

## RELATION ENTRE LES CONTRAINTES DE CROISSANCE ET LA FISSILITE : APPLICATION AUX FENTES D'ABATTAGE D'EUCALYPTUS CAMALDULENSIS

A. MAZIRI<sup>1</sup>, M. ELGHORBA<sup>1</sup>, M. CHERGUI<sup>1</sup>, A. FARIMI<sup>2</sup>, M. ZIANI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Contrôle et de Caractérisation des Matériaux, ENSEM, Casablanca, Maroc.

<sup>2</sup>Division de la Recherche et d'Expérimentation Forestières, Agdal-Rabat, Maroc.

<sup>3</sup>Institut National des Sciences de l'Archéologie et du Patrimoine, Maroc.

Reçu le 17 Septembre 2009 – Accepté le 04 septembre 2010

### Résumé

Lors du tronçonnage, la redistribution des contraintes favorise l'apparition des fentes sur les sections transverses ouvertes des billons. Nous avons effectué des opérations d'abattage et de tronçonnage sur des arbres d'*eucalyptus camaldulensis*, provenant de l'Arboretum ménager de « Maamora ». Les premières observations qu'on a fait sur des billons, ont montré que ces fentes se développent généralement dans le plan LR à partir de la moelle et débouchent parfois au niveau du cambium. L'étude de l'amorçage et de l'extension de ces fentes en bout de grumes a nécessité en particulier, la connaissance du champ de contraintes initiale ; la géométrie du billon et les propriétés élastiques du matériau [2]. Nous avons effectué des mesures, sur arbres sur pied, et sur des rondins tronçonnés au voisinage de la couronne de prélèvement des Déformations Résiduelles Longitudinales de Maturation (DRLM), pour évaluer l'influence de l'état de contraintes en périphérie de l'arbre sur la typologie et l'orientation des fentes apparues lors du tronçonnage. Pour estimer l'énergie  $G_{FI}$  de rupture, nous avons réalisé un essai de fissilité, en se basant sur la méthode décrite par Gustafsson et Larsen 1990 [3]. Les résultats qu'on a recueillis ont montré, une corrélation significative entre la densité, le niveau des DRLM et les valeurs des énergies de rupture  $G_{FI}$ . Nous avons remarqué, une présence quasi systématique d'une fente à cœur, et la présence des fentes de trois et de quatre branches (en étoile) qui sont très réponsues sur les rondins, et dont le prolongement évite la zone du bois de tension. Nous avons effectué des observations sur des faciès internes des fentes à cœur par une méthode colorimétrique, sur ces faciès, nous avons remarqué une coexistence des fentes principales et des fentes secondaires.

**Mots clés :** *Eucalyptus camaldulensis*, Fissilité, contraintes de croissance, Bois de tension, Energie restituée, Bois vert

### Abstract

During slicing, the redistribution of the constraints supports the appearance of the slits on the open transverse sections of the barks. We carried out operations of demolition and slicing on trees of *eucalyptus camaldulensis*, coming from domestic Arboretum of "Maamora". The first observations which one made on barks showed that these slits generally develop in the plan LR starting from marrow and emerge sometimes on the level of cambium. The study of the starting and the extension of these slits in end of barks required in particular, the initial knowledge of the stress field; geometry of the bark and elastic properties of the material [2]. We took the measurements on trees on foot, and logs cut up in the vicinity of the crown of taking away of the Longitudinal Residual Deformations of Maturation (DRLM), to evaluate the influence of the state of stresses in periphery of the tree on the typology and the orientation of the slits appeared during slicing. To estimate energy of rupture  $G_{FI}$ , we carried out a crack test, while basing ourselves on the method described by Gustafsson and Larsen 1990 [3]. They are deflection tests three points, realized on notched samples and maintained in a green state (Humidify wood). The results which one collected showed a significant correlation between the density, the level of the DRLM and values of energies of rupture  $G_{FI}$ . We noticed a quasi systematic presence of a slit in heart, and the presence of the slits of three and four branches (out of star) which are very answered on the logs, and whose prolongation avoids the zone of the wood of tension. We carried out observations on internal faces of the slits in heart by a colorimetric method, on these faces, we noticed a coexistence of the principal slits and slits secondary.

