-1) recommande l'utilisation d'une masse sèche théorique. Cette masse est obtenue soit sur les éprouvettes jumelles (cas des éprouvettes du lot1) soit sur les éprouvettes de réserve (cas des éprouvettes du lot 2). L'utilisation de cette masse sèche théorique peut introduire des erreurs dans le calcul de la perte de masse en fin d'essai. En effet, il peut arriver que sur certaines éprouvettes, la masse anhydre finale après essai ( $P_f$ ) soit supérieure à la masse anhydre initiale ( $P_s$ ) estimée à partir des éprouvettes de réserves/jumelles. Cela ne se produit que chez les éprouvettes très durables qui en réalité n'auraient pas été attaquées. Dans ce cas, l'introduction de la masse sèche théorique dans les calculs conduit à une valeur de perte de masse négative ( $<0$ ), mais toujours inférieure à l'incertitude expérimentale sur la mesure de la perte de masse c'est-à-dire inférieure à 1% dans le cas du lot 2 et inférieure à 2% dans le cas du lot 1. Les valeurs négatives de perte de masse s'expliqueraient par l'existence dans le bois de teck de constituants volatils à haute température (103°C). Ces constituants existeraient dans les mêmes proportions chez tous les échantillons pris à la même position radiale dans le tronc. Le fait de sécher les éprouvettes jumelles/réserves à 103°C ferait partir l'eau du bois mais aussi les constituants volatils alors que ces derniers seraient restés dans les éprouvettes soumis à l'attaque du champignon puisque ceux-ci n'ont pas été séchés à 103°C avant l'essai. La masse sèche initiale des échantillons avant l'essai serait donc légèrement sous estimée, conduisant ainsi des valeurs de "perte de masse négatives". Pour éliminer ces valeurs erronées de perte de masse, la norme EN350 recommande de les compter comme zéro.

Lors de cette étude, il a été décidé de conserver comme telles toutes les valeurs de perte de masse même s'il est vrai que la terminologie de "perte de masse négatives" est impropre. Ce choix répond à l'objectif suivant : éviter d'introduire un biais numérique car *a priori* toutes les éprouvettes contiennent des composés volatiles, il n'y donc pas de raison de modifier uniquement les valeurs de certaines de ces éprouvettes pour des raisons de présentation des résultats.

Haluk (1994) évoque l'isolation de monoterpènes dans la fraction volatile d'extraits de conifères sans préciser la température à partir de laquelle ces substances s'évaporent. La littérature ne mentionne pas l'existence de constituants volatils chez le teck, cependant, Haluk et *al.* 2001, font référence aux travaux de SAV (1960) sur la variabilité de la composition chimique du teck suivant l'origine géographique. Simatupang et Yamamoto (1999) confirment cette variabilité des extraits du teck en fonction des facteurs environnementaux et de l'origine génétique des arbres. Il serait intéressant de connaître la nature chimique des extraits du teck en plantation au Togo dans le but de vérifier ou non l'existence de composés volatils dans le duramen.

### ***Durabilité naturelle vis à vis des termites***

Les éprouvettes sont identifiées et pesées avant le début de l'essai. Cette partie fait référence aux directives établies par la norme européenne **EN 117** de mars 1990 (Fig.4.8) :

- introduire 200 ml de sable de Fontainebleau et 50 ml d'eau distillée dans un récipient à paroi vertical. Bien mélanger l'ensemble à l'aide d'une tige ;
- effectuer ensuite deux ou trois trous ou galeries artificielles dans le sable et y introduire quelques fragments de bois du milieu de récolte des termites afin de permettre leur établissement dans le dispositif d'essai ;
- placer un anneau de verre contre l'une des parois verticales du récipient, sur le substrat ;
- introduire dans le récipient une colonie de 253 termites (250 ouvriers, deux soldats et une nymphe) comptés préalablement à l'aide d'un compteur à termites ;
- dans un délai de deux à quatre jours suivant la constitution des colonies, déposer l'éprouvette de bois sur l'anneau de verre et fermer le récipient ;
- placer les récipients dans une enceinte d'essai obscure, bien aérée, réglée à une température de 26-28°C ainsi qu'à une humidité relative minimale de 75%.



**Fig.4.8 : Eprouvettes de bois exposées aux colonies de termites selon la norme EN 117.**

Le temps d'exposition des éprouvettes à ces colonies d'insectes est de 8 semaines. Durant toute la période de l'essai, il faut veiller à maintenir l'humidité du sable dans lesquelles les colonies de termites sont installées par un apport régulier d'eau en petite quantité.

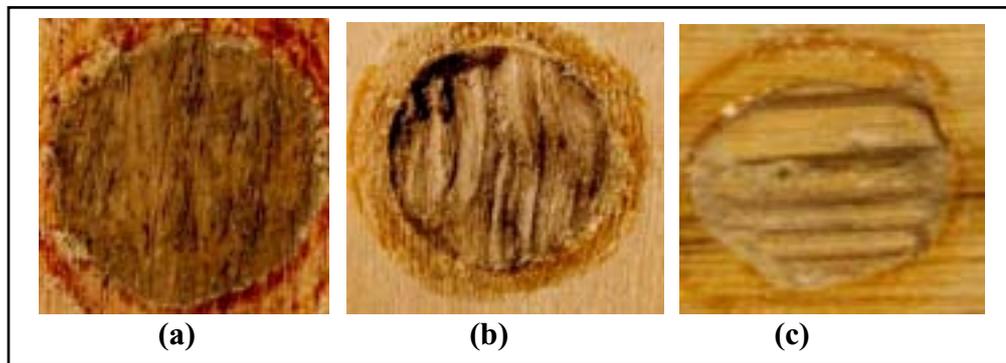
Au terme des 8 semaines, les éprouvettes sont sorties des récipients d'essai et sont débarrassées soigneusement des particules de substrat. Par ailleurs, il faut recenser aussi exactement que possible l'effectif de termites encore vivants dans chaque récipient d'essai, déterminer le taux de survie des ouvriers et noter la présence éventuelle de soldats et/ou de nymphes vivants. L'attaque éventuelle des termites est déterminée en utilisant le système de cotation visuel ci dessous (Tableau 4.10, Fig. 4.9).

Classes	Examen visuel
0	Aucune attaque
1	Nettoyage ou effleurement superficiel de profondeur échappant à toute mesure
2	Attaque superficielle (<1 mm) et limitée en étendue à au plus 1/10 de la surface développée de l'éprouvette ou forage unique de profondeur < à 3 mm
3	Attaque superficielle (<1 mm) de plus de 1/10 de la surface développée de l'éprouvette ou érosion (de 1 à 3 mm) sur une étendue ne dépassant pas 1/10 de la surface développée de l'éprouvette ou forages ponctuels ne s'étendant pas en cavernes et de profondeur supérieure à 3 mm
4	Erosion sur étendue supérieure à 1/10 de la surface développée de l'éprouvette ou attaque pénétrante supérieure à 3 mm s'étendant en caverne dans la masse de l'éprouvette et pouvant aller jusqu'à un stade de destruction très avancé

**Tableau 4.10 : Classes de durabilité du bois vis-à-vis des termites selon la norme EN117.**

Lors de l'essai, trois récipients sont préparés pour contenir des éprouvettes de *Pinus sylvestris* de même dimensions que celles du teck (50 ×15 ×20 mm selon les directions L, T, R). Ces éprouvettes sont utilisées comme référence pour la validation de l'essai au bout des 8

semaines d'exposition. Le taux de survie des termites dans ces trois récipients contenant l'essence de référence doit être supérieur à 50% pour que l'essai en cours soit validé.



**Fig.4.9 : Photos d'éprouvette de bois soumises à l'attaque des termites et correspondant aux 4 classes de durabilité.**

(a) : attaque 1 ; (b) : attaque 2-3 ; (c) : attaque 4.

A la suite des calculs de perte de masse absolue et relative, les analyses de variance ont été réalisées en considérant trois positions radiales dans le duramen : interne, intermédiaire et externe, dans le but de montrer l'effet de l'âge du bois sur la résistance des éprouvettes. Les valeurs numériques affichées dans les résultats ne tiennent pas compte de l'erreur expérimentale sur la mesure de la perte de masse absolue. L'existence ou non d'effet significatif de la "zone écologique", de la "parcelle" de prélèvement et des "arbres" sur la résistance des éprouvettes vis-à-vis des quatre champignons a également été étudiée.

## 4.8 – Résultats

### 4.8.1 – Durabilité naturelle vis-à-vis des champignons

#### 4.8.1.1 - Durabilité vis-à-vis de *Pycnoporus sanguineus*

##### *Variabilité intra-arbre*

L'analyse de la perte de masse absolue des éprouvettes en fonction de la position radiale montre qu'il n'existe pas d'effet significatif de l'âge du bois sur la durabilité naturelle vis-à-vis de *Pycnoporus sanguineus* (Fig.4.10). Les profils d'évolution radiale des pertes de masses absolues montrent des tendances très variées. Chez certains individus, la résistance vis-à-vis de *P. sanguineus* semble décroître du duramen interne vers le duramen externe, alors que le phénomène inverse est observé chez d'autres.

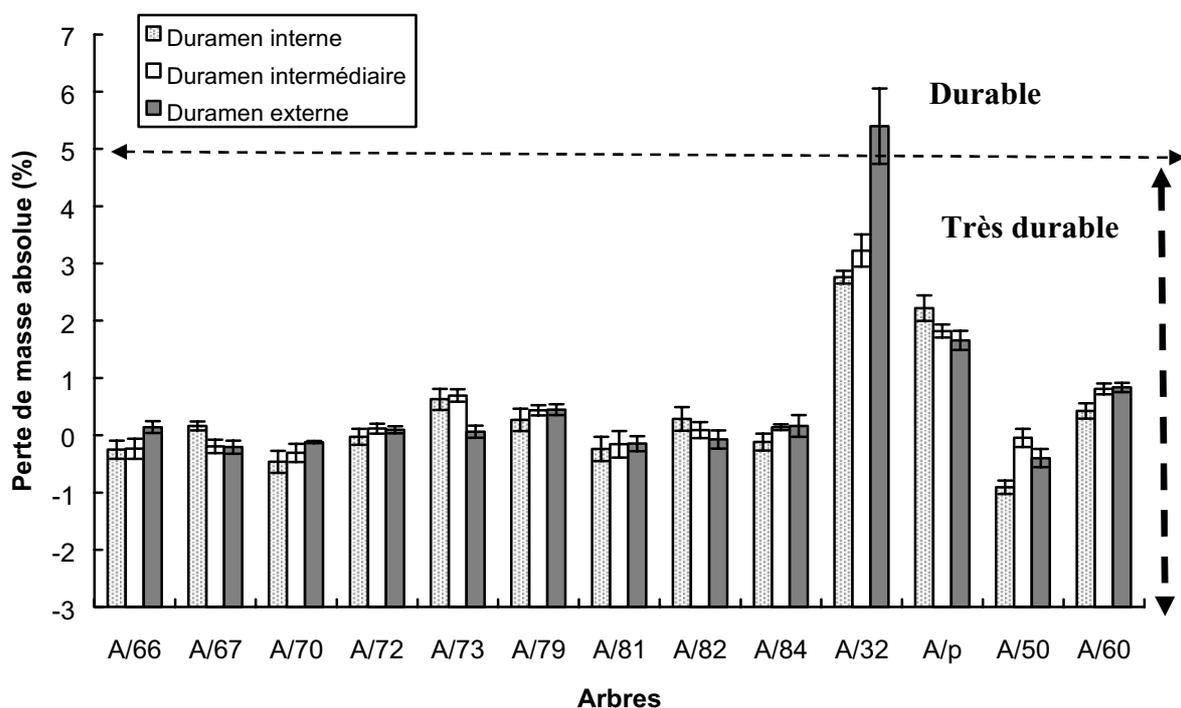
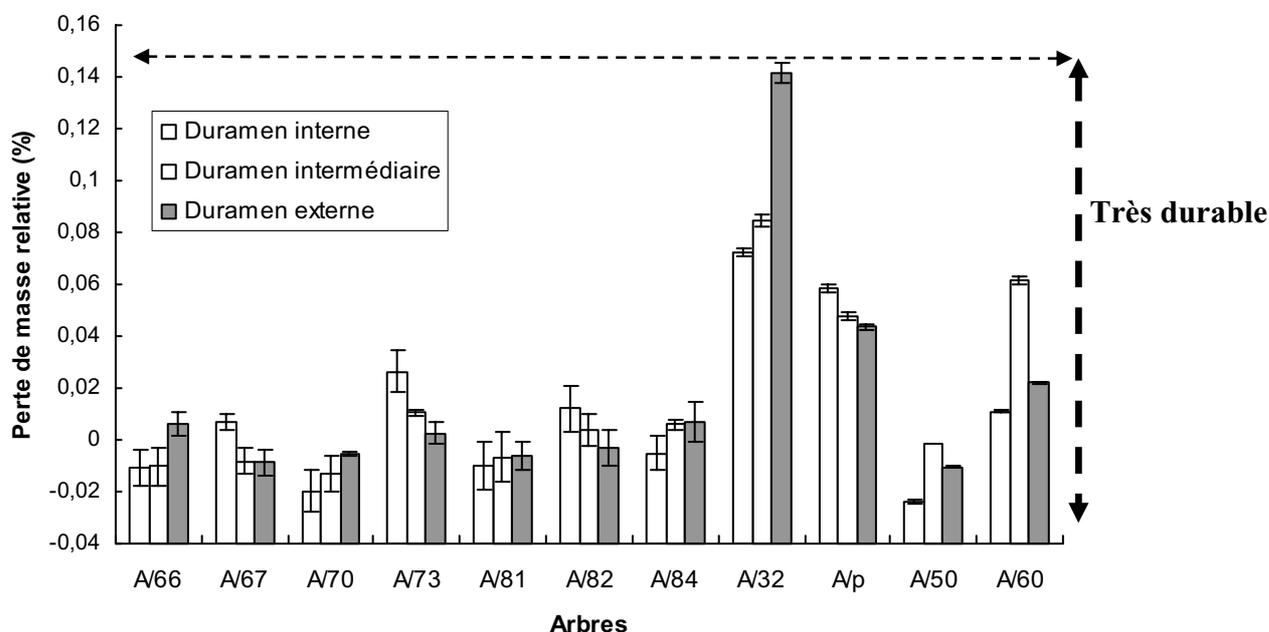


Fig 4.10 : Variation radiale des pertes de masse absolues des éprouvettes exposées à *Pycnoporus sanguineus*.

En se référant à la norme EN350-1 (Tableau 4.5), 359 éprouvettes sont classées très durables et deux éprouvettes sont durables.

La classification des éprouvettes selon leurs pertes de masse relatives révèle que toutes les éprouvettes sont très durables vis-à-vis de *P. sanguineus* puisqu'elles présentent des pertes de masse relative inférieure à 0,15% (Fig.4.11). Il faut rappeler que la perte de masse relative est le rapport entre la perte de masse absolue de l'éprouvette et celle de l'éprouvette de référence qui est le Hêtre dans le cas présent (Tableaux 4.7 et 4.8).

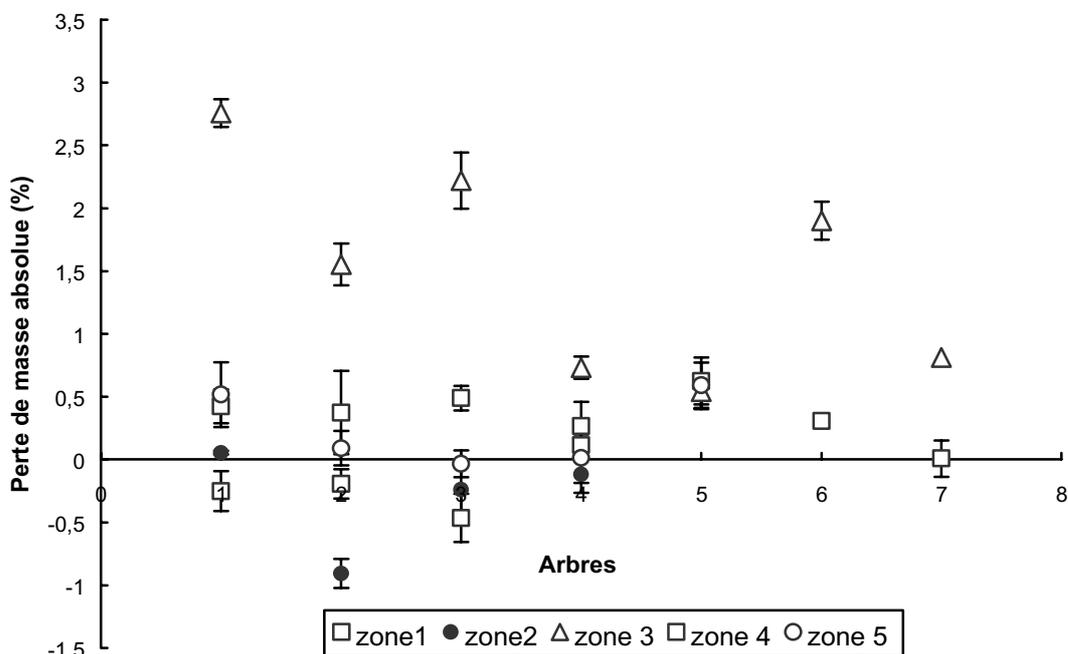


**Fig.4.11 : Variation de la perte de masse relative en fonction de l'âge du bois**  
(n = 361 éprouvettes exposées à *P. sanguineus*).

### *Variabilité inter-arbre*

Pour les quatre champignons étudiés, la variabilité inter arbre a porté sur une seule position radiale par arbre. Toutes les éprouvettes d'âge cambial compris entre 5-10 ans ont été considérées par arbre. L'analyse de variance a été réalisée sur les valeurs moyennes des éprouvettes de duramen interne de 28 arbres. Trois facteurs sont pris en compte : l'effet "arbre", l'effet de la "parcelle" de prélèvement et l'effet "zone écologique". Les résultats révèlent que les arbres diffèrent significativement du point de vue de leur résistance vis-à-vis

de *P. sanguineus* ( $P < 0,001$  ;  $F_{109,79} = 4,86$ ). Les parcelles sont aussi statistiquement différentes du point de vue de cette propriété ( $P < 0,001$  ;  $F_{26,12} = 9,24$ ). En terme de classe de durabilité, ces différences ne sont pas très intéressantes puisque tous les arbres sont classés très durables vis-à-vis de *P. sanguineus*, les pertes de masse absolue étant inférieures à 5% (Fig.4.12). Il existe aussi un effet significatif de la zone écologique sur la perte de masse ( $P < 0,001$  ;  $F_{103,99} = 42,35$ ). En effet, tous les arbres de la zone 3 sont nettement différents des autres. Ils présentent les pertes de masse absolue et relative les plus élevées comparativement à ceux des autres zones.