**Key words:** *Eucalyptus camaldulensis*, Fissility, stress of growth, tension wood, restored Energy, wood humidify

### ملخص

عند عملية القطع، تتم إعادة توزيع الضغط على جدع الشجرة، مما يشجع على ظهور التشققات على مستوى الواجهة المقطوعة. لقد عملنا على قطع و تقطيع الأشجار من صنف ( الأوكالبتوس كمالدولانسيس و كونسيفالا كونسيفالا )، ولاحظنا تواجد الشقوق بشكل واضح على المستوى المتكون من المحور العمودي و المحور الأفقي انطلاقاً من مركز الشجرة، وتتجه مباشرة إلى المحيط الخارجي للشجرة، وهذا راجع بالأساس إلى تحرير هذه الضغوط وتحولها إلى طاقة ميكانيكية تتجاوز مستوى مقاومة الخشب. و لمعرفة الطاقة و الجهد المتسبب في بروز هذه الشقوق أو بالأحرى القطع، قمنا بمجموعة من تجارب القطع اعتماداً على الطريقة الموضوعية من طرف (لارسن و كيبستافسن).

ولمحاكاة الحالة يوجد عليه الخشب وسط الشجرة، قمنا بإجراء هذه التجربة على قطع مشبعة بالماء. إن النتائج المتوصل إليها أبانت على وجود علاقة بين كثافة مادة الخشب و مستويات الطاقة الكافية لخلق الشق. ، وامتدادها يكون سريعاً على المحور العمودي بمجرد وصولها إلى الحافة. كما أكدنا، وجود شكلين مترافقين من الشقوق: شق رئيسي يمتد على المحور العمودي للشجر، و شق ثانوي يتوقف امتداده عند طول معين

**الكلمات المفتاحية :** الأوكالبتوس كمالدولانسيس، الضغوط الأولية، مقاومة الخشب، الطاقة

Le bois est le résultat de dépôts progressifs des couches de matière. Il s'agit d'un dépôt actif, car chaque nouvelle couche de bois formée sur la périphérie d'une tige est appelée à jouer un rôle dans la tenue mécanique et le contrôle de la forme de l'arbre. Cela est permis par le processus de maturation cellulaire induisant un raccourcissement axial est un gonflement transversal du bois récemment formé, ces déformations étant bloquées par le tronc massif génèrent des contraintes dites de croissance. Le champ de ces contraintes est caractérisé par une traction longitudinale et une compression tangentielle en périphérie, une compression longitudinale et une traction transverse à cœur (KUBLER 1987, ARCHER 1986, FOURNIER 1989). Entre l'abattage de l'arbre et le début de séchage du bois, sont effectuées des découpes déterminant pour le rendement global de la transformation. Or le premier des débits appliqués à un arbre est le tronçonnage, qui produit une redistribution défavorable des contraintes résiduelles, et qui risque d'aggraver la tendance initiale à la fissuration à cœur apparu sur les faciès de l'extrémité des grumes. L'origine de ce phénomène, lorsqu'il se manifeste avant séchage, doit être rechercher dans l'existence de déformations bloquées lors de l'élaboration du matériau bois (l'état de contrainte de croissance dans l'arbre) [6]. Dans la pratique on ne mesure pas des contraintes, mais des déformations, de plus, seules les contraintes longitudinales semblent influencer fortement les phénomènes d'apparition des fentes lors du tronçonnage, une seule déformation sera donc mesurée, il s'agit de la déformation résiduelle longitudinale de maturation (DRLM). Cette mesure sera accompagnée par des données morphologiques de l'arbre à savoir : La hauteur, le diamètre, l'inclinaison, et des mesures de densité.

L'apparition d'une fissure consomme une certaine énergie, qui peut être dans certain cas proportionnelle à la surface de décohésion [7]. A signaler que la source de cette énergie n'est que le champ de contraintes résiduelles qui constitue un réservoir d'énergie élastique [5]. Le but dans ce travail est d'étudier le comportement du bois vert à la fissuration, notamment, en fonction des variations des contraintes de croissance et faire une description des profils des fentes radiales et longitudinales; évaluer et comparer la fissilité des différentes arbres en différentes positions par le moyen du paramètre d'énergie surfacique de rupture  $G_{if}$ .