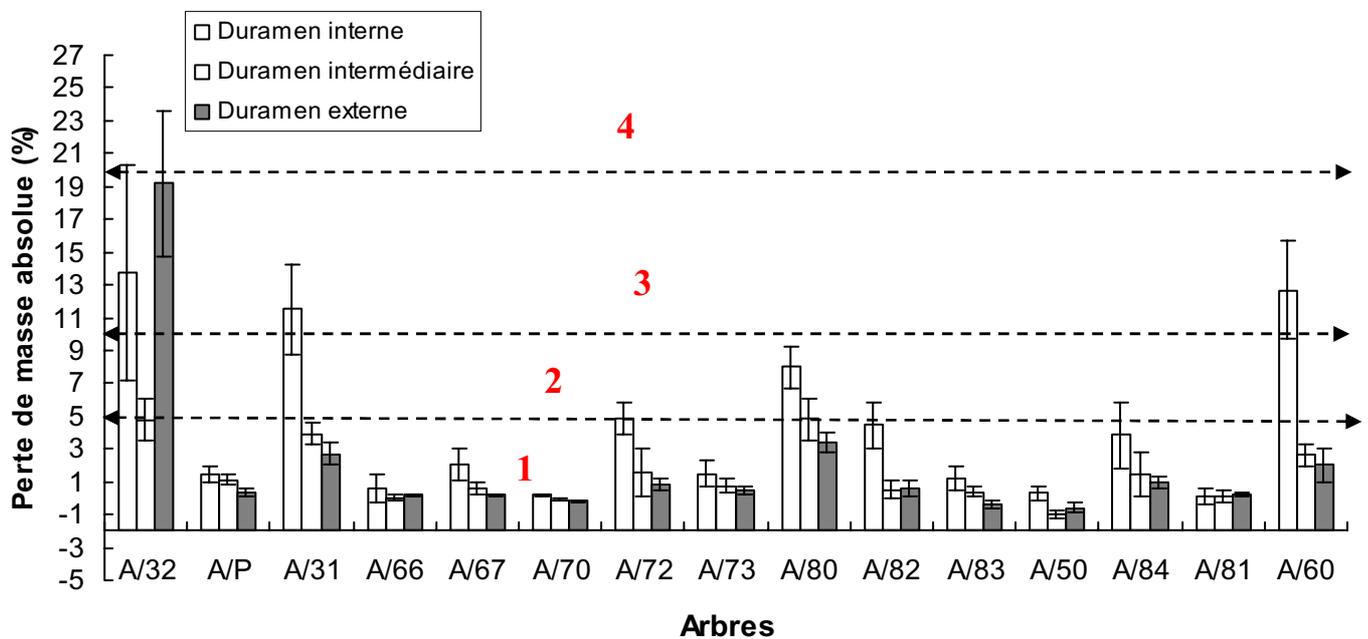


**Fig.4.12 : Variation de la perte de masse absolue des éprouvettes exposées à *P. sanguineus* en fonction des arbres**  
(n = 135 éprouvettes provenant de 28 arbres et de cinq zones écologiques).

#### 4.8.1.2 - Durabilité vis-à-vis d'*Antrodia sp.*

##### *Variabilité intra-arbre*

Les analyses concernant la variation de la durabilité en fonction de l'âge du bois présentent un réel intérêt pour les éprouvettes exposées à *Antrodia sp.*, puisqu'il s'agit du seul champignon tropical ayant provoqué des pertes de masse suffisamment distinctes en terme de classe de durabilité. En effet, les valeurs moyennes par position radiale varient de -0,90% à 17% pour les éprouvettes de bois de cœur.

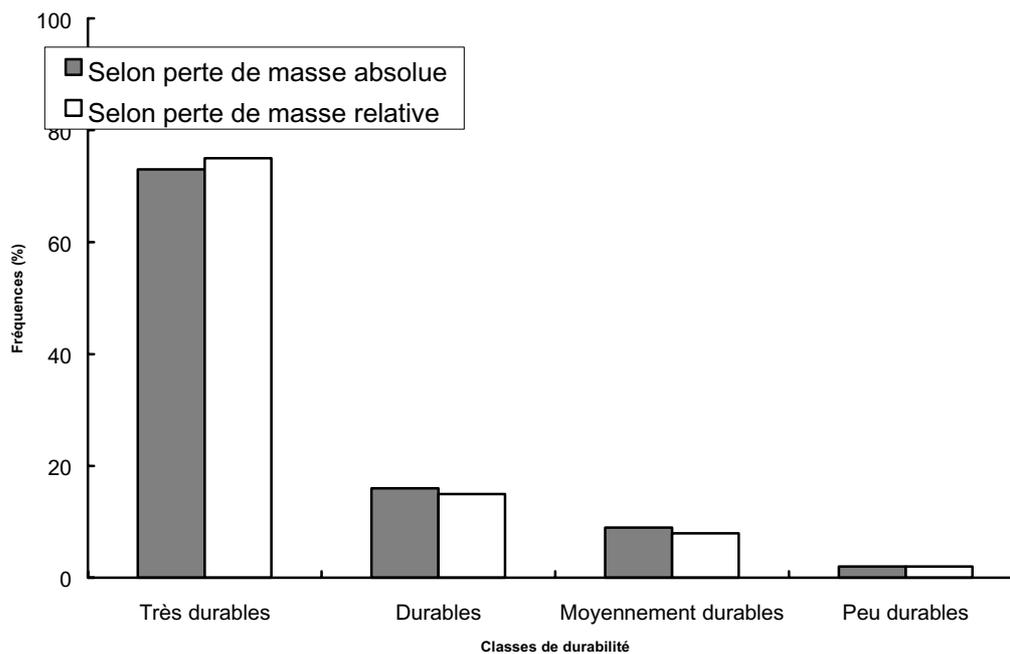


**Fig.4.13 : Variation radiale des pertes de masse absolues des éprouvettes exposées à *Antrodia sp.* 1 = très durable ; 2 = durable ; 3 = moyennement durable ; 4 = peu durable**

(n = 357 éprouvettes de bois de cœur exposées à *Antrodia sp.*, 28 arbres et cinq zones écologiques)

A l'exception d'un seul arbre, l'âge du bois a une influence significative sur la durabilité naturelle vis-à-vis d'*Antrodia sp.* ( $P < 0,001$ ). Cet effet se traduit par un gradient radial de durabilité croissant (perte de masse absolue décroissante) du duramen interne vers le duramen externe vis-à-vis de ce champignon de pourriture cubique (Fig.4.13). Pour tous les arbres, les éprouvettes les plus proches de l'aubier sont les plus durables et se situent dans la classe très durables (perte de masse absolue inférieure à 5%).

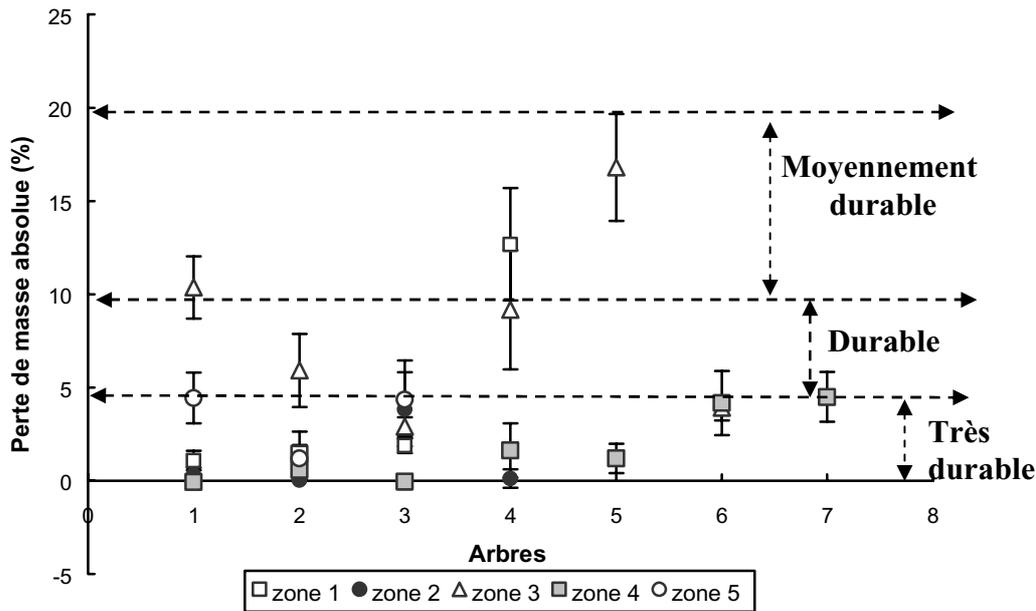
En se basant sur le calcul de perte de masse absolue, 73% des éprouvettes sont très durables, 16% sont durables, 9% sont moyennement durables et 2% sont peu durables. Par contre, si l'on considère les pertes de masse relative par rapport aux éprouvettes témoins de Pin sylvestre, 75% des éprouvettes sont classées très durables, 15% sont durables, 8% sont moyennement durables et 2% sont peu durables. La conversion de perte de masse absolue en perte de masse relative ne modifie pas de manière sensible la distribution des éprouvettes par classe de durabilité (Fig.4.14).



**Fig.4.14 : Distribution des éprouvettes exposées à *Antrodia sp.* selon le calcul des pertes de masse absolues et relatives.**

### *Variabilité inter – arbre*

En perte de masse absolue, 83% des arbres sont très durables, 9% sont durables et 8% sont moyennement durables. Il faut noter que seulement trois classes de durabilité sont représentées lorsqu'on considère les valeurs moyennes par arbre. Les éprouvettes les moins durables vis-à-vis d'*Antrodia sp.* sont celles situées au contact de la moelle entre 0-5 ans. Les éprouvettes qui se situent dans la classe peu durable n'apparaissent plus lorsqu'on considère les valeurs moyennes par arbres, celles-ci étant calculées à partir des pertes de masse mesurées sur 110 éprouvettes d'âge compris entre 5-10 ans.



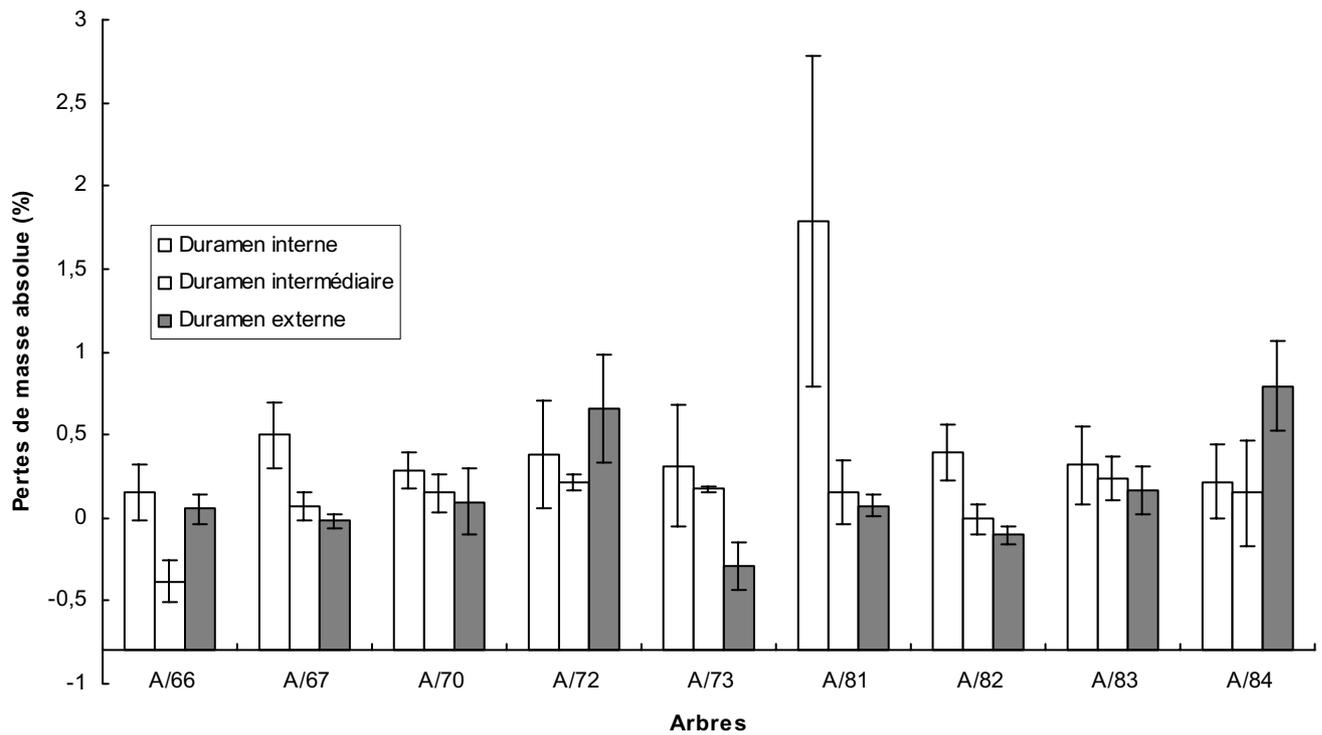
**Fig.4.15 : Pertes de masse absolue en fonction des arbres et des zones écologiques** (n = 110 éprouvettes de bois de cœur provenant de 24 arbres, exposées à *Antrodia sp.* ).

Comme pour *P. sanguineus*, les arbres ( $P < 0,001$  ;  $F_{94,70} = 8,03$ ) et les parcelles ( $P < 0,001$  ;  $F_{23,10} = 20,70$ ) diffèrent significativement du point de vue de leur résistance face à *Antrodia sp.* La zone écologique 3 diffère statistiquement des autres ( $P = 0,037$  ;  $F_{23,19} = 3,17$ ). Les arbres qui ont poussé dans cette zone sont les moins résistants et sont plutôt dans les classes de durabilité "durable" et "moyennement durable" en perte de masse absolue (Fig.4.15). En perte de masse relative, les tecks de la zone 3 sont classés en moyenne "durable" pendant que les autres arbres sont "très durable".

#### 4.8.1.3 - Durabilité vis-à-vis de *Gloeophyllum trabeum*.

##### *Variabilité intra-rbre*

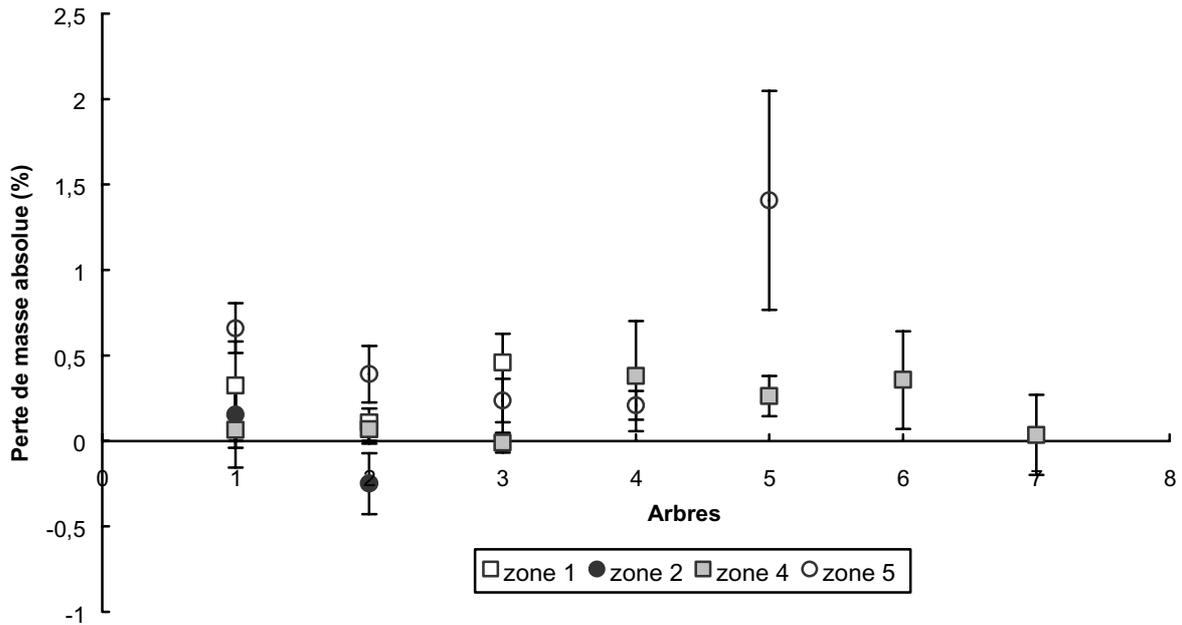
En perte de masse absolue comme en perte de masse relative, toutes les éprouvettes sont classées très durables vis-à-vis de *G. trabeum* (Fig.4.16). Les pertes de masse moyennes absolues par position radiale varient de -0,3% à 2%. Ces valeurs varient de -0,018% à 0,09% si l'on considère les pertes de masse relative par rapport aux éprouvettes témoins de Pin sylvestre. La position radiale de l'éprouvette influence de manière significative sa résistance vis-à-vis de ce champignon ( $P = 0,002$ ). Cet effet "position radiale" se manifeste en général par une augmentation de la durabilité naturelle du duramen interne vers le duramen externe.



**Fig.4.16 : Variation radiale de la perte de masse absolue des éprouvettes exposées à *G. trabeum* (n = 194 éprouvettes de bois de cœur).**

#### *Variabilité inter-arbre*

L'ensemble des arbres est très durable vis-à-vis de *G. trabeum* (Fig.4.17). Les pertes de masse absolues par arbre varient de -0,2% à 1,4%. Le classement par le calcul de la perte de masse relative ne modifie pas la distribution des arbres en terme de résistance face à ce champignon de pourriture brune. Les moyennes par arbre en perte de masse relative varient de -0,01% à 0,06%. Contrairement aux deux champignons des régions tropicales (*P. sanguineus* et *Antrodia sp.*), les arbres ne diffèrent pas de manière significative du point de vue de leur résistance à ce champignon des zones tempérées. De même, il n'existe pas de différence notable de la perte de masse entre les différentes zones écologiques et entre les différentes parcelles de prélèvement.

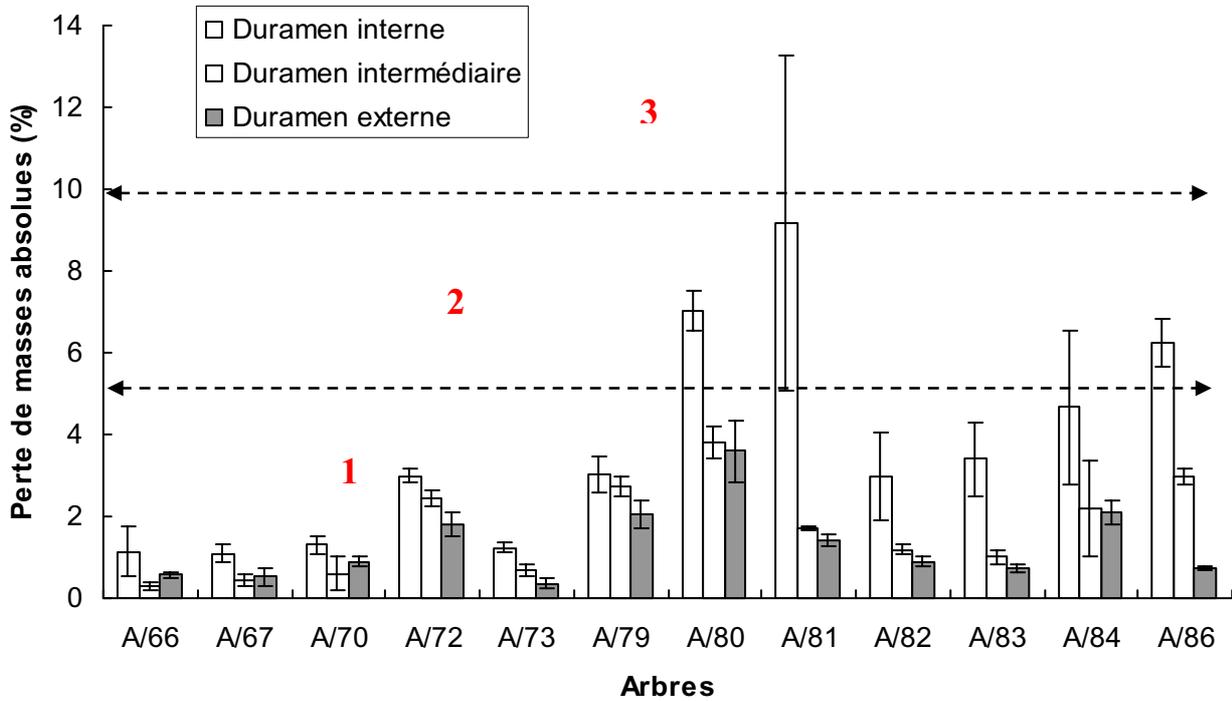


**Fig.4.17 : Pertes de masse absolue en fonction des arbres et des zones écologiques**  
(n = 68 éprouvettes de bois de cœur provenant de 17 arbres, exposées à *G. trabeum*).

#### 4.8.1.4 - Durabilité naturelle vis-à-vis de *Coriolus versicolor*

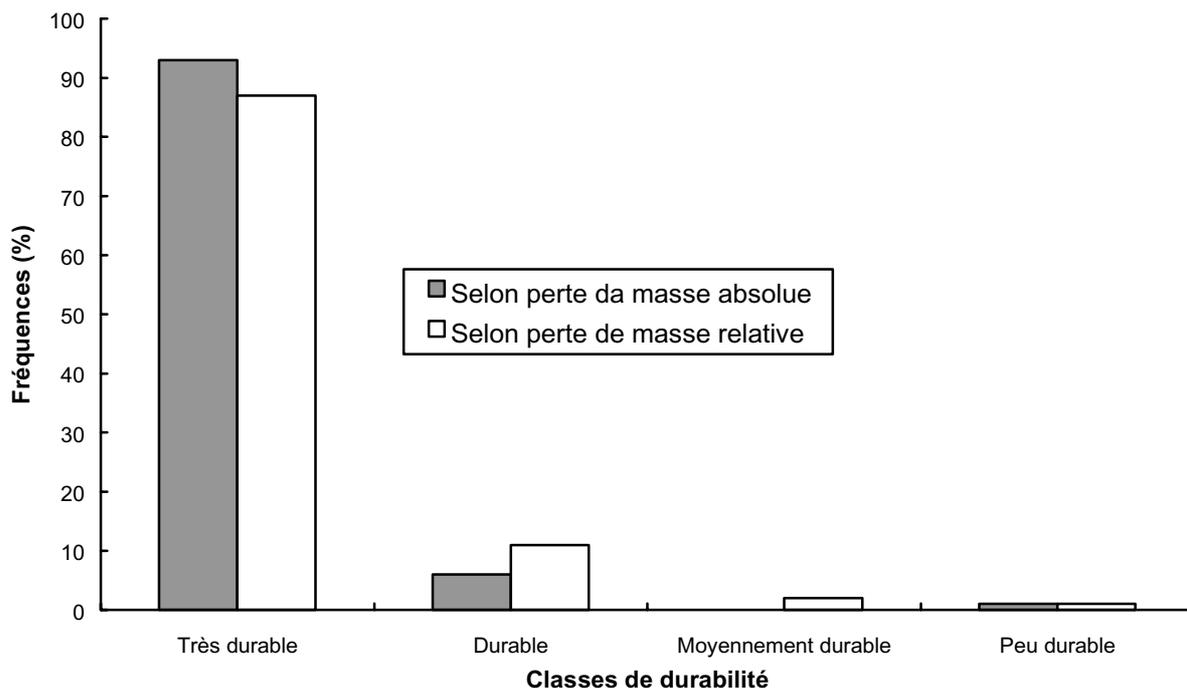
##### *Variabilité intra-arbre*

Comme dans le cas d'*Antrodia sp.* et de *G. trabeum*, l'âge du bois présente une influence significative sur la résistance des éprouvettes face à *C. versicolor* ( $P < 0,001$ ). Cet effet "âge du bois" se traduit par un gradient radial de durabilité croissant du duramen interne vers le duramen externe c'est-à-dire une résistance moindre dans la zone de duramen interne. Trois classes de durabilité sont représentées ; sur 193 éprouvettes de duramen exposées à *C. versicolor*, 93% sont très durables, 6% sont durables et 1% sont peu durables (perte de masse > 20%) en perte de masse absolue (Fig.4.18). La classe "peu durable" n'apparaît pas lorsqu' il s'agit des moyennes de pertes de masse par position radiale.



**Fig.4.18 : Variation de la perte de masse absolue en fonction de l'âge du bois des éprouvettes exposées à *Coriolus versicolor* (n = 193 éprouvettes de bois de cœur).**

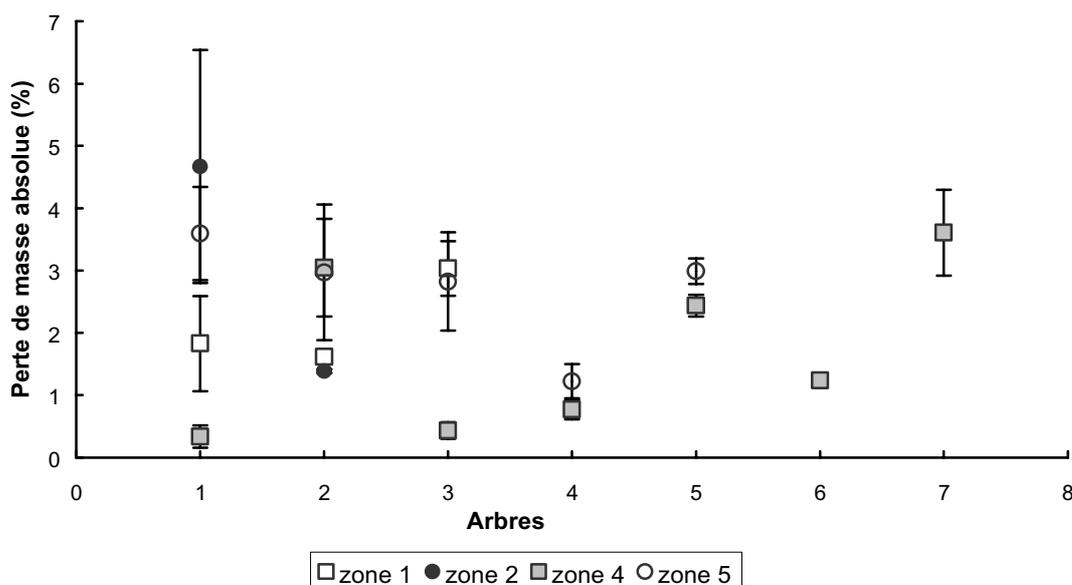
Par contre, en faisant le rapport entre la perte de masse absolue des éprouvettes et celle des éprouvettes témoins de Hêtre qui est de 24%, quatre classes de durabilité se distinguent. 87% des éprouvettes sont très durables, 11% sont durables, 2% sont moyennement durables et 1% sont peu durables. 6% des échantillons classés "très durables" et qui présentaient des pertes de masse absolue entre 4-5% sont passés dans la classe de durabilité inférieure c'est-à-dire "durable" en perte de masse relative. De même, certains échantillons classés "durables" en perte de masse absolue se retrouvent en classe "moyennement durable" lors du calcul des pertes de masses relatives. L'utilisation de ces deux systèmes de classification modifie de façon sensible la distribution de la résistance des éprouvettes vis-à-vis de *C. versicolor* (Fig.4.19).



**Fig.4.19 : Distribution des éprouvettes exposées à *C. versicolor* en classe de durabilité selon le calcul des pertes de masse absolues et relatives.**

### *Variabilité inter-arbre*

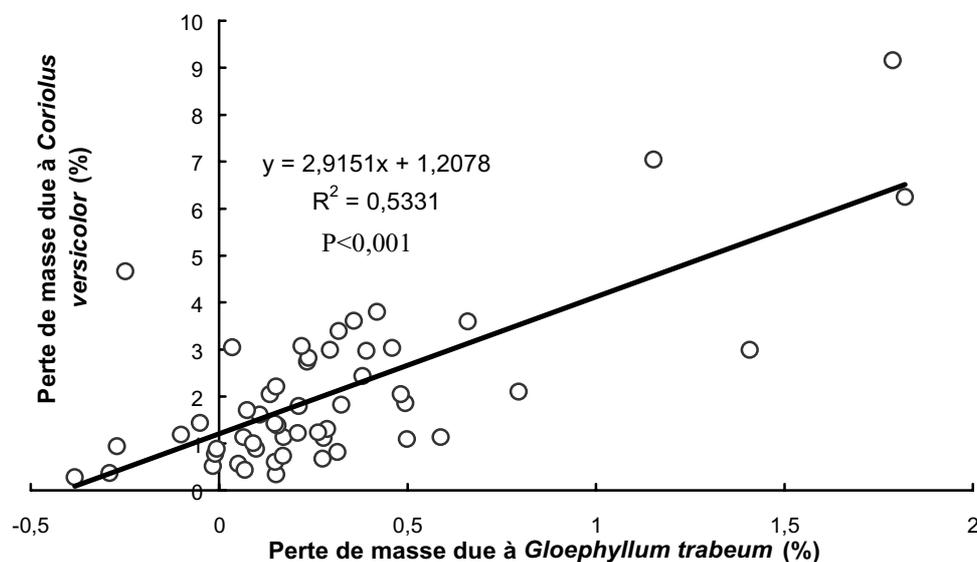
Par rapport aux pertes de masse absolues des éprouvettes d'âge compris entre 5-10 ans, 94% des arbres sont classés très durables et 6% sont classés durables vis-à-vis de *Coriolus versicolor* (Fig.4.20).



**Fig.4.20 : Perte de masse absolue en fonction des arbres et des zones écologiques (n = 68 éprouvettes de bois de cœur provenant de 17 arbres, exposées à *C. versicolor*).**

En perte de masse relative, 88% des arbres sont très durables et 12% sont durables. Sur l'échantillon d'arbre pris en compte, l'effet "zone écologique" et l'effet "parcelle de prélèvement" ne présentent aucune influence significative sur la résistance des arbres face à *C. versicolor*. Par contre, les arbres diffèrent de façon significative ( $P < 0,001$  ;  $F_{57,41} = 3,83$ ).

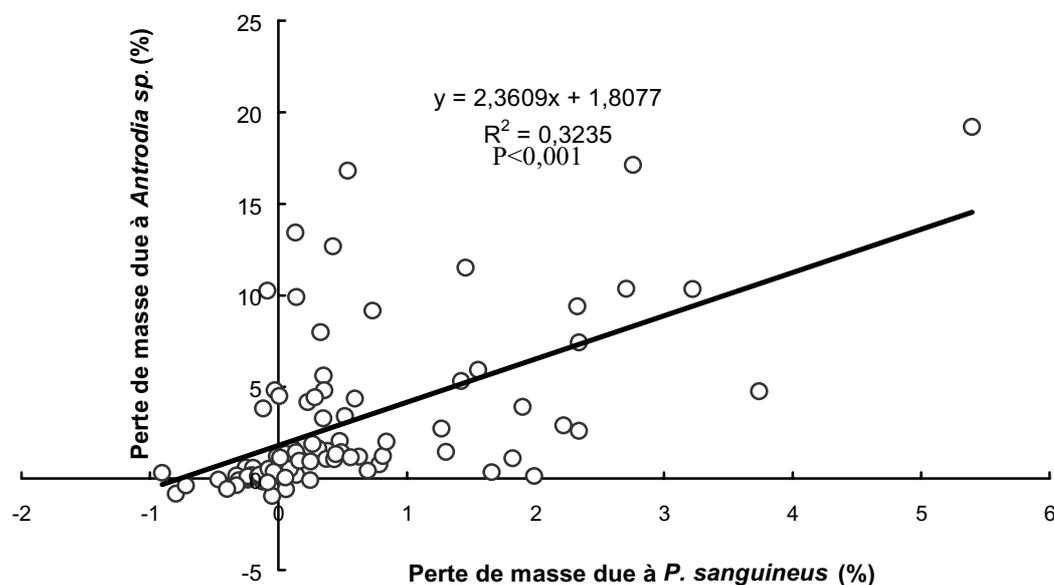
**Remarque :** Sur quatre champignons de pourriture étudiés, les résultats révèlent que seuls deux ont pu provoquer des pertes de masse suffisamment distinctes en terme de classe de durabilité. La bonne corrélation entre les pertes de masse provoquées d'une part par les deux champignons tropicaux (Fig.4.22) et d'autre part par les deux champignons de zone tempérée (Fig.4.21) suggère qu'en terme d'estimation de la durabilité, les essais pourraient dans l'avenir être limités à un seul champignon par cas pour le Teck : *Antrodia sp.* pour les pourritures de zone tropicale et *Coriolus versicolor* pour celles des régions tempérées. Les essais "champignons" menés sur 18 espèces conifères et feuillus y compris le Teck, vis-à-vis de diverses pourritures ont d'ailleurs montré qu'on pouvait se limiter à *Coriolus versicolor* (cas des champignons de zones tempérées) comme référence pour les feuillus (Van Acker et al. 1998).



**Fig.4.21 : Relation entre pertes de masse dues à *C. versicolor* et à *G. trabeum*.**

Dans le cas particulier du Teck au Togo, les échantillons classés "très durables" et "durables" vis-à-vis d'*Antrodia sp.*, seraient de toute évidence très résistants face à *Pycnoporus sanguineus*, de même les éprouvettes qui seront dans les classes de durabilité 1 et 2 face à *Coriolus versicolor* seraient très durables à *Gloeophyllum trabeum*. Cependant, la forte

variabilité des pertes de masse observée sur l'échantillonnage oblige à la prudence en ce qui concerne les autres classes de durabilité.



**Fig.4.22 : Relation entre pertes de masse absolues dues à *Antrodia sp* et à *P. sanguineus*.**

#### 4.8.2 – Durabilité naturelle vis-à-vis des termites

Afin d'attribuer une classe de durabilité à chaque position radiale, les cotations obtenues pour tous les échantillons de même âge cambial ont été moyennées (Tableau 4.10). A chaque fois que cette moyenne est à cheval sur deux classes de durabilité, c'est l'attaque la plus défavorable qui a été retenue, c'est-à-dire la classe de durabilité la plus faible. Les positions radiales ici correspondent à celles décrites dans le tableau 4.6.

Position radiale	Arbre 61	Arbre 32	Arbre 40	Arbre 51	Arbre 70	Arbre 50	Arbre 33
1	0,50 (141)	1 (173)	1 (0)	0,66 (173)	0,66 (86)	0,66 (173)	0,67 (87)
2	1 (100)	0,66 (141)	1 (0)	0,33 (86)	0 (0)	0,33 (87)	0,33 (173)
3	0,66 (87)	0 (0)	1 (0)	1 (173)	0 (0)	0,33 (87)	0,33 (173)

**Tableau 4.10 : Classe de durabilité moyenne par arbre et par position radiale des éprouvettes exposées à *Heterotermes indicola*.** Les valeurs en caractères normales et entre parenthèses (en caractères italiques) correspondent respectivement aux intensités moyennes d'attaques et aux coefficients de variation (%) calculés à partir des éprouvettes de même âge cambial.

Sur 73 éprouvettes exposées à *Heterotermes indicola*, 41% sont classées très durables, 52% sont durables et 7% sont moyennement durables en utilisant les cotations visuelles attribuées à chaque échantillon. Par contre en se basant sur l'intensité moyenne d'attaque par position radiale, il ne ressort plus que deux classes de durabilité, les classes "très durable"(attaque 0) et "durable" (attaque 1). La classe "moyennement durable" n'apparaît plus car seulement 7% des éprouvettes ont été attaquées au niveau 2. Aucune influence de l'âge cambial de l'éprouvette sur la durabilité face aux termites n'a pu être mise en évidence.