## 1. MATERIELS ET METHODES

### 1.1. Matière végétale

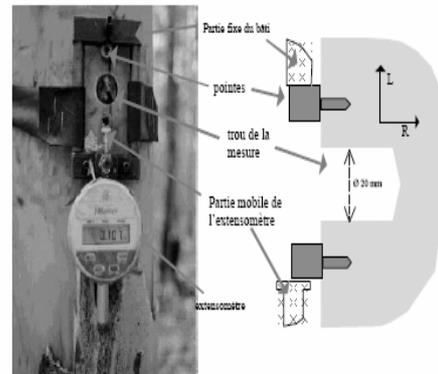
Les prises de mesures que nous avons entreprises, pour les déformations résiduelles longitudinales de maturation et la confection des éprouvettes de fissilité, ont été effectuées sur dix arbres provenant de l'Arboretum Ménager de «Maamora». Le choix des arbres à été effectué d'une manière aléatoire et simple, les arbres choisis ne présentaient pas de pourriture ni de défauts ; ils n'étaient pas trop inclinés. L'ensemble des mesures ont été effectuées sur de diamètre compris entre 40 et 65 cm des. Ces mesure on été effectuée à une hauteur de 1,30m du sol.

L'âge des arbres est d'environ 38 ans (suivant la date de maturation).

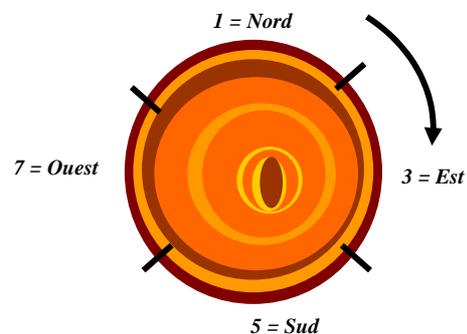
## 1.2. Méthodes

### 1.2.1. Mesure des déformations de maturation à la surface de l'arbre sur pied.

L'estimation des DRLM a été réalisée en utilisant la méthode du trou unique (Archer, 1986). Cette méthode consiste à mesurer le déplacement instantané de deux pointes fixées à la surface écorcée de l'arbre, suite au perçage d'un trou entre les deux pointes. Le déplacement résulte de la modification du champ de contrainte provoqué par le perçage du trou et peut donc être relié aux déformations bloquées dans l'arbre (Figure 1a). Avant perçage, les deux pointes sont distantes de  $D = 45\text{mm}$ , le trou percé, à égale distance des deux pointes, a un diamètre de 20mm. Les deux pointes sont alignées suivant la direction des fibres, nous nous intéressons aux déformations dans la direction longitudinale. Un gabarit permet de positionner les pointes et de centrer le trou de perçage. Le déplacement relatif des deux pointes est donné par un comparateur à lecture digitale avec une sensibilité de l'ordre d'un  $\mu\text{m}$  (Marque MITUTOYO : type Digimatique IDC ; capacité 12mm) ; la mesure est enregistrée dès que le comparateur indique une valeur stable alors que le perçage se poursuit.



a : Photo et schéma de la prise de mesure des DRLM



b : Localisation des mesures de DRLM

**Figure 1** : Mesure des déformations résiduelles longitudinales de maturation (DRLM) par la méthode du trou unique.

Le déplacement intègre la tension à la surface du bois enlevé et les caractéristiques du bois restant sur pied.

Huit mesures ont été effectuées sur chaque arbre, à une hauteur de 1,30m du sol et situées sur une couronne à un angle de 45° l'une par rapport à l'autre. Elles sont repérées par: 1, 2, 3,..., 8 en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre (figure 1b) [3]. Numérotation des équations :

### 1.2.2. Observation et mesure des fentes en bout des billons.

Un mois après l'abattage et à proximité de la couronne de mesure des DRLM, un relevé systématique des longueurs de fentes a été effectué sur les deux bouts des billons de base, de manière à noter la position des fentes transverses par rapport à celle des meures des DRLM. Une observation complémentaire a été réalisée sur des billons, visant à observer les faciès de fissuration dans le volume interne des billons, en relation avec les observations de surface en bout. La méthode adoptée consiste à verser une solution colorée à l'extrémité supérieure d'un billon maintenu verticale. Le débit ultérieur par tronçonnage en rondelles et fendage le long des fentes permettait de faire apparaître l'étendue de la fissuration au moment de la coloration.