La comparaison entre l'intensité moyenne d'attaque des termites et les pertes de masses dues aux attaques d'*Antrodia sp.*, montre qu'il n'existe pas de liens notables entre ces deux propriétés du bois de teck. Le fait qu'un échantillon soit résistant aux attaques des champignons ne signifie pas forcément qu'il l'est vis-à-vis des attaques de termites et vis versa. *Antrodia sp.* a été choisi car il s'agit du champignon tropical le plus virulent.

## Discussion

Par rapport aux quatre souches de pourriture testées, *Antrodia sp.* (des zones tropicales) et *Coriolus versicolor* (des zones tempérées) sont les champignons qui ont causés les dégâts les plus importants avec des pertes de masse allant jusqu'à 20% de la masse sèche des éprouvettes de duramen. Ce résultat laisse penser que l'utilisation des champignons pour tester les essences tropicales ne peut pas se limiter uniquement aux souches tropicales. Il n'existe pas de différence notable entre l'intensité d'attaque de ces deux types de champignon et la durabilité vis-à-vis d'un groupe de champignons ne peut pas servir à prédire celle vis-à-vis d'autres organismes (De Groot et al. 2000). Les bois tropicaux peuvent être aussi bien attaqués par les pourritures de zones tropicales que celles des zones tempérées dès lors que les conditions de croissance du champignon sont réunies. Avec des pertes de masse relatives strictement inférieures à 0,15%, le bois de cœur du teck en plantation doit être considéré comme très durable face à *P. sanguineus* et à *G. trabeum*. Les résultats de la zone aubieuse ne sont pas présentés mais dans tous les cas, l'aubier du teck doit être considéré comme non durable puisque les pertes de masse absolues sont supérieures à 30%.

L'expression des résultats de durabilité sous forme de perte de masse absolue ou relative peut générer des différences plus ou moins sensibles. Dans le cas des éprouvettes exposées à *Antrodia sp.*, l'utilisation de la perte de masse relative entraîne une augmentation du pourcentage d'échantillons classés très durables alors que dans le cas de *C. versicolor*, il se produit le phénomène inverse. A partir de l'étude de la durabilité naturelle d'une vingtaine d'espèces tropicales et tempérées, Van Acker et al. (1998) recommandent de déduire la durabilité d'une essence directement de sa perte de masse absolue. En effet, cette dernière expression de masse est préférable si l'on veut s'affranchir de la variabilité naturelle de l'essence de référence.

L'influence de l'âge du bois sur la durabilité naturelle des éprouvettes a été mise en évidence dans le cas de trois champignons (*Antrodia sp.*, *G. trabeum* et *C. versicolor*). Dans ces trois cas, les échantillons proches de la moelle, c'est-à-dire les éprouvettes de duramen interne sont être les moins résistantes aux attaques des champignons. Il est généralement admis que chez le teck, le bois proche de la moelle est moins durable (Simatupang et Yamamoto 1999). Ce même gradient radial de durabilité a été démontré chez d'autres espèces notamment le Dabéma (*Piptadeniastrum africanum*) vis-à-vis de deux pourritures fibreuses des zones tropicales (Deon et al. 1980) et le châtaignier (*Castanea sativa*), (Dumoncaud 2000). Scheffer

et *al.* (1966) expliquent cette baisse de durabilité naturelle du duramen externe vers le duramen interne par la baisse du taux des extraits dans le bois proche de la moelle. Les autres sources de variabilité étudiées c'est-à-dire l'effet de la "zone écologique", de la "parcelle" de prélèvement et de "l'arbre" sur la durabilité dépendent elles aussi des champignons pris en compte. Par rapport aux deux champignons des régions tropicales, ces trois facteurs de variabilité étudiés au niveau inter arbres sont significatifs. La zone écologique 3 se distingue nettement des autres, les tecks ayant poussé dans cette zone sont en moyenne moins résistants aux attaques (pertes de masse absolue et relatives les plus élevées). Vis-à-vis de *P. sanguineus*, cette différence significative entre les arbres de la zone 3 et les autres ne se traduit pas par un changement de classe de durabilité mais face à *Antrodia sp.*, trois classes de durabilité se distinguent. Cette différence de résistance entre les arbres pourrait être attribuée à la virulence des souches de champignon utilisé. Tous les arbres de la zone 3 ont été testés dans le premier lot d'échantillons, il s'agit des souches ayant provoquées les dégradations les plus importantes (Tableaux 4.5 et 4.6). Il est préférable dans ce cas de travailler sur les pertes de masses relatives afin de s'affranchir de la variabilité de la virulence des souches. Il faut noter que la zone 3 représente celle où les arbres sont les moins résistants vis-à-vis d'*Antrodia sp.*, même en considérant les pertes de masse relative.

Il est possible que cette dégradation importante subie par les échantillons de la zone 3 soit aussi liée à la nature et/ou taux d'extraits à propriété antifongique qu'ils renferment en supposant que les arbres ne soient tous issus d'une même provenance de teck.

Par rapport aux deux champignons recommandés par la norme EN113, *G. trabeum* et *C. versicolor*, aucune différence notable n'a été observée entre les parcelles et entre les quatre zones écologiques testées. Il existe cependant un "effet arbre" significatif vis-à-vis de la pourriture blanche. Ces résultats pourraient ouvrir des voies à la sélection génétique sur les arbres les plus résistants s'ils étaient confirmés sur un échantillonnage plus important et complétés par l'analyse des extraits du bois.

Les résultats de durabilité aux termites montrent que les Tecks en plantation présentent une grande variabilité et sont "très durables" à "moyennement durables" contrairement à ceux issus des forêts naturelles (Indonésie Java, Thaïlande et Myanmar) classés très durables (Baillères et Durand 2000). Les coefficients de variation très élevés obtenus sur les éprouvettes de même âge témoignent de cela. Les niveaux d'attaques 0 ; 1 ; et 2 s'observent sur une série d'échantillon de même âge de bois et à hauteur égal. Les essais termites

effectués sur le Teck en plantation dans d'autres pays de l'Afrique notamment le Bénin, la Côte d'Ivoire, le Burkina Faso et le Congo montrent les mêmes tendances que celui du Togo (Baillères et Durand 2000).

## ***CHAPITRE 5***

---

### ***COULEUR DU BOIS ET EVALUATION INDIRECTE DE LA DURABILITE NATURELLE***

---



## Introduction

Dans le but d'avoir une connaissance des qualités esthétiques du bois de teck en plantation au Togo, ce chapitre s'intéresse dans une première partie à l'analyse de la variabilité des paramètres couleur en fonction de l'âge du bois et de l'influence de la face mesurée (LR ou TR). La comparaison des paramètres de couleur selon les zones écologiques et/ou stations est également faite. La deuxième partie, propose quelques méthodes d'évaluation rapide, non destructives de la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons lignivores en analysant les liaisons possibles entre la résistance du bois et d'autres propriétés du bois plus facilement mesurables telles que la couleur et la densité du bois.

Parmi les caractéristiques technologiques et esthétiques importantes des bois utilisés dans la construction, dans l'ameublement et dans la décoration, la couleur et la durabilité naturelle occupent une place de premier plan. Les propriétés esthétiques, qui peuvent être regroupées sous le terme générique de figure comprennent outre la couleur, la veinure, le grain et la texture. Sur le marché international, la couleur reste l'une des principales qualités qui font du teck l'un des meilleurs bois tropicaux (Kjaer et *al.*1999). Au Togo, contrairement à certains critères qui rentrent dans la classification de la qualité du bois (Chap.1.5), le critère "couleur" reste imprécis dans l'utilisation du teck. Généralement, les utilisateurs recherchent une couleur bien "foncée" et homogène. Mis à part les phénomènes de coloration anormale qui se développent chez certaines espèces (Charrier 1992), il faut noter que les changements naturels de la couleur entre les arbres d'une même espèce constituent un atout pour le matériau bois. Atout parce que l'appréciation de la couleur varie énormément selon les consommateurs et selon les tendances à la mode.

La variabilité de la couleur du bois a de multiples origines liée soit au matériau même, tels :

- le plan ligneux (radial, tangentiel ou longitudinal) ;
- l'âge (position de la mesure par rapport à la moelle) ;
- l'orientation du fil du bois ;
- la largeur des cernes (croissance et texture) etc ;
- les provenances, les espèces et les individus ;

soit à des facteurs exogènes comme le type de sol, les traitements thermiques, la photodégradation (action de la lumière visible, eau), etc.

Peu de travaux ont évalué l'importance de la couleur en grandeurs mesurables. Mazet et Janin (1990) ont tenté de mettre en évidence le rôle de la couleur dans l'appréciation du bois de chêne (*Quercus* spp) par des professionnels européens. Boardman et al. (1992) ont essayé d'utiliser la couleur comme outil pour discriminer les classes de qualité sur des placages de noyer noir (*Juglans nigra*). Dumonceaud (2000) a aussi tenté d'utiliser la couleur comme indicateur de la durabilité naturelle chez le Chataignier (*Castanea sativa*), et a trouvé que la prédiction de la résistance naturelle de ce bois pouvait se faire à partir de la mesure des paramètres couleur. En ce qui concerne les bois tropicaux, Nishino et al. (1998) ont mesuré les valeurs colorimétriques chez 97 espèces issues de la forêt guyanaise. Les auteurs concluent que les bois de cette forêt peuvent être classés en deux groupes, celui des bois à clarté élevée et celui des bois à faible clarté. Peu de données sont disponibles sur la couleur du Teck de plantation. Baillères et Durand (2000) la décrivent comme étant variable suivant les provenances. L'influence génétique sur la couleur n'est pas du tout étudiée au niveau des Tecks de plantation en Afrique, faute d'existence de tests de provenance ou de clones. En résumé, cette mesure physique, qu'est la couleur est mal connue au niveau des espèces tropicales et est souvent utilisée chez les espèces tempérées comme outil de tri de la qualité ou comme indicateurs d'autres propriétés comme la durabilité naturelle.

En effet, l'évaluation de la durabilité naturelle est une mesure très compliquée à mettre en place. Les tests normalisés qui existent dans ce domaine (NF EN 350-1, NF EN 350-2 et NF EN 113), présentent au moins trois inconvénients majeurs :

- les méthodes d'évaluation sont destructives ;
- les temps d'analyse sont très longs. Dans le cas de la norme utilisée lors de la présente étude, le temps de préparation du matériel biologique (champignons) plus la durée de l'essai sont d'environ six mois pour chaque lot d'éprouvettes ;
- les coûts de réalisation, liés à la nature biologique et à l'entretien des agents de dégradation, sont souvent très élevés.

Comme déjà soulignée, la durabilité naturelle peut être très variable d'un individu à l'autre pour une essence donnée, et aussi à l'intérieur de l'arbre (Chapitre 4). Dans le cas particulier du teck en plantation au Togo, on a pu montrer que vis-à-vis des champignons tropicaux étudiés (*P. sanguineus* et *Antrodia* sp.), la résistance du bois pouvait varier d'une parcelle à l'autre et entre les arbres.

Il est intéressant de voir dans quelle mesure certaines propriétés du bois notamment la couleur et les propriétés mécaniques et physiques pourraient servir de façon prédictive, d'indicateurs ou de marqueurs de la durabilité naturelle aux champignons, propriété biologique, longue et contraignante à qualifier.

## 5.1– Matériel végétal

Dans le cas du premier lot d'échantillon (chapitre 4.2.1), toutes les éprouvettes type 3, contiguës aux éprouvettes de durabilité naturelles ont préalablement été mesurées du point de vue de la couleur selon deux faces, les faces TR et les faces LR. Ces mesures ont été réalisées sur les éprouvettes avant leur passage à l'étuve (103°C) pour la détermination du facteur correcteur  $k$  (Fig.4.5). Dans le second lot d'éprouvette, les mesures de couleur ont été faites sur les éprouvettes qui ont aussi servi à la mesure de la durabilité, c'est-à-dire les éprouvettes type 2 avant la mise en contact avec les champignons (Fig.4.6). Cette fois, la couleur n'a été mesurée que sur la face TR des éprouvettes (Tableau 5.1).

	Type d'éprouvette	Effectif	Face mesurée
Lot 1	Type 3	269	TR, LR
Lot 2	Type 2	849	TR

**Tableau 5.1 : Récapitulatif des types, du nombre d'éprouvette et des faces mesurées.**

## 5.2 – Méthode

### *Mesure de la couleur*

L'appareil utilisé est le spectrocolorimètre "Microflash 100", de marque Datacolor. Les conditions géométriques d'éclairage et de mesure sont les suivantes :

- type de réflexion : spéculaire exclue ;
- type d'illuminant : A ;
- système de repérage : CIE (1976)  $L^* a^* b^*$  ;
- géométrie de lecture : 45° ;
- valeur de l'angle correspondant aux courbes de sensibilité de l'observateur standard de la CIE : 10°.

Le principe de la mesure repose sur l'existence de trois types de récepteurs localisés sur la rétine de l'œil humain (Janin 1994). Ces récepteurs sont à la base de la trivariance de la vision humaine de la couleur. La réponse de ces trois types de récepteurs de l'œil à différentes longueurs d'onde est bien connue et a conduit à l'élaboration du système CIELAB. Ce système, tridimensionnel, comporte une échelle de clarté (L) et deux axes de chromaticité vert-rouge, et bleu-jaune (Fig.5.1). Les spectrocolorimètres qui sont des appareils de mesure de la couleur, sont équipés de monochromateurs (séparateurs de longueur d'onde) et fournissent les valeurs des réflectances des objets colorés, ce qui permet le calcul des composantes trichromatiques. Les résultats de mesure de la couleur sont exprimés à l'aide des paramètres suivants :

- coordonnée chromatique  $a^*$ , correspondant à l'axe vert-rouge ;
- coordonnée chromatique  $b^*$ , correspondant à l'axe bleu-jaune ;
- clarté  $L^*$ , variant de 0 (le noir parfait) à 100 (le blanc parfait).

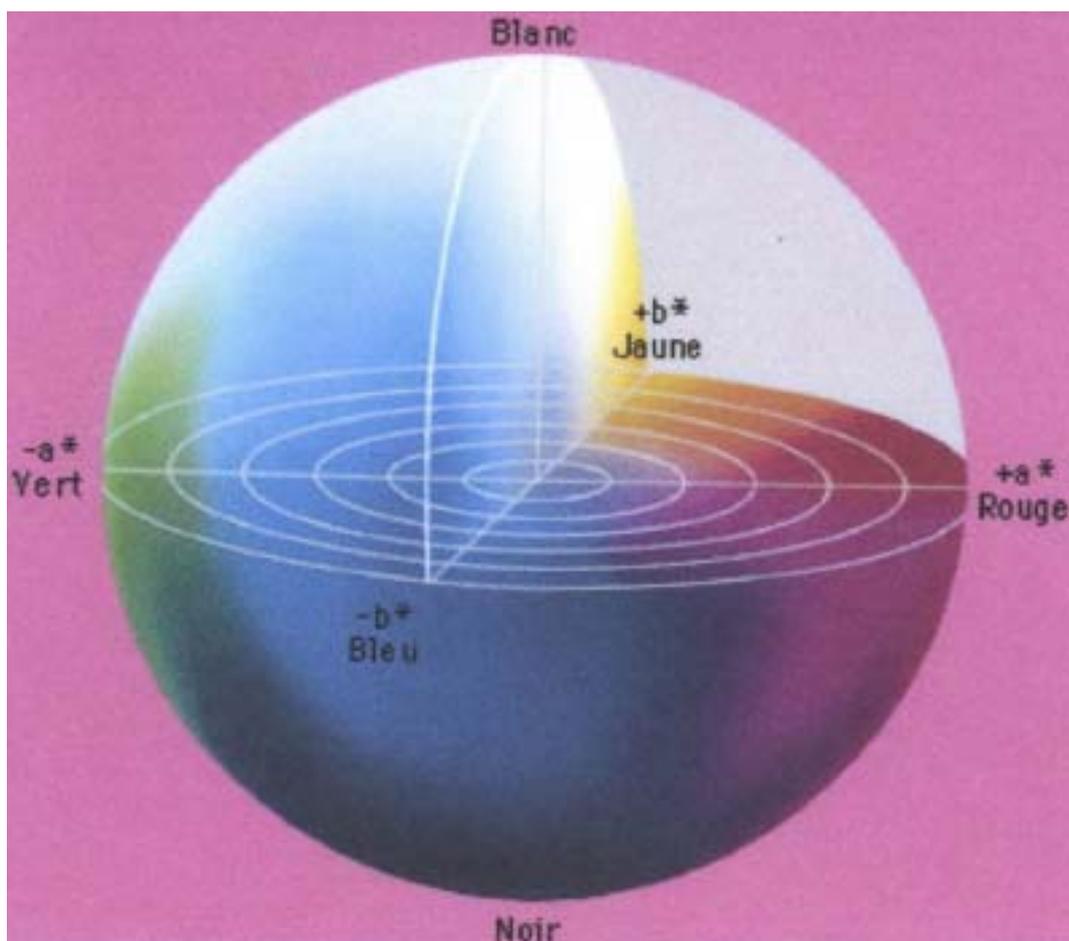
L'astérisque (\*) qui suit chaque lettre des paramètres de couleur indique que les calculs sont ultérieurs à 1931, date de fondation de la commission internationale de l'éclairage (CIE). Les résultats de la couleur d'un objet peuvent être également exprimés à l'aide de deux autres paramètres calculables à partir de  $a^*$  et  $b^*$ . Il s'agit de la saturation  $C^*$  qui est une estimation de la distance cartésienne à l'origine dans le plan ( $a^*$ ,  $b^*$ ) ;

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

et de l'angle de teinte  $h^*$  qui est une estimation de la distance angulaire par rapport à l'axe rouge.

$$h^* = \arctg\left(\frac{a^*}{b^*}\right)$$

Dans les résultats, seuls les paramètres  $a^*$ ,  $b^*$  et  $L^*$  sont utilisés puisque la saturation  $C^*$  et la teinte  $h^*$  peuvent facilement être déduites de ces trois paramètres. Des analyses de variance sont effectuées sur ces paramètres de couleur selon différentes positions radiales dans l'arbre et selon les zones écologiques et/ou stations afin de déterminer l'effet significatif ou non de ces paramètres sur la couleur du teck.