### 1.2.3. Mesure de l'énergie surfacique de rupture GF,I sur des éprouvettes à l'état vert (Essai de fissilité).

Deux types de configurations sont donc possibles. La configuration **TR** a l'inconvénient d'avoir le fond de fissure dans une zone variable dans le cerne ; les densités varient fortement dans un même cerne, cela peut influencer fortement les valeurs mécaniques mesurées. Dans la configuration **LR** [5], La fissure démarre dans une zone plus homogène. Pour limiter les effets dus à la courbure des cernes et pour avoir un matériau homogène, on choisit un élément de petit volume (40 x 40 x 24mm<sup>3</sup>) les essais sont réalisés sur des bois vert, conformément à l'état du bois au moment de l'abattage. Le mode d'ouverture (mode I) semble être le mode prépondérant dans l'extension des fentes, au raison de l'existence de la composante tangentielle du champ de contraintes qui est particulièrement très élevée.

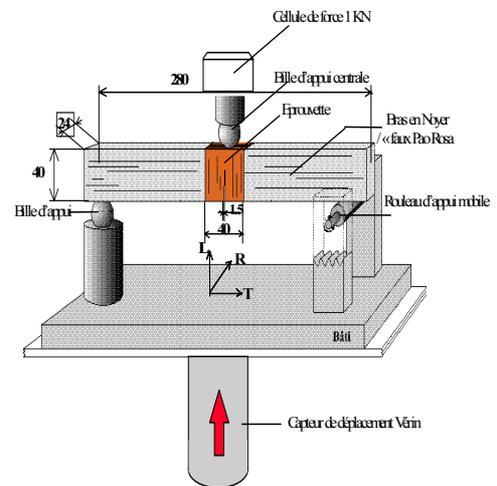
Nous avons adopté l'essai de GUSTAFSSON et LARSEN 1990. C'est un essai de flexion 3 points, réalisé sur une éprouvette pré entaillée. Elle a été obtenue à partir de trois éléments maintenus à l'état vert, un élément central comportant une entaille et deux éléments latéraux (120 x 40 x 24 mm<sup>3</sup>) qui lui servent de support en le tenant des deux cotés à l'aide d'une colle adoptée au bois vert (Colle Sumitak 242A ; MDI : Diphényl Méthylène Diisocyanate) catalysée par l'eau (Figure 2).



Figure 2 : Forme de l'éprouvette utilisé pour l'essai de fissilité .

Les essais de fissilité ont été réalisés au laboratoire de Mécanique et Génie civile (LMGC de Montpellier). La machine utilisée pour ces essais est une presse hydraulique

de type MTS modèle ADAMEL LHOMARGY DY 36 (figure 3b), équipée d'un module d'asservissement de force et d'un capteur de déplacement. Une cellule de forces de 10 tonnes utilisées sur leurs plus petites gammes de résolution, pour plus de précision. Un ordinateur avec le logiciel Test Works qui permet la programmation, le pilotage et la visualisation de l'essai.



a : Description de l'essai



b : Machine d'essai MTS Adamel Lhomargy DY 36

Figure 3 : Essai de fissilité.

Le critère de description de l'essai retenu est l'énergie surfacique de rupture GF,I qui se calcule par la formule suivante :

$$G_{F,I} = \frac{1}{S} \left[ Mg \delta_0 + \int_0^{\delta_0} F \cdot d\delta \right]$$

Avec :

$\delta_0$  : déplacement réalisé du début de chargement jusqu'à rupture complète

S : surface rompue du ligament en m<sup>2</sup>

Mg : poids de l'éprouvette en

F : force enregistrée durant l'essai en N

Cette énergie correspond à la somme du travail réalisé par l'appui central et par le poids propre de l'éprouvette rapporté à l'air de la surface rompue (Figure 3a).

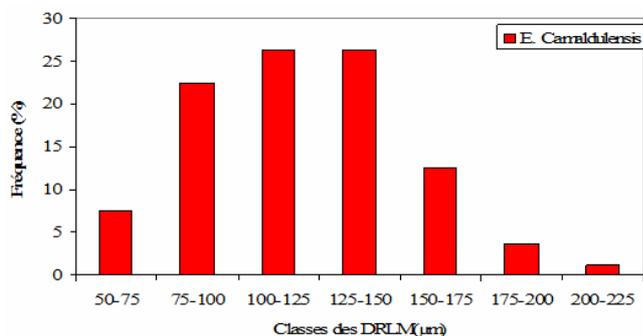
## 2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans le tableau 1, nous avons rapporté les valeurs moyennes, les maximums et les minimums des huit mesures de DRLM et les coefficients de variation correspondants. L'eucalyptus *camaldulensis* a une forte valeur moyenne de DRLM d'environ 120µm, en comparaison avec d'autres essences à savoir : L'eucalyptus *gomphocephala* DRLM ≈ 64 µm (mesures effectuées sur dix arbres), l'eucalyptus *grandis* DRLM ≈ 81µm [11] ; le chêne vert DRLM ≈ 21 µm [12].