**Fig.5.1 : Représentation de l'espace CIE  $L^*a^*b^*$ , toutes les mesures des paramètres  $a^*$  et  $b^*$  réalisées jusqu'à présent sur le bois n'ont donné que des valeurs positives, c'est-à-dire situées dans la partie rouge-jaune du plan de chromaticité (Nishino et *al.* 1998).**

### *Evaluation indirecte de la durabilité naturelle*

Des analyses de corrélation linéaire sont réalisées d'une part entre les pertes de masse absolues des éprouvettes et les trois paramètres de couleur mesurés ; d'autre part entre les pertes de masses absolues et la densité des éprouvettes. Dans le cas de la couleur, seuls les résultats des champignons ayant provoqués les dégâts les plus importants sont présentés.

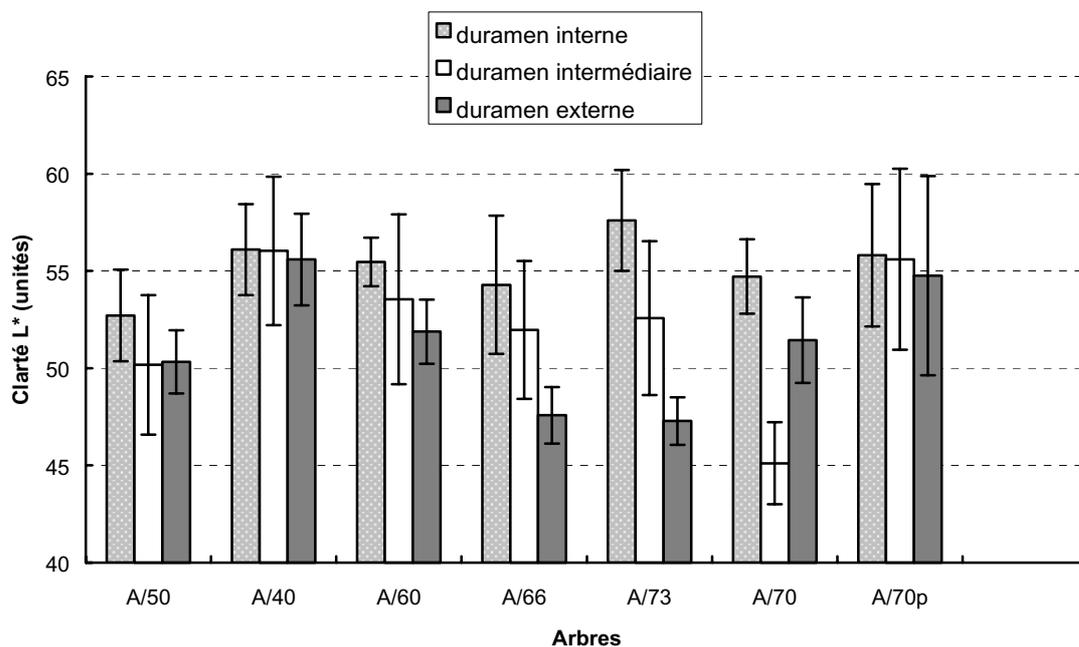
## 5.3 – Résultats

### 5.3.1 - Variabilité des paramètres de couleur selon l'âge du bois

L'influence de l'âge du bois a été étudiée uniquement à partir des valeurs de paramètres de couleur mesurées sur la face TR et uniquement chez les individus âgés de plus de 30 ans.

#### *Paramètre de clarté*

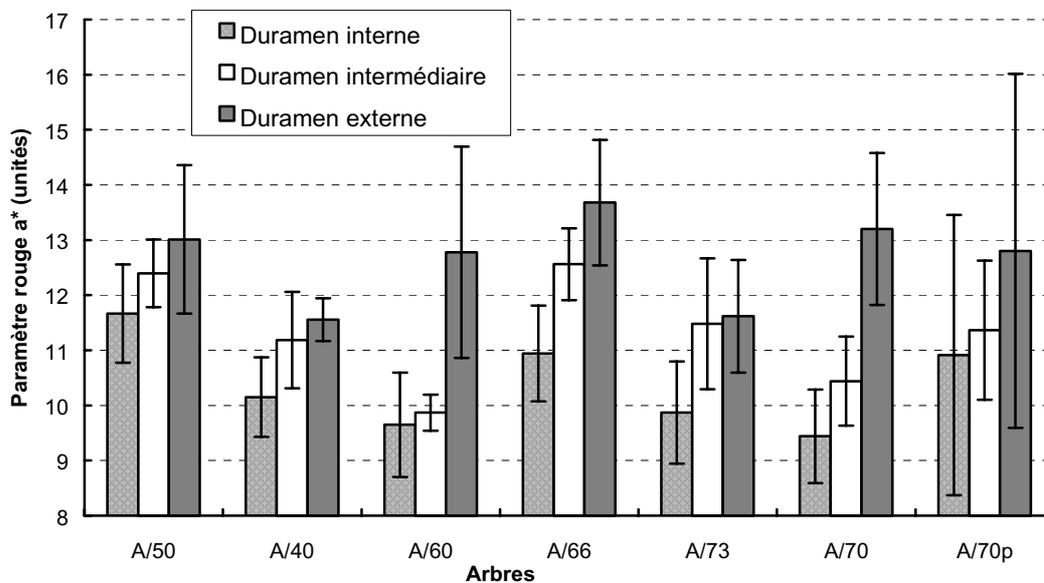
Pour la plupart des arbres, l'âge du bois a une influence sur la clarté. Cet effet se traduit par une diminution de la clarté du duramen interne vers le duramen externe (Fig.5.2). En d'autre terme, le bois proche de la moelle est significativement plus clair que le bois périphérique ( $P = 0,023$  ;  $F_{58,2} = 4,05$ ). Les valeurs moyennes de  $L^*$  sont respectivement de  $55,24 \pm 1,43$  ;  $52,14 \pm 3,43$  ;  $51,26 \pm 2,97$  pour le duramen interne, le duramen intermédiaire et le duramen externe. Pour chaque arbre, ces trois positions de duramen correspondent à celle décrites dans le tableau 3.3.



**Fig.5.2 : Variation de la clarté selon trois positions radiales**, les échantillons de duramen intermédiaire et externe sont significativement plus sombre que ceux du duramen interne.

### *Paramètre rouge-vert a\**

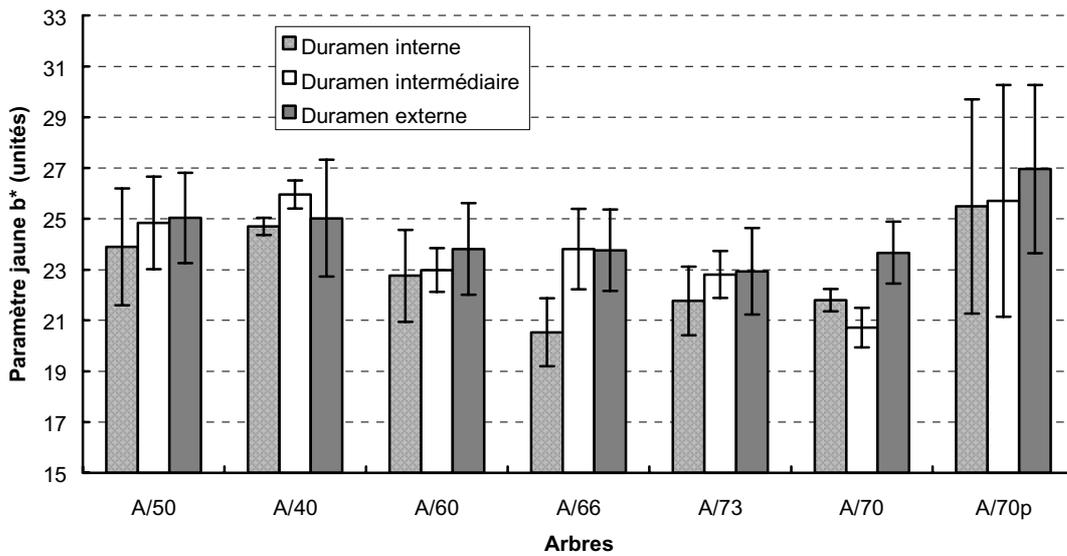
Le bois de teck est rouge puisque toutes les valeurs du paramètre  $a^*$  sont positives (Fig.5.1). Inversement à la clarté qui diminue de la moelle vers l'écorce, le paramètre rouge  $a^*$  augmente de façon significative du duramen interne vers le duramen externe ( $P = 0,01$  ;  $F_{57,2} = 5,00$ ) (Fig.5.3). Le bois proche de l'écorce est plus rouge que le bois proche de la moelle. Il semble exister une plus grande hétérogénéité de ce paramètre sur le duramen externe entre les éprouvettes d'un même arbre. Les valeurs moyennes de  $a^*$  sont respectivement de  $10,37 \pm 0,81$  ;  $11,33 \pm 0,97$  ;  $12,66 \pm 0,79$  pour le duramen interne, le duramen intermédiaire et le duramen externe



**Fig.5.3 : Variation du paramètre  $a^*$  selon différentes positions radiales, les éprouvettes de duramen externe et intermédiaire sont significativement plus rouges que celles du duramen interne.**

### *Paramètre jaune-bleu b\**

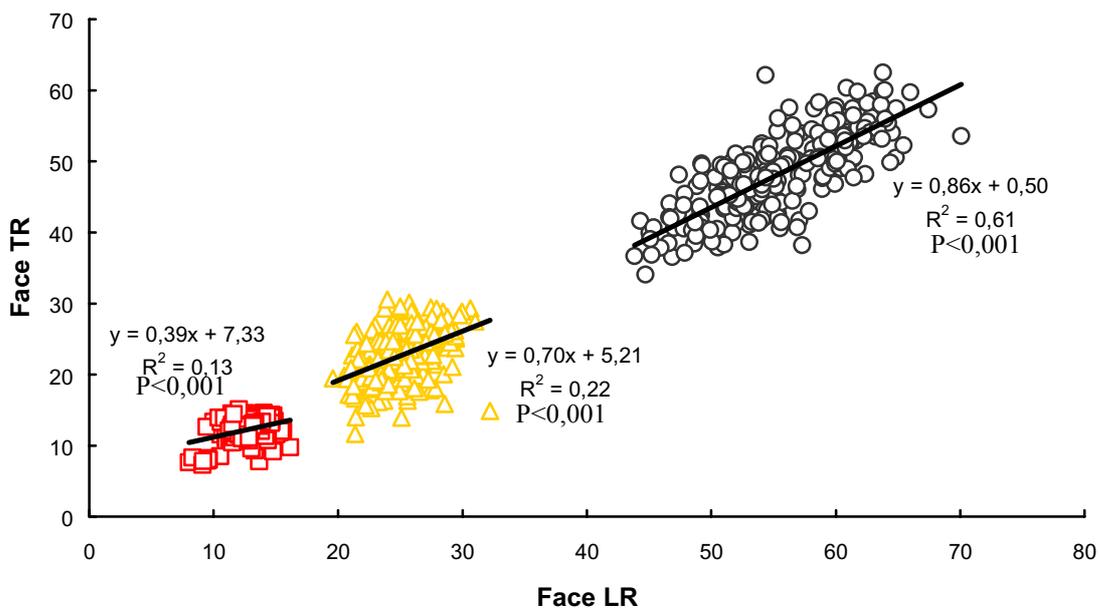
Pour la plupart des arbres, le bois de cœur proche de l'écorce a tendance à être plus jaune que le bois proche de la moelle, cependant ce gradient radial n'est pas significativement démontré comme pour les paramètre clarté et rouge (Fig.5.4).



**Fig.5.4 : Le paramètre b\* ne varie pas de manière significative selon les différentes positions radiales des éprouvettes.**

### 5.3.2 - Variabilité des paramètres de couleur selon les faces mesurées

La comparaison des mesures de couleur selon les deux faces a été faite en considérant les éprouvettes de duramen âgées en moyenne de cinq ans (nombre de cernes comptés depuis la moelle. Les valeurs des paramètres de couleur varient selon les faces TR et LR (Fig.5.5).



**Fig.5.5 : Relation entre paramètres couleur mesurées selon les faces TR et LR des éprouvettes.**

O paramètre clarté L\*    Δ paramètre jaune b\*    ● paramètre rouge a\*

La valeur moyenne de la clarté selon la face LR est supérieure à celle mesurée selon la face TR ( $L^*_{LR} - L^*_{TR} = 5,86 \pm 3,67$ ). Par rapport aux paramètres rouges et jaunes, cette différence est inférieure à 1 (Tableau 5.2). L'analyse de variance menée sur les trois paramètres de couleur montre que la clarté mesurée sur la face LR diffère significativement de celle mesurée sur la face TR ( $P < 0,01$  ;  $F_{179,1} = 115$ ) alors qu'aucune différence notable n'est révélée sur les deux autres paramètres (rouge et jaune).

Face	L*	a*	b*
LR	56,73 ± 4,91	12,40 ± 1,15	25,07 ± 1,73
TR	50,87 ± 5,22	12,93 ± 1,08	24,65 ± 2,44

**Tableau 5.2 : Valeurs moyennes des paramètres de couleur pour des éprouvettes de même âge mesurées selon les faces LR et TR.**

La clarté est donc le paramètre le plus affectée par le changement d'orientation alors que les valeurs des paramètres rouge et jaune restent sensiblement inchangées

### **5.3.3- Variabilité des paramètres de couleur selon la zone écologique et selon les parcelles**

L'analyse de variance des paramètres couleur n'a été réalisée que sur les individus âgés de plus de 30 ans et selon une seule position radiale, le duramen interne. La position des éprouvettes ayant servi à cette analyse est celle décrite dans le tableau 3.3. Les résultats montrent que la clarté des échantillons varie de façon significative d'une zone écologique à l'autre ( $P < 0,001$  ;  $F_{98,4} = 7,19$ ) et d'une parcelle à l'autre ( $P < 0,001$  ;  $F_{98,10} = 5,81$ ). Toutefois, cette différence de la clarté selon les zones et les parcelles s'explique en partie par l'âge des arbres. Les individus de la zone 5 sont statistiquement les plus clairs et aussi les plus jeunes de façon globale (Tableau 5.3). La comparaison des valeurs moyennes au sein d'une même zone écologique démontre bien ce phénomène. Les parcelles qui présentent en moyenne les valeurs de clarté les plus élevées sont en effet les moins âgées.

	zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5
Clarté (L*)	47,02 ± 4,34	47,39 ± 3,58	48,68 ± 3,83	50,37 ± 3,76	54,35 ± 5,36
Paramètre rouge a*	9,95 ± 2,15	11,075 ± 3,36	12,77 ± 0,86	11,66 ± 1,46	7,64 ± 1,86
Paramètre jaune b*	20,55 ± 2,15	21,78 ± 2,63	23,39 ± 2,25	21,70 ± 1,47	22,00 ± 3,51
Classe d'âge (année)	67-37	67-43	70-36	40-44	34

**Tableau 5.3 : Valeurs moyennes des paramètres de couleur mesurés sur les éprouvettes de duramen interne (n = 23 arbres âgés de plus de 30 ans).**

L'analyse de corrélation sur les éprouvettes de duramen interne montre que la clarté de l'éprouvette est liée de façon significative à l'âge de l'arbre par l'équation  $y = -0,178 x + 57,8$  ( $R^2 = 0,30$  ;  $P < 0,001$ ).

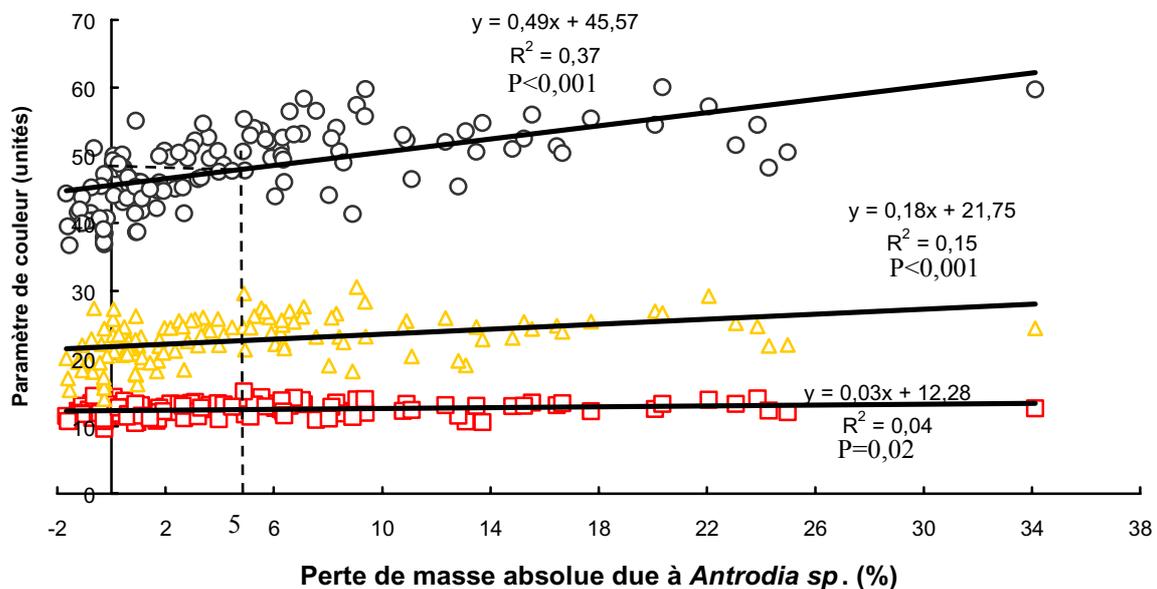
Par rapport au paramètre de couleur rouge, les individus ayant poussé dans la zone écologique 3 sont statistiquement différents des autres ( $P < 0,001$  ;  $F_{98,4} = 15,22$ ). Le bois de teck dans cette zone est beaucoup plus rouge. Les échantillons de la zone 5 sont les moins rouges. En définitive, le bois qui pousse dans la zone 5 est significativement plus clair et moins rouge que celui qui pousse dans les quatre autres zones écologiques. Il existe également un effet "parcelle" significatif ( $P < 0,001$  ;  $F_{98,10} = 30,93$ ). Contrairement à la clarté, l'"âge des arbres" n'influence que très peu le paramètre de couleur rouge ( $R^2 = 0,10$  ;  $P < 0,001$ ).

Tout comme dans les deux cas précédents, il existe un effet significatif de la "zone écologique" ( $P = 0,003$  ;  $F_{98,4} = 4,40$ ) et des "parcelles" ( $P < 0,001$  ;  $F_{98,10} = 3,85$ ) sur le paramètre de couleur jaune. Les échantillons de la zone 3 sont statistiquement les plus jaunes alors que ceux des zones 4 et 5 sont très semblables. L'"âge des arbres" ne présente pas d'effet significatif sur ce paramètre.

#### **5.3.4 – Liaisons entre les paramètres de couleur et la perte de masse due à *Antrodia sp.***

Il existe une relation positive et significative entre perte de masse due à *Antrodia sp.* et les trois paramètres de couleur (Fig.5.6). Le paramètre rouge a\* explique très peu (4% seulement) la variabilité de la perte de masse. Le paramètre clarté L\* semble être le meilleur indicateur de la durabilité naturelle du teck, il explique environ 37% de la variabilité alors que le paramètre jaune b\* ne l'explique qu'à 15%.

Estimer la perte de masse à partir de la clarté par exemple signifie qu'il faudrait pouvoir fixer pour ce paramètre des valeurs "seuil" correspondant à des classes de durabilité bien définies. Les équations de corrélation laissent déduire qu'on pourrait garantir une durabilité de classe 1 en fixant comme seuil de clarté  $L^* < 48$  et comme référence du paramètre jaune  $b^* > 23$ . L'évaluation de la durabilité naturelle par la méthode classique c'est-à-dire la EN350-1 montre que sur l'échantillon de bois de cœur étudié, 75% des éprouvettes sont très durables alors qu'en faisant une évaluation à partir des paramètres de couleur, seulement 48% le sont. Cette méthode élimine donc à tort presque 30% des éprouvettes classés très durables.



**Fig.5.6 : Relation entre paramètre couleur et perte de masse due à *Antrodia sp.***  
 O paramètre clarté  $L^*$   $\Delta$  paramètre jaune  $b^*$   $\square$  paramètre rouge  $a^*$

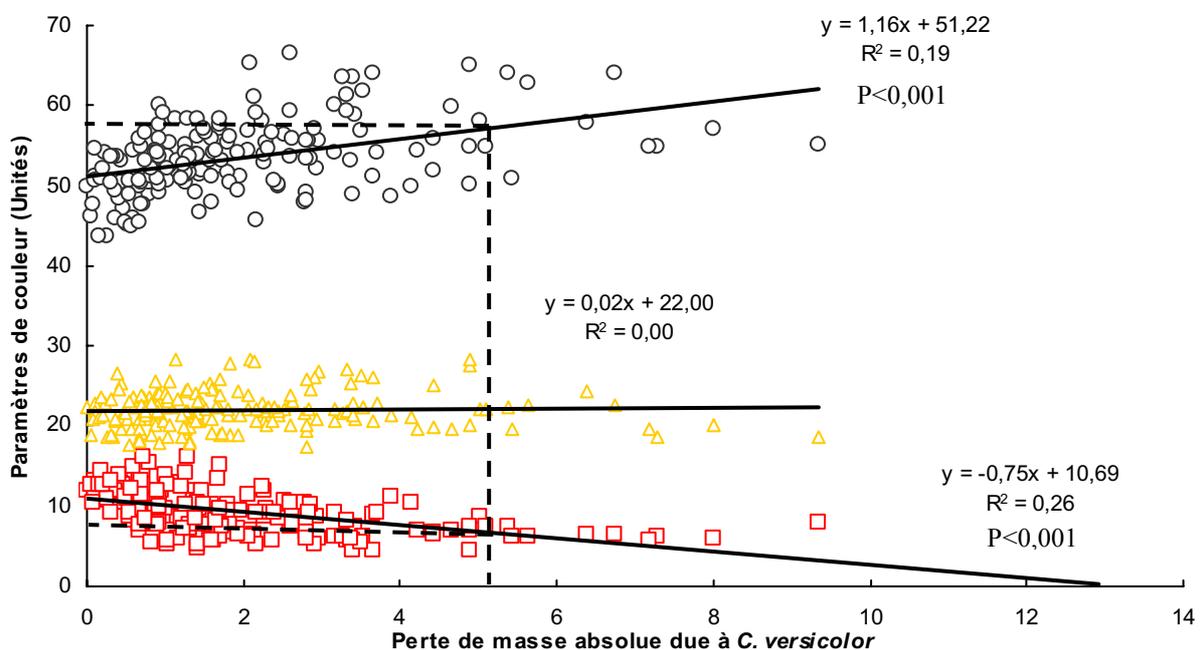
En définitive, même s'il existe des relations significatives entre perte de masse et les paramètres de couleur, il paraît difficile d'estimer de manière rigoureuse la résistance du teck vis-à-vis d'*Antrodia*. La variabilité de couleur à l'intérieur d'une même classe de durabilité est trop importante.

### 5.3.5 – Liaisons entre les paramètres de couleur et la perte de masse due à *C.versicolor*.

Vis-à-vis de *Coriolus versicolor*, seuls les paramètres de couleur clarté  $L^*$  et rouge  $a^*$  sont significativement liés à la perte de masse (Fig.5.7). La clarté présente une corrélation positive, donc augmente avec la perte de masse absolue tandis que le paramètre de couleur rouge  $a^*$ , présente une corrélation négative. Pour le paramètre jaune, aucune relation significative n'a

pu être mise en évidence. Tous les échantillons présentant à la fois une valeur de clarté  $L^* < 50$  et de paramètre rouge  $a^* > 7$  sont situés dans la classe de durabilité "très durable" en faisant une estimation par ces deux paramètres de couleur. La méthode d'évaluation directe de la durabilité naturelle par la EN350-1 montre que seulement 7% des éprouvettes ne sont pas très durables vis-à-vis de *C.versicolor*, mais en faisant une évaluation indirecte par les paramètres couleur, ce sont 30% des éprouvettes qui ne sont pas durables. Cette méthode indirecte exclue plus de 20% des échantillons pourtant très durables et donc n'est pas très fiable.

Une tendance se dégage tout de même : le bois de teck est d'autant plus durable vis-à-vis de *C.versicolor* qu'il est sombre et rouge.



**Fig.5.7 : Relation entre paramètre couleur et perte de masse due à *C.versicolor*.**

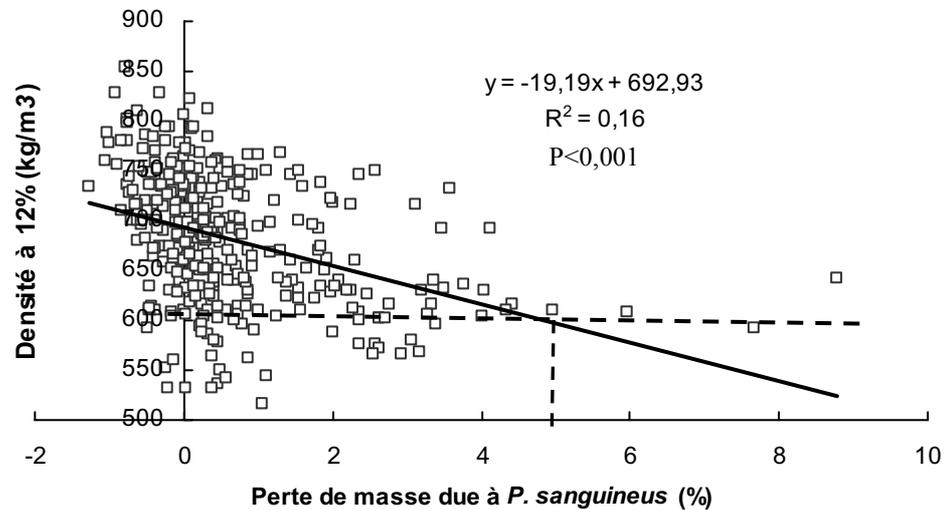
O paramètre clarté  $L^*$     $\Delta$  paramètre jaune  $b^*$     $\bullet$  paramètre rouge  $a^*$

### 5.3.6 – Liaisons entre la densité du bois à 12% d'humidité et la perte de masse

#### *Cas des champignons de régions tropicales*

Vis-à-vis des pourritures des régions tropicales, la densité à 12% des échantillons influence la résistance du bois. La perte de masse vis-à-vis des champignons tropicaux diminue de manière significative lorsque la densité du bois augmente. Dans le cas de *P. sanguineus*, cette relation se traduit par la droite  $y$  (densité à 12% d'humidité) =  $693 - 19,19x$  (perte de masse absolue due à *P. sanguineus*). Une densité de bois à 12% strictement supérieure à  $600 \text{ kg/m}^3$

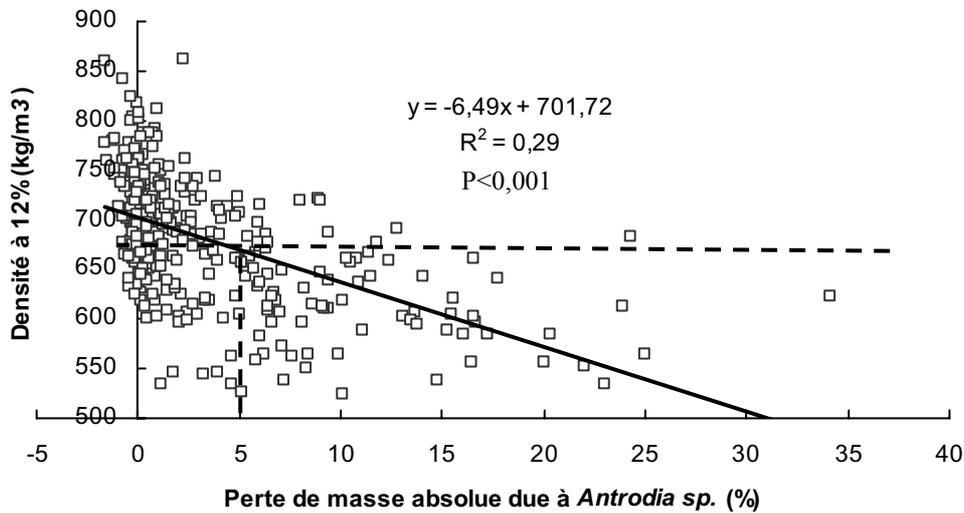
semble être prédictive d'une durabilité de classe 1 (perte de masse < 5%) des échantillons vis-à-vis de *P. sanguineus* (Fig.5.8).



**Fig.5.8 : Relation entre densité à 12% et perte de masse due à *P. sanguineus*.**

Dans le cas d'*Antrodia sp.*, la densité est significativement liée à la perte de masse absolue par la droite  $y$  (densité à 12% d'humidité) =  $701,72 - 6,94x$  (perte de masse absolue due à *Antrodia sp.*). Il faut une densité de bois largement supérieure à celle notée dans le cas de *P. sanguineus* pour garantir une bonne durabilité vis-à-vis d'*Antrodia*. Ainsi, une densité de bois strictement supérieure à  $670 \text{ kg/m}^3$  semble être indicatrice d'une durabilité de classe 1 (Fig.5.9).

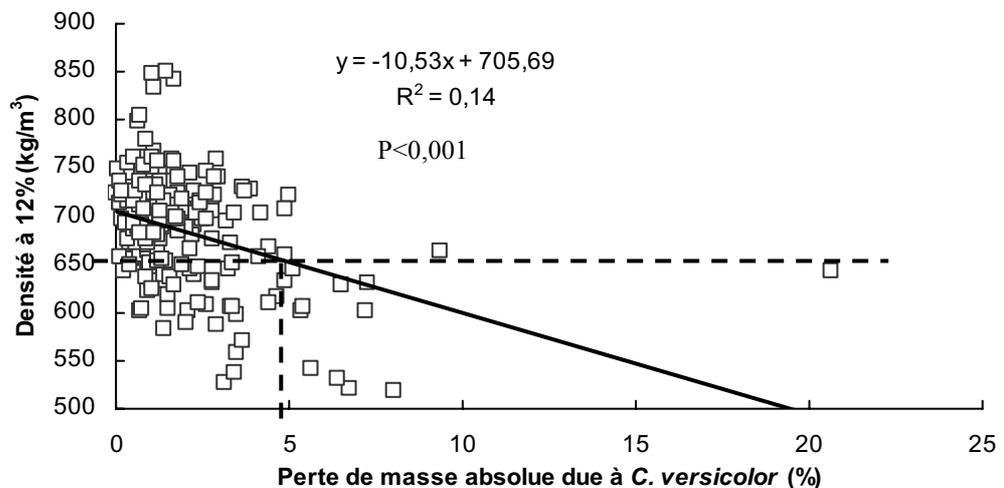
Il faut noter que dans le cas des deux champignons, la densité des éprouvettes n'explique qu'environ 20 à 30% de la variabilité de la perte de masse. La classification de la durabilité naturelle par la méthode directe montre que plus 99% des éprouvettes sont très durables à *P. sanguineus* alors qu'en utilisant la densité à 12% comme indicateur, on obtient jusqu'à 32% d'échantillons pas très durables. De même, l'évaluation directe de la durabilité naturelle face à *Antrodia sp.* montre que 75% sont très durables mais l'estimation indirecte par l'utilisation de la densité à 12% donne seulement 58%. Environ 20% des échantillons classés très durables sont exclus de cette classe durabilité par cette méthode. Par conséquent, la prédiction de la résistance des éprouvettes par l'utilisation de la densité du bois à 12% d'humidité n'est pas une méthode fiable.



**Fig.5.9 : Relation entre densité à 12% et perte de masse due à *Antrodia sp.***

#### *Cas des champignons de régions tempérées*

Les relations entre la perte de masse absolue des éprouvettes vis-à-vis de *C. versicolor* et leur densité à 12% sont significatives ( $P < 0,001$  ; Fig.5.10). Une densité à 12% supérieure à 650 kg/m<sup>3</sup> serait garante d'une bonne durabilité (Classe 1). Cependant 93% des échantillons sont très durables à *C. versicolor* par la EN350-1 alors que l'estimation indirecte par la densité à 12% permet de classer seulement 70% des éprouvettes en classe très durables.



**Fig.5.10 : Relation entre densité à 12% et perte de masse due à *C. versicolor*.**

Les mêmes types de relations peuvent être établies vis-à-vis de *G. trabeum*. Ici la densité explique à peine 2% de la variabilité de la perte de masse vis-à-vis de *G. trabeum* ( $R^2 = 0,02$  ;  $P = 0,028$ ). Aussi, il ne semble pas possible de prédire la résistance des éprouvettes face à ce champignon des régions tempérées à partir de la densité à 12%.

## **Conclusion**

Les études qui ont été menées sur la qualité des bois ont montré que la couleur pouvait être une aide dans la caractérisation des espèces européennes et tropicales (Janin 1994). Les résultats obtenues sur le Chêne européen sont particulièrement intéressants (Janin 1987 ; Klumpers 1994). D'autres études laissent penser que la couleur du bois pouvait s'améliorer avec l'âge (Schultz 1959).

Dans le cas du Teck en plantation au Togo, cette étude a permis de montrer qu'une "maturation" de la couleur pourrait se produire avec l'âge. Chez les individus âgés, le bois périphérique est plutôt sombre, plus rouge et plus jaune contrairement au bois plus jeune situé à proximité de la moelle, qui est claire, moins rouge et moins jaune. Ce phénomène d'inversion de couleur entre le bois interne (côté moelle) et le bois externe (côté aubier) est très remarquable sur les paramètres de couleur clarté ( $L^*$ ) et rouge ( $a^*$ ). La clarté diminue en moyenne de 4 unités du duramen interne vers le duramen externe et le paramètre rouge augmente de 2 unités de la moelle vers le bois périphérique. Au niveau inter arbre, les individus les plus âgés ont tendance à être les plus sombres. Cette diminution de la clarté avec l'âge peut s'expliquer par la teneur des extraits du bois et est liée au phénomène de duraminisation. Chez le Teck, la teneur des substances extractibles augmente avec la distance par rapport à la moelle (Hillis 1987). Le vieillissement du bois entraîne apparemment la polymérisation des substances produites lors de la transformation de l'aubier. C'est cette polymérisation qui affecte la couleur du bois chez les individus âgés (Klumpers 1994).

La variabilité des paramètres de couleur de teck d'une zone écologique à l'autre au Togo est un atout économique très important sur le marché togolais, surtout pour les artisans sculpteurs qui recherchent cette variabilité naturelle de la couleur. Celle-ci peut être reliée à plusieurs facteurs notamment les propriétés du sol. Klumpers (1994) fait référence aux travaux de Nelson et al. (1970) sur les relations significatives entre le pH du sol et la clarté du noyer noir. Ces mêmes auteurs ont observé une relation significative entre les sels minéraux du sol et la

clarté. L'hydromorphie du sol est également un paramètre qui semble influencer la couleur du bois. Plusieurs études ont révélé l'existence d'une corrélation entre la couleur et l'hydromorphie (Klumpers 1994). Les mécanismes ne sont pas bien connus mais il semble que le bois est plus sombre lorsque la teneur en eau du sol est élevée. Les résultats ont montré que les échantillons de la zone écologique 3 sont significativement les plus jaunes et les plus rouges. Les sols de la zone 3 sont généralement hydromorphes (Tableau 1.1) et pourraient justifier cette coloration plus rouge du Teck.

Un autre facteur qui pourrait expliquer cette variabilité de la couleur d'une zone à l'autre est la densité du bois. Les relations entre les paramètres de couleur et la densité des éprouvettes à 12% montrent l'existence d'une corrélation négative et significative pour les trois paramètres de couleur. Les meilleures corrélations sont celles d'une part entre la clarté et la densité ( $R^2 = 0,50$  ;  $P < 0,001$ ), d'autre part entre le paramètre jaune et la densité ( $R^2 = 0,37$  ;  $P < 0,001$ ). Le paramètre rouge présente une corrélation plus faible. De ce fait, les individus qui présentent les densités moyennes les plus faibles seront significativement les plus clairs et les plus jaunes.