**Tableau 1 :** Résultats expérimentaux des mesures des DRLM pour les arbres d'Eucalyptus camaldulensis

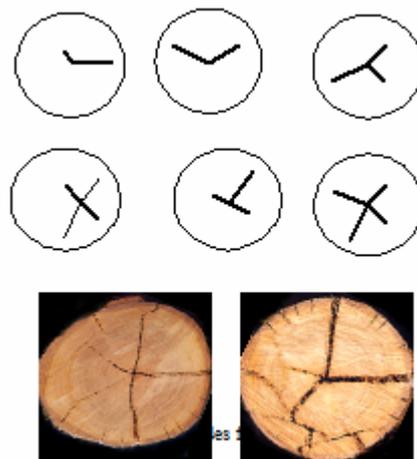
Arbre	DRLM <sub>max</sub>	DRLM <sub>min</sub>	DRLM <sub>mov</sub>	CV%	
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	1	116	76	94	18
	2	153	116	135	11
	3	147	83	113	19
	4	163	83	113	22
	5	223	143	162	13
	6	117	84	126	11
	7	120	66	91	16
	8	110	61	78	24
	9	154	116	136	12
	10	193	130	150	15
Moyenne des 10 arbres			<b>120</b>		

Les classes de DRLM sont représentées sur la figure 4, les histogrammes montrent qu'il existe deux catégories distincts des classes de DRLM : La première correspond à un pourcentage élevé de valeurs faibles et moyennes allant jusqu'à 175µm. Ces valeurs correspondent au bois normal. La deuxième correspond à un faible pourcentage de valeurs très élevées comprises entre 200 et 225 µm. Ces pics de valeurs annoncent la présence de bois de tension. SASSUS [1994] a d'ailleurs mis en évidence la supériorité des valeurs de DRLM du bois de tension par rapport à celles des bois normal.

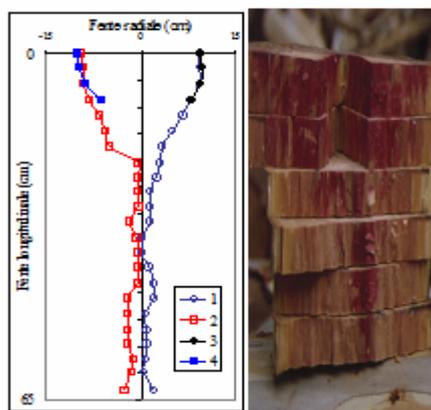


**Figure 4 :** Histogramme des valeurs des DRLM mesurées à la surface des arbres sur pied d'eucalyptus camaldulensis

Les premières observations des fentes, faites après 24h, sur les rondins découpés ont montré une répétition des profils courants ré pondus sur la majorité des rondins découpés. Des fentes de trois et de quatre branches (en étoile) figure 5a.



a: Profils des fentes radiales

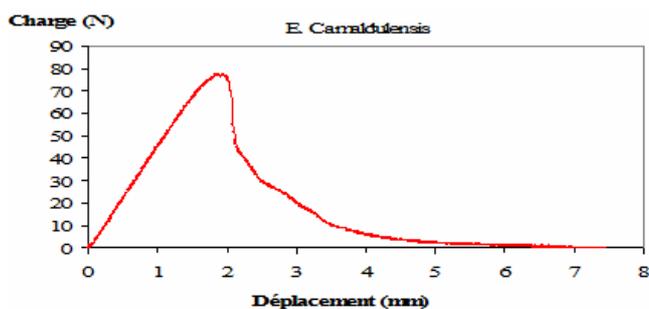


b: Profils des fentes longitudinales

**Figure 5 :** Observation des profils des fentes

Ces observations ont été faites en faisant référence aux positions et valeurs prises des DRLM sur la majorité des bouts, le prolongement des branches des fentes évite la zone de la valeur maximale des DRLM, et se situe généralement là où il y a une forte différence entre deux positions consécutives de mesures de DRLM.