En ce qui concerne les méthodes de prédiction, la part de variabilité qu'expliquent les paramètres de couleur n'est pas assez importante pour permettre une évaluation directe de la durabilité naturelle vis-à-vis d'*Antrodia sp.* et de *Coriolus versicolor*. L'exemple typique est celui des échantillons de la zone 3. *A priori*, les valeurs moyennes élevées des paramètres de couleur jaune mesurés sur les éprouvettes de duramen interne des individus adultes (Tableau 5.3), laissent penser que les échantillons de la zone 3 seraient plus résistants à *Antrodia sp.* que les échantillons des zones 4 et 5. Ce qui n'est pas le cas puisque les analyses de variance ont montré qu'à l'exception d'un seul arbre classé "très durable", tous les échantillons de la zone 3 ont été attaqués aux niveaux 2 et 3 (durable à moyennement durable) par ce champignon (Fig. 4.17). Il apparaît donc clairement que la couleur des éprouvettes, ne permet pas à elle seule d'expliquer leur résistance vis-à-vis des agents de détérioration. Il faut rappeler que les mesures des paramètres couleur qui ont été corrélées avec la perte de masse sont celles de la face RT.

Les résultats obtenus chez le Châtaignier ont montré que la couleur représente un bon indicateur de la durabilité naturelle du bois vis-à-vis de *C. versicolor* (Dumoncaud 2000). Chez cette espèce, la couleur exprime 50 à 70% de la variabilité de la perte de masse des

échantillons. Les mesures ont été faites sur la face RL des échantillons, stabilisés à une humidité voisine de 12% à l'obscurité. Dans le cas présent, les échantillons de teck ont été stabilisés à la lumière avant les mesures de couleur. Ce qui aurait plus ou moins modifié les paramètres de couleur des échantillons.

De la même manière que la couleur, la densité du bois influence de façon significative la résistance des échantillons face aux champignons, mais ne permet pas de prédire exactement leur durabilité. Il existe également une variabilité trop grande de la densité à l'intérieur d'une même classe de durabilité, surtout dans le cas des deux champignons tropicaux.

En définitive, la couleur du bois de teck est très variable à l'intérieur de l'arbre et aussi d'une zone écologique à l'autre comme toutes les autres propriétés étudiées lors de cette étude. Il paraît difficile de relier cette variabilité aux facteurs stationnels sans avoir réalisé au préalable des tests de provenance sur les Tecks du Togo. Même si les arbres étudiés étaient tous d'une même provenance, la variabilité des paramètres couleur d'une zone à l'autre ne pourrait pas être attribuée avec exactitude aux propriétés du sol, étant donné toutes les autres sources possibles de variation de cette propriété du bois. Il serait tout de même intéressant de continuer cette analyse en faisant une typologie des sols et de la couleur du bois de teck en plantation au Togo. Les variabilités de couleur et de densité à l'intérieur des classes de durabilité sont trop importantes dans le cas du teck en plantation au Togo pour pouvoir servir à prédire la résistance des échantillons. Dans le cas d'*Antrodia*, on arrive à expliquer environ 57% de la variabilité de la perte de masse absolue en utilisant une régression multiple ( $P < 0,001$ ) : perte de masse absolue % (*Antrodia sp.*) =  $4,81 - 453 \text{ densité à } 12\% \text{ (kg/m}^3) - 0,04 \text{ âge cambial (année)} + 1,18 \text{ clarté (unité)} + 1,63 \text{ paramètre rouge (unité)} - 1,99 \text{ paramètre jaune (unité)}$ . Les mêmes résultats peuvent être obtenus dans le cas de *C. versicolor*, cependant l'utilisation de ces cinq paramètres (densité, âge cambial et les trois paramètres de couleur) n'explique qu'environ 40% de la variabilité de la perte de masse ( $P < 0,001$ ) : perte de masse absolue % (*C.versicolor*) =  $6,09 - 46,30 \text{ densité à } 12\% \text{ (kg/m}^3) - 0,06 \text{ âge cambial (année)} + 0,05 \text{ clarté (unité)} + 0,21 \text{ paramètre rouge (unité)} - 0,05 \text{ paramètre jaune (unité)}$ .



---

***CONCLUSION GENERALE***

---



Ce travail sur l'étude des propriétés du Teck au Togo constitue surtout une référence sur la qualité des Tecks de plantation. La formation et la propagation du duramen, bois de valeur, montre qu'en terme de sylviculture, la performance du teck dépend essentiellement de la vitesse de croissance des plantations dans les jeunes âges. Au-delà de 35 ans, la production du duramen est fortement ralentie même si la croissance en diamètre des troncs est favorisée. Les interventions de nature à améliorer la productivité dans les plantations de Teck doivent absolument intervenir dans le jeune âge. Les caractéristiques physiques et mécaniques présentent une grande variabilité liée surtout à la présence du bois juvénile. Il a également été montré que ces deux propriétés diffèrent de façon significative entre le bois juvénile et le bois adulte. Une augmentation moyenne de l'ordre de 10% pour la densité et de 20% pour  $E_L$  a été observée entre ces deux types de bois. Par rapport à la densité à 12%, le Teck togolais est très semblable à celui du Bénin alors qu'il est différent du Teck de la Côte d'Ivoire et du Burkina Faso. Or les semences des Tecks de la Côte d'Ivoire proviennent des plantations togolaises (Durand 1985). Cette ressemblance entre les teckeraies togolaises et béninoises peut être justifiée par l'appartenance des deux pays à la même zone phytogéographique dans le couloir du Dahomey. L'environnement est un facteur affectant de façon significative les propriétés technologiques du Teck.

Par rapport à la résistance face aux champignons, le Teck en plantation au Togo est très durable vis-à-vis de *Pycnoporus sp.*, pourriture des zones tropicales et vis-à-vis de *Gloeophyllum trabeum*, pourriture des zones tempérées. *Coriolus versicolor* et *Antrodia sp.*, sont les champignons les plus virulents pour le teck. Cependant le duramen externe et intermédiaire sont très durables vis-à-vis de ces deux champignons. 75% des 357 éprouvettes de bois de cœur testées face à *Antrodia sp.*, sont très durables et 15% sont durables ; 93% des 193 éprouvettes testées face à *C. versicolor* sont très durables et 6% sont durables. Le duramen interne quant à lui est classé "peu durable" par rapport à ces deux champignons. Il est de ce fait recommandé d'éviter le bois proche de la moelle lorsqu'on utilise le teck en extérieur et/ou en construction dans des conditions correspondant aux classes de risque 3, 4 et 5. En ce qui concerne la durabilité face aux termites, les Tecks de plantation au Togo présente une grande variabilité tout comme ceux d'autres pays de la sous région (Côte d'Ivoire, Bénin et Burkina).

L'évolution de la densité à 12%, du module d'élasticité longitudinal et de durabilité vis-à-vis de la pourriture avec l'âge cambial tend à montrer que l'âge de rotation dans les plantations

pourrait être rabaissé sans risque à 30-40 ans au lieu de 70 ans dans les plantations "classiques". En se basant également sur ces trois propriétés, les valeurs obtenues montrent que les Tecks de plantation sont tout à fait comparables à ceux issus des forêts naturelles, même si la qualité du bois des Tecks de plantation est très variable d'un individu à l'autre. Cette variabilité inter-arbre non négligeable, pourrait d'ailleurs justifier d'un classement mécanique et de sélection génétique sur les individus présentant les meilleures aptitudes.

La couleur, qui représente l'une des qualités très recherchée chez le Teck, montre aussi des variations radiales à l'intérieur de l'arbre. Cette variabilité se manifeste surtout par une diminution de la clarté  $L^*$  et une augmentation du paramètre de couleur rouge  $a^*$  du cœur vers le duramen externe. Au niveau inter-arbre, les individus les plus âgés ont tendance à être plus sombre que les individus jeunes. Ce résultat laisse penser que le bois de teck est d'autant plus sombre qu'il est âgé.

Par rapport à la couleur et à la durabilité naturelle vis-à-vis de la pourriture, il a été mis en évidence des différences significatives entre les arbres et/ou les parcelles de la zone 3 et ceux des autres zones écologiques étudiées lors de cette étude. Il s'agit de la zone qui se caractérise par des conditions pédoclimatiques (engorgement des sols en saisons pluvieuses) favorables à des vitesses de croissance plus élevées. La faible durabilité à la pourriture mis en évidence chez ces tecks confirme une observation déjà faite dans les teckeraies d'Indonésie, à savoir que les tecks soumis à un régime plus humide auraient tendance à produire du bois moins durable (Simatupang et Yamamoto 2000). Ces conditions pourraient aussi être en relation avec la densité du bois plus faible observée chez les tecks de la zone 3. Ce résultat est fondamental s'il est confirmé par d'autres expérimentations. L'hydromorphie des sols de cette zone semble également affecter la couleur du bois. L'effet de la qualité du sol sur la couleur du bois de teck fait l'objet de controverses. Certaines études montrent que le teck cultivé dans des zones humides produit du bois sombre alors que d'autres montrent le contraire (Simatupang et Yamamoto 2000, Kaosa-ard 1995). Dans le cas du teck au Togo, il semble que le bois est plus sombre lorsque la teneur en eau du sol est élevée.

Afin de s'affranchir de l'évaluation normalisée de la durabilité naturelle aux champignons, un essai biologique long et fastidieux à mettre en place, certains indicateurs ou marqueurs éventuels de cette propriété ont été recherché. La couleur et la densité à 12% semblent être des indicateurs étant donné les liaisons significatives entre ces deux propriétés et la durabilité.

Mais au regard de la part de variabilité qu'expliquent ces propriétés, elles ne peuvent pas servir à prédire de façon directe la durabilité naturelle vis-à-vis d'*Antrodia sp.* et de *Coriolus versicolor* dans le cas du Teck en plantation au Togo. Dans le cas de la colorimétrie, il faudrait arriver à mettre au point un protocole très précis, permettant d'éliminer la forte variabilité due au procédé de préparation de la surface des éprouvettes mesurées.

Pour approfondir les connaissances acquises au cours de ce travail, les tests génétiques précisant la provenance des tecks du Togo sont indispensables. Elles permettront d'expliquer les différences significatives mises en évidence entre certaines zones et/ou parcelles notamment en ce qui concerne le pourcentage de bois de cœur et de la durabilité naturelle vis-à-vis d'*Antrodia sp.* La relation vitesse de croissance et production du bois de cœur pourrait être analysée en détail en prenant en compte l'effet de la dominance dans les plantations. Il paraît également nécessaire de confirmer la résistance plus faible de Tecks cultivés dans certaines régions du Togo, en faisant d'autres essais comparatifs et en utilisant à la fois les deux champignons les plus virulents c'est-à-dire *Antrodia sp.* et *C. versicolor*. L'échantillonnage doit concerner des parcelles dans des conditions de topographie et de pédologie différentes (substrat hydromorphe, drainé, périodiquement submergé, etc). Des analyses chimiques sur les extraits du Teck en plantation au Togo permettraient de mieux comprendre la résistance du bois face aux différents agents de détérioration et de vérifier ou non l'hypothèse de la présence de composés volatils dans le duramen. Il est également souhaitable de compléter cette étude sur les propriétés du Teck de plantation au Togo par des mesures de stabilité dimensionnelle. En ce qui concerne les méthodes d'évaluation indirecte de la durabilité naturelle aux champignons, il pourrait être intéressant d'utiliser la spectrométrie infrarouge, qui a déjà donné de bons résultats chez l'Eucalyptus. Cette technique permet de réduire le temps d'analyse et le coût de revient par rapport aux méthodes traditionnelles.



---

***BIBLIOGRAPHIE***

---



**Akpagana, K., 1989.** Recherches sur les forêts denses humides du Togo. Thèse. Univ. Bordeaux 3, France 181 pp.

**Aubréville, A., 1937.** Les forêts du Dahomey et du Togo. Bulletin du Comité d'études historiques, 29 : 1-113.

**Baillères, H., 1994.** Précontraintes de croissance et propriétés mécano-physiques de clones d'Eucalyptus (Pointe-Noire, Congo) : hétérogénéités, corrélations et interprétations histologiques. Thèse de l'Univ. Bordeaux 1. 159 pp.

**Baillères, H., Calchera, G., Demay, L., Vernay, M., 1998.** Mechanical grading of French Guianan structural timber using three non-destructive techniques. Bois et Forêt des Tropiques. 257, 54-64.

**Baillères, H., Durand, P.Y., 2000.** Non destructive techniques for wood quality assessment of plantation-grown teak. Bois et Forêt des tropiques. 283, 17 -27.

**Baillères, H., Verhaegen, D., Gion, J.M., Grima-Pettenati, J., Plomion, C., Rozenberg, P., Chantre, G., Ham-Pichavant, F., Pardon, P., Doignie, J.C., 2000.** Introducing biotechnology to improve the selection efficiency of wood quality traits in *Eucalyptus*: description of a French research project. In Proceedings of the first IUFRO Workshop: the future of Eucalypts for Wood Products, 19-24 march 2000. Launceston, Tasmania. IUFRO. pp 271-282.

**Bamber, R.K., 1976.** Heartwood, its function and formation. Wood Science and Technology. 10, 1-8.

**Bamber, R.K., Fuzakawa, K., 1985.** Sapwood and heartwood : a review. For Prod Abstract. 8 (9), 265-312.

**Batawuila, K., 2002.** Diversité, écologie et propriétés antifongiques des Combretaceae du Togo. Thèse doctorante, Université du Bénin/Université de Reims Champagne-Ardenne, 130p

**Behaghel, I., 1999.** Etat des plantations de teck (*Tectona Grandis* L. f.) dans le monde. Bois et Forêt des Tropiques. 269, 5-18.

**Bergström, B., 2000.** Aspects on heartwood formation in scots pine. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Genetics and Plant Physiology. Umeå.

**Berthier, S., Kokutse, A.D., Stokes, A., Fourcaud, T., 2001.** Irregular heartwood formation in Maritime Pine (*Pinus pinaster* Ait) : Consequences for biomechanical and hydraulic tree functioning. Annals of Botany. 87, 19-25.

**Bhat, K.M., Bhat K.V., Dhamodaran, T.K., 1985.** Wood and bark properties of branches of selected trees species growing in Kerala. KFRI Res.Rep. 29. Peechi, 34 pp.

**Bhat, K.M., 1995.** A note on heartwood proportion and wood density of 8-year-old teak. Indian Forester. 514 - 517.

- Bhat, K.M., Okuyama, T., 1997.** Action plan for hardwood plantation management vis-à-vis sustainability of tropical forest resources; a concept note, unpubl. doc.
- Bhat, K.M., 2000.** Timber quality of teak from managed tropical plantations with special reference to Indian plantations. *Bois et Forêt des Tropiques*. 283, 6 -16.
- Bhat, K.M., Priya, P.B., Rugmini, 2001.** Characterisation of juvenile wood in teak. *Wood Science and Technology*. 34, 517-532.
- Boardman, B.E., Senft, J.E., McCabe, G.P., Ladisch, C.M., 1992.** Colorimetric analysis in grading black walnut veneer. *Wood and Fiber Science*. 24 (1), 99-107.
- Bosshard, H.H, 1965.** Aspects of the aging process in cambium and xylem. *Holzforschung*. 19 (3), 65-69.
- Bordonnée, P.A., 1989.** Module dynamique et frottement intérieur dans le bois : mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles. Thèse. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Brancheriau, L., Baillères, H., 2001.** Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review. *Wood Science and Technology* (sous press).
- Bryce, E.M., 1966.** Mechanical properties of Tanzanian-grown teak (*Tectona Grandis* L. f.). Tech. Note Util. Sect. For Div., Moshi. 34 (5).
- Chanson, B., 1992.** Dynamique de l'élaboration du bois : nature et disposition dans la structure arborée. 5<sup>ème</sup> Séminaire Interne Architecture, Structure, Mécanique de l'Arbre, Paris. 40-45.
- Charrier, B., 1990.** Les discolorations du Chêne apparaissant au cours du séchage artificiel. Etude fondamentale et mise en place de techniques de protection. Rapport d'activité AFME. 10, 50pp
- Cilas, C., Montagnon, C., Bertrand, B., Godin, C., 2000.** Wood elasticity of several *Coffea canephora* Pierre clones. A new trait to include in selection schemes. *Agronomie*. 20, 439-444.
- Climent, J., Gil, L., Pardos, A., 1998.** Xylem anatomical traits related to resinous heartwood formation in *Pinus canariensis*. *Trees*. 12, 139-145.
- CTFT (Centre Technique Forestier Tropical), 1990.** Fiche technique teck. *Bois et Forêts des Tropiques*. 224, 39-47.
- Datta, S.K., Kumar, A., 1987.** Histochemical studies of the transition from sapwood to heartwood in *Tectona grandis*. *IAWA Bulletin* 8 (4), 363-368.
- De Groot, R.C., Woodward, B., Hennon, P.E., 2000.** Natural decay resistance of heartwood from dead, standing yellow-cedar trees : Laboratory evaluations. *Forest Products Journal*. 50 (1), 53-59.

- Delvaux, J., 1973.** Production et traitement des teckeraies togolaises. Rapport de l'organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. 67 pp.
- Déon, G.M., Chadenson, Hauteville, M., 1980.** Influence des extraits naturels du bois sur sa résistance à la pourriture. *Bois et Forêt des Tropiques*. 191, 75-90.
- Dumoncaud., 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. Univ Montpellier 2, France. 214 pp.
- DURAND, P.Y.; 1984.** A Technological Survey of plantation-grown Teak in Ivory Coast. IUFRO Meeting - Project Group P5.01. Manaus, Brésil.
- DURAND, P.Y.; 1985.** Quelques résultats d'essais technologiques concernant les principales essences de reboisement de Côte d'Ivoire" CTFT, Côte d'Ivoire.
- Eaton, R., Halle, M.D.C., 1993.** Wood decay, pests and protection. 546 pp.
- Ern, H.,1979.** Die Vegetation Togos. Gliederrung, Gefährdung, Erhaltung. *Willdenowia*. 9, 295-312.
- Faure, P., Pennanaech, S.B., 1981.** Les sols du Togo. *Atlas du Togo*. Editions Jeune Afrique. 18-20.
- Ferguston, J.H.A., 1934.** De Dikte van Kern en spinthout van den djati (*Tectona grandis* L.f) (Thickness of heartwood and sapwood of teak). *Mededeelingen van het Boschbouwproefstation*. 43, 1-19.
- Fougerousse, M., 1960.** Durabilité naturelle du bois. *Bois et Forêt des Tropiques*. 73, 43-56.
- Frey-Wyssling, A., Bosshard, H.H., 1959.** Cytology of the ray cells in sapwood and heartwood. *Holzforschung* 13(5), 129-137.
- Gachet, C., 2000.** Eudes préliminaires sur la formation du duramen chez le pin maritime. Mémoire de DEA en Sciences du Bois, Univ. Bordeaux 1, France. 30 pp.
- Gartner, L.B., Morell, J.J., Freitag, C.M., Spicer, R., 1993.** Heartwood decay resistance by vertical position in Douglas-fir trees from a young stand. *Can. J. For. Res.* 29, 1993-1996.
- Gérard, J., 1998.** Contraintes de croissance, variations internes de densité et du module d'élasticité longitudinal, et déformations de sciage chez les eucalyptus de plantation. Thèse Univ.Bordeaux 1. 151 pp.
- Giordano, G., 1971.** *Tecnologia del legno*. 1086 pp.
- Guelly, K.A., 1994.** *Les savanes de la zone forestière subhumide du Togo*. Thèse de Doctorat. Univ. Pierre et Marie CURIE, Paris VI, 163 p.