L'observation des fentes longitudinales a indiqué la coexistence d'une fente principale qui s'étale sur une grande longueur à l'intérieur du rondin, et des fentes secondaires (Figure 5b). La longueur de la fente principale est influencée également par Les pics des valeurs des DRLM. Plus le pic est important, plus la fente principale est longue.



**Figure 6 :** Courbe de flexion (charge – déplacement).

Les courbes de flexion (Figure 6), charge- déplacement, nous ont permis de déterminer, l'énergie de rupture  $G_{I,r}$  qui correspond au travail fourni pour rompre totalement l'échantillon.

La courbe de rupture est divisée en deux parties : Une partie élastique, croissante et quasi-linéaire traduisant la phase d'amorçage de la fissure ; une seconde partie, de la courbe décroissante de façon hyperbolique jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette représente la phase de propagation. Les mesures retenues lors de ces essais sont l'énergie surfacique de rupture  $G_{F,I}$ , et la charge maximale  $F_{Max}$ , prise comme valeur de transition entre les deux phases (Tableau 2).

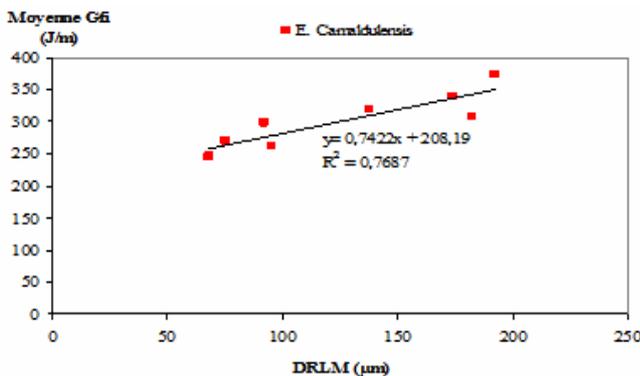
**Tableau 2 :** Résultats expérimentaux des mesures de la charge maximale  $F_{Max}$  et de l'énergie de rupture  $G_{F,I}$

E.Camaldulensis	Max	Min	Moy	CV(%)
$G_{F,I}$ (J/m <sup>2</sup> )	382	276	325	12
$F_{Max}$ (N)	88	45	72	16

$G_{F,I}$ : Energie surfacique de rupture ;  $F_{Max}$ : Charge maximale

La figure 7 représente la moyenne des  $G_{F,I}$  mesurées à partir de la moelle jusqu'à l'écorce de l'arbre, en fonction des DRLM prélevés à la circonférence extérieure. Il est clair qu'il y a une évolution de l'énergie de rupture liées à celle des amplitudes des DRLM. Ceci est très remarqué pour les des grandes valeurs de DRLM, (Présence du bois de tension) correspondants à des fortes valeurs de  $G_{F,I}$ , ce qui favorise le prolongement des fentes en dehors de ces zones (zones de fortes énergies).

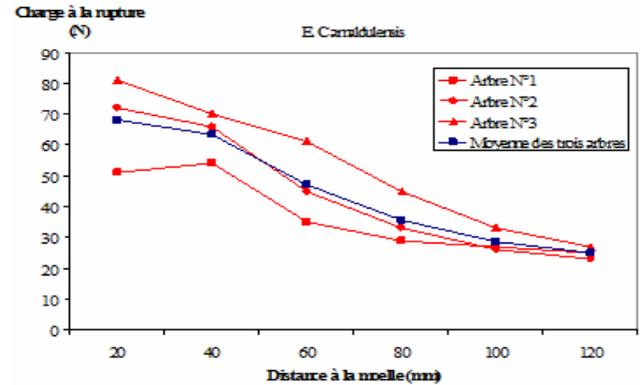
L'écart d'âge est parfois considérable entre un bois extrait près du cœur et un autre près de l'écorce [7]. Cet écart se traduit d'une part, par une différence de chargement mécanique, supporté depuis la formation du bois jusqu'à l'abattage de l'arbre [4] [9]. D'autre part, par une grande variabilité au niveau physique (variation de densité); et anatomique : bois juvénile et bois adulte, bois initial et bois final présents au sein des cerne.



**Figure 7 :** Relation entre l'énergie moyenne surfacique de rupture et les DRLM du bois d'eucalyptus camaldulensis

Cette variabilité influencera le comportement mécanique à la rupture des différents échantillons de bois prélevés sur l'axe radiale du bout du rondin. Sur la figure 8, on remarque clairement cette influence. Les plus fortes valeurs de la charge maximale sont affectées aux éprouvettes qui se situent près de la moelle.