- Guitard, D., Fournier, M., 1994.** Comportement mécanique du bois. *Le Bois, matériau d'ingénierie*. Editions ARBOLOR. 433 pp.
- Haluk, J., P., 1994.** Composition chimique du bois. *Le Bois, matériau d'ingénierie*. Editions ARBOLOR. 433 pp.
- 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 For Sciences*. 57, 819-829.
- Haluk, J.P., Roussel, C., Thévénon, M., 2001.** Importance des quinones dans les propriétés antifongiques du Teck (*Tectona grandis*). *Les cahiers Scientifiques du Bois*. 2, 77-83.
- Hillis, E., 1987.** Heartwood and tree exudates. Springer Series in Wood Science, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York. 268 pp.
- Janin, G. 1987.** Mesure de la couleur du bois ; intérêt forestier et industriel. *Annales des Sciences Forestières*. 44(4), 455-472.
- Janin, G., 1994.** Colorimétrie : Principe de la mesure de la couleur. Application au bois. *Le Bois, matériau d'ingénierie*. Editions ARBOLOR. 433 pp.
- Kaosa-ard, A., 1995.** Overview of problems in Teak plantation establishment. Proceedings of the seminar on high value timber species for plantation establishment, Thailand (in press).
- Kedharnath, S., Chacko, V.J., Gupta, S.K., Mathews, J.D., 1963.** Geographic and individual tree variation in some wood characters of teak (*Tectona grandis*). *Silvae Genetica*. 12, 181-187.
- Kjaer, E.D., Kajornsrichon, S., Lauridsen, E.B., 1999.** Heartwood, Calcium and Silica content in five provenances of Teak (*Tectona grandis*). *Silvae Genetica*. 48, 1.
- Klumpers, J., 1994.** Le déterminisme de la couleur du bois de Chêne. Etude sur les relations entre la couleur et des propriétés physiques, chimiques et anatomiques ainsi que des caractéristiques de croissance. Thèse de Doctorat de l'ENGREF, Nancy, France. 195 pp.
- Kokou, K., 1998.** Les Mosaïques forestières au Sud du Togo : biodiversité, dynamique et activités humaines. Thèse. Univ Montpellier 2, France. 139 pp.
- Kokutse, A.D., Berthier, S., Stokes, A., 1999.** Formation et développement du bois de coeur. *Propriétés et usages du pin maritime*. Éditions ARBORA, Bordeaux. 287-290.
- Kokutse, A.D., 1999.** Formation du duramen chez le pin maritime (*Pinus pinaster* Ait). Mémoire de DEA en Sciences du Bois, Univ. Bordeaux 1, France. 25 pp.
- Kokutse, A.D., Berthier, S., Stokes, A., 2000.** Irregular heartwood formation in leaning trees of Maritime Pine: a result of a hydraulic or mechanical process? Proceedings of the 3<sup>rd</sup> plant biomechanics conference. Freiburg-Badenweiler. 434-435.

- Krishnapillay, B., 2000.** La sylviculture et la gestion des plantations de teck. Unasyva. 201, 14-20.
- Kosei, S., Noguchi, K., Terasima, I., 2002.** Analyses of tree architecture construction based on the pipe-model theory and branch autonomy. *Annals of Botany*. (sous presse).
- Loubinoux, B., Kilbertus, G., 1994.** La préservation du bois. Techniques et produits de préservation. *Le Bois, matériau d'ingénierie*. Editions ARBOLOR. 433 pp.
- Lamouroux, M., 1957.** Les sols de teckeraies du Togo. Doc ORSTOM, France. 64 pp.
- Loehle, C., 1988.** Tree life history strategies : the role of defenses. *Canadian Journal of Forest Research*. 18, 209-222.
- Magel, E., Jay-Allemand, C., Ziegler, H., 1994.** Formation of heartwood substances in the stemwood of *Robinia pseudoacacia* L. II. Distribution of nonstructural carbohydrates and wood extractives across the trunk. *Tree*. 8, 165-171.
- Marchand, P.J., 1983.** Sapwood area as estimator of biomass and projected leaf area for *Abies balsamea* and *Picea rubens*. *Can. J. For. Res.* 14, 85-87.
- Mazet, J.F., Janin, G., 1990.** La qualité de l'aspect des placages de chênes : mesures de couleur et critères d'appréciation des professionnels français et italiens. *Annales des Sciences Forestières*. 47, 255-268.
- Morataya, R., Galloway, G., Berninger, F., Kanninen, M., 1999.** Foliage biomass-Sapwood area and volume relationships of *Tectona grandis* L. F. and *Gmelina arborea* Roxb. : silvicultural implications. *Forest Ecology and Management*. 113, 231-236.
- Nepveu, G., 1994.** Variabilité. *Le Bois, matériau d'ingénierie*. Editions ARBOLOR. 433 pp.
- Nobushi, T., Sato, T., Iwata, R., Harada, H., 1984.** Season of heartwood formation and the related cytological structure of ray parenchyma cells in *Robinia pseudoacacia* L. *Mokuzai Gakkaishi*. 30, 628-636.
- Okuyama, T., Yamamoto, H., Wahyudi, I., Hadi, Y.S., Bhat, K.M., 2000.** Growth stresses and some wood quality attributed in planted teak. Acte du 21ème congrès de l'IUFRO.
- Pahup, S., Sunita, J., Sangeeta, B., 1989.** A 1, 4-Anthraquinone derivate from *Tectona grandis*. *Phytochemistry*. 28, 1258-1259.
- Pardé, J., Bouchon, J., 1987.** Dendrométrie, 2<sup>ème</sup> édition 328 pp.
- Pandey, D., Brown, C., 2000.** Le teck dans le monde. Unasyva. 201, 3-13.
- Polge, H., 1964.** Le bois juvénile des conifères. *Revue Forestière Française*. 6, 473-505.
- Priya, P.B., Bhat, K.M., 1999.** Influence of rainfall, irrigation and age on the growth periodicity and wood structure in Teak (*Tectona grandis*). *IAWA Journal*. 20, 181-192.

- Saint-André, L., 1998.** Modélisation tridimensionnelle des profils de cernes dans un billon d'épicéa commun (*Picea abies* Karst) compte tenu de la mesure de son enveloppe externe et des caractéristiques dendrométriques usuelles de l'arbre d'origine. Thèse de Doctorat de l'ENGREF, Nancy, France. 215 pp.
- Sandermann, W., Simantupang, H., 1966.** Zur chemie und biochemie des Teakholzes (*Tectona grandis* L.f). Holz als Roh-und Werkstoff. 24 :190-204.
- Sangkul, S., 1995.** Processing and development technology and future : Trend for Utilisation. FAO Doc. 9. The Second Regional Seminar on Teak, Yangon, Myanmar.
- Sallenave, P., 1958.** Le Bois de Teck africain. Bois et Forêts des Tropiques. 57, 37-48.
- Sanwo, S.K., 1986.** Intra-tree variation of strength properties in plantation grown Teak (*Tectona grandis* L.f) and techniques for their systematic sampling. Occasional paper. Oxford Forestry Institute. 31.
- Sanwo, S.K., 1987.** The characteristics of the crown-formed and stem-formed wood in plantation Grown teak (*Tectona grandis* L.f) in Nigeria. J. Inst. Wood Sci.11, 85-88.
- Sanwo, S.K., 1990.** The relationship between rate of growth and strength in plantation grown Teak (*Tectona grandis* L.f). J. Trop. For Ressources. 2, 9-13.
- Scheffer, C.T., Cowling, B.E., 1966.** Natural resistance of wood to microbial deterioration. Annual Review of Phytopathology. 4, 147-170.
- Schinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., Kira, T., 1964.** A quantitative analysis of plant form. The pipe model theory. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Japanese Journal Of Ecology*. 4, 133-139.
- Schultz, H., 1959.** Der Phänotyp von Furniereichen und die Beziehungen zur Holzfarbe (Schütt, P. et Koch, W., éd.), Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin. 62-108.
- Schultz, P.T., Harms, W.B., Fischer, H.T., McMurtry, K.D., Minn, J., Nicholas, D.D., 1995.** Durability of Angiosperm heartwood: the importance of extractives. *Holzforschung*. 49, 29-34.
- Schultz, P.T., Nicholas, D.D., 2000.** Naturally durable heartwood : evidence for a proposed dual defensive function of the extractives. *Phytochemistry*. 54, 47-52.
- Stokes, A., Berthier, S., 2000.** Irregular heartwood formation in *Pinus pinaster* Ait. is related to eccentric, radial, stem growth. *Forest Ecology and Management*. 135, 115-121.
- Souvannavong, O., 1986.** Les teckeraies togolaises. Aménagement des parcelles à objectif bois d'œuvre. Rapport ODEF, Togo. 296 pp.
- Simatupang, H.M., Yamamoto, K., 1999.** Properties of teakwood (*Tectona grandis* L.f) as influenced by wood extractives and its importance for tree breeding. Regional seminar on site technology and productivity of teak plantations, Thailand (in press).

- Simatupang, H.M., Yamamoto, K., 2000.** Properties of teakwood (*Tectona grandis* L.f) and Mahogany (*Swietenia macrophylla* King) from manmade forest and influence on utilization. Proceedings of the seminar on high value timber species for plantation establishment, Thailand (in press).
- Syafii, W., Yoshimoto, T., Samejima, Masahiro, 1988.** The effet of lignin structure on decay resistance of some tropical woods. Bulletin Tokyo University Forestry. 80, 69-77.
- Telewski, F.W., 1990.** Growth, wood density, and ethylene production in reponse to mechanical perturbation in *Pinus taeda*. Canadian Journal of Forestry Research. 20, 1277-1282.
- TEWARI D.N.; 1992.** A monograph on teak (*Tectona grandis* Linn.F.). International book distributors. Rajpur road, Dehra Dun. 248006 INDIA.
- TINT, S., KYUPE, U.M., 1995.** Wood quality and end-user requirements. FAO Doc. 10, The Second Regional Teak Seminar. Yangon, Myanmar.
- Thibaut, B., 1997.** Tree biomechanics and related problems in wood technology. Plant Biomechanics, Reading (UK), Centre for Biomimetics.
- Timell, T.E., 1986.** Compression Wood in Gymnosperms. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin. (3), 2150 pp.
- Trochain J.L., 1957.** Accord interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique Tropicale. *Bull Int .d'Etudes centrafricaines. Nouvelle série, Brazzaville*, 13-14, 556-93.
- Vanninen, P., Mäkela, A., 2000.** Needle and stem wood production in Scots pine (*Pinus sylvestris*) trees of different age, size and competitive status. *Tree Physiology*. 20, 527-533.
- Vernay, M., Fouquet, D., 1997.** Guide d'utilisation des bois de Guyane dans la construction. ISBN :2-87614-268-6. Cirad-Forêt. 205 pp.
- Yamamoto, K., Simatupang, H., M., Hashim, R., 1998.** Caoutchouc in teak wood (*Tectona grandis* L.f) : formation, location, influence on sunlight irradiation, hydrophobicity and decay resistance. *Holz as Roh-und Werkstoff*. 56, 201-209.
- Nishino, Y., Janin, G., Chanson, B., Détienne, P., Grill, J., Thibaut, B., 1998.** Colorimetry of wood specimens from French Guiana. *J. Wood.Sci*. 44, 3-8.
- Van Acker, J., Stevens, M., Carey, J., Sierra-Alvarez, R., Militz, H., Le Bayon, I., Kleist, G., 1998.** Criteria for Basidiomycete testing and ways of defining natural durability classes The International Research Group on Wood Preservation Doc IRG/WP 98-20144. 19 pp.
- Willeitner, H., Peek, R.D., 1997.** The natural durability story. IRG-WP. 97-20119. 14 pp.
- White, H., 1986.** La végétation de l'Afrique. Mémoire accompagnant la carte de végétation d'Afrique. UNESCO/AETF/UNSO.

**Ziegler, H., 1968.** Storage, mobilisation and distribution of reserve material in trees. *The formation of wood in forest trees*. Academic Press. London, New York. 303-320.

**Zobel, J.B., van Buijtenen, J.P., 1989.** Wood variation. Its causes and control. Springer Series in Wood Science, 355pp.

---

***ANNEXES***

---



Annexe : Propriétés physiques et mécaniques du teck

	<b>Cohésion transversale Résistances</b>		<b>Cohésion axiale</b>			
	Traction perpendiculaire aux fibres	Cisaillement	Résistance à la compression	Résistance en flexion statique	Module d'élasticité	Résistance au choc
Valeurs moyennes en Mpa	2,66	7,3	5,61	$1,365 \cdot 10^2$	$1,11 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^{-3}$

	<b>Densité à 12% d'humidité (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Dureté Chalais- Meudon (N)</b>	<b>Rétractibilité</b>		
			Coeff de rétractibilité volumétrique (V%)	Tangentielle (%)	Radiale (%)
Valeurs moyennes	670	4,2	0,34	5	2,7
Catégorie de bois	mi-lourd	mi-dur	Peu à moyennement nerveux	Faible	Faible

Les échantillons proviennent de teck d'Afrique et d'Asie (CTFT 1990)



## RESUME

D'origine asiatique, le Teck (*Tectona grandis* L.f.) dont le bois est très apprécié sur le marché mondial est devenu la première espèce commercialisable du Togo. Afin de contribuer à une meilleure valorisation des bois de plantation, cette étude est consacrée à la qualité du Teck dans les cinq zones écologiques du Togo. Elle s'intéresse particulièrement à la formation du bois de cœur, aux propriétés physiques et mécaniques, à la variabilité de la durabilité naturelle et de la couleur.

Sur un échantillon de 80 arbres, le pourcentage de bois de cœur formé a été analysé en fonction de l'âge et du diamètre des troncs. Une comparaison de ce pourcentage de bois de cœur montre qu'à un âge d'exploitabilité égale, les plantations dans les zones écologiques 3, 4, et 5 sont les plus productives.

L'étude de la variation radiale de la densité à 12% d'humidité et du module d'élasticité longitudinal en fonction de l'âge cambial a permis de se fixer la limite "bois juvénile-bois adulte" chez le Teck en plantation au Togo autour de 20-25 ans. Par rapport à ces deux propriétés, les performances des Tecks de plantation ne sont pas inférieures à celles des Tecks de forêts naturelles.

La durabilité naturelle qui représente la propriété la plus déterminante de la qualité du Teck a été évaluée vis-à-vis de quatre champignons dont deux de zones tropicales et deux de zones tempérées. Les essais réalisés sur un échantillon d'environ 1200 éprouvettes montrent que le Teck du Togo est très résistant : plus de 90% des échantillons sont classés très durables à durables. La durabilité naturelle vis-à-vis des termites montre que les Tecks de plantation présentent une plus grande variabilité par rapport à ceux de forêt naturelle.

La couleur qui est l'une des caractéristiques esthétiques très recherchées chez le bois présente une variabilité inter-arbre très importante chez le Teck du Togo. Les arbres de la zone écologique 3 sont significativement les plus rouges et les plus jaunes que ceux des autres écologiques du Togo.

**Mots clés : Togo ; *Tectona grandis* ; bois de cœur ; densité à 12% ; module d'élasticité ; durabilité naturelle ; couleur.**

## SUMMARY

Teak (*Tectona grandis* L.f.) is a timber tree species indigenous of Asia, and is much appreciated on the world market for its wood. Teak became the first marketable timber in Togo. In order to contribute to a better valorization of wood grown in plantations, this study was devoted to the quality of teak wood grown in the five ecological zones of Togo. In particular, the formation of heartwood, the determination of physical and mechanical properties, and the variability of natural durability and color were examined.

On a sample of 80 trees, the percentage of heartwood was analyzed according to the age and the diameter of the trunks. A comparison of the heartwood percentage shows that for an equal exploitation age, the plantations in the ecological zones 3, 4, and 5 were the most productive.

A study of the radial variation of density at 12% moisture content and the longitudinal elasticity modulus according to cambial age, allowed the "juvenile wood-mature wood" boundary to be determined for Togolese plantation-grown teak. This boundary was found to be at 20-25 years of age. With regards to these two properties, the performance of plantation-grown teak was not considered to be lower than those of teak grown in natural forests.

Natural durability, which represents the most determining property of teak quality was evaluated using four fungi, of which two originated from tropical zones and two from temperate zones. The tests were carried out on 1200 samples and showed that Togolese teak was very resistant to fungal attack: over 90% of the samples were classified as very durable or durable. Natural durability with regards to termites showed that plantation teaks have a greater variability compared to those from natural forests.

Color, which is a much required aesthetic characteristic in teak wood, presented a highly significant inter-tree variability. Teaks from ecological zone 3 were significantly more red and yellow, which may be a function of soil type or local environment.

Therefore, although sample size was relatively small, it could be determined that zones 3,4,5 were the most productive, and that rotation age could be reduced to 25 years. A genetic study could be carried out to determine if provenances differed between stands, and if wood quality depended on provenance.

**Key words: Togo; *Tectona grandis*; heartwood; density at 12% moisture; elasticity modulus; natural durability; color.**