Ces valeurs décroissent à fur et à mesure qu'on se rapproche de la périphérie: résistance relativement faible à la fissuration.



**Figure 8 :** Evolution de la charge à la rupture en fonction de la distance à la moelle

## CONCLUSION

Nous avons identifié deux sources de blocage biomécanique dans le bois de l'arbre sur pied : la croissance et la maturation. Il s'agit d'une mise en place progressive de la matière et de la charge du matériau. Le blocage, comme le déblocage éventuel, a toujours pour origine l'interaction entre les sollicitations mécaniques et un autre phénomène (ex : chimique ; biologique).

La redistribution des contraintes de croissance, après abattage, conduit à la formation d'un champ de contrainte suffisamment important pour créer des fissures. L'étude de la distribution des déformations résiduelles longitudinales de maturation a montré que l'eucalyptus *camaldulensis* est une espèce nerveuse ( $DRLM_{Moy} \approx 120\mu m$ ), par rapport aux autres essences d'eucalyptus.

La mesure des indicateurs des contraintes de croissance à la surface des arbres sur pied, nous a permis d'estimer la déformation longitudinale de maturation. La variabilité des indicateurs des contraintes de croissance (DRLM) au sein des arbres étudiés, est principalement liée aux variations intra-arbre. C'est au niveau de la circonférence, que les variations sont plus prononcées.

Les zones de bois de tension ont un effet important sur les DRIM créant une forte discontinuité au niveau de la couronne périphérique de l'arbre. Elles induisent des grands gradients de propriétés physiques et mécaniques. Les arbres ayant une répartition du champ de contraintes très dissymétrique seront susceptibles de fendre lors de la redistribution des contraintes au moment du tronçonnage.

Les fissures peuvent s'amorcer quand il y a des fortes dissymétries de contraintes de croissances. L'étude de la typologie des fentes a montré que le profil, l'orientation et la longueur sont influencées par les écarts importants des valeurs des DRLM. L'étude de l'énergie de rupture réalisée à l'aide de l'essai de fissilité, a permis de décrire la répartition des zones de faiblesse en fonction des valeurs des DRLM et de la position radiale qui correspondent au niveau de la transition entre différents secteurs de bois.

## REFERENCES

- [1] MDCEF, Bilan du Ministère Chargé des Eaux et Forêts. Les eucalyptus au Maroc (2000).
- [2] M. Fournier, B. Chanson, H. Baillères, "Mesure des déformations résiduelles de croissances à la surface des arbres. Observations sur différentes espèces. Annales des Sciences Forestières 51(1994) 249-266
- [3] H. Baillères, "Précontraintes de croissance et propriétés mécano-physiques de clones d'Eucalyptus (Pointe-Noire Congo): hétérogénéités, corrélations et interprétations histologiques".Thèse de Doctorat en Sciences du Bois, Université de Bordeaux I, (1994).
- [4] J. Gérard, "Contraintes de croissance, variations internes de densité et de module d'élasticité longitudinal, et déformations de sciage chez les Eucalyptus de plantation". Thèse de Doctorat en Sciences du Bois, Université de Bordeaux I. (1994).
- [5] A. Laghdir, "Modélisation de la fissuration en bout de grume liée aux contraintes de croissance- Application au Eucalyptus- " Thèse de l'Université de Montpellier 2, (2000).
- [6] B. Thibaut, "Etude de la fente à l'abattage du peuplier et du bois de tension, pour mieux comprendre ce phénomène et réduire les pertes qu'il provoque". Rapport final contrat Agriculture Demain MRT 92.G.0363, (1996).
- [7] H. Khademi-Eslam, "Contribution à l'étude de la valorisation du hêtre d'Iran (Fagus orientalis lipsky) par déroulage". Thèse en Sciences du bois, Montpellier, (1999).
- [8] F. Sassus, "Déformations de maturation et propriétés du bois de tension chez le hêtre et le peuplier : mesures et modèles". Thèse de l' Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts en Sciences du Bois, Montpellier, (1998).
- [9] R. Archer, "Growth stresses and strains in trees". Timell E. (Ed.), Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin, 240p. (1986).
- [10] J. T. Quirk, D. M. Smith, F. Fresse, "Effect of Mechanical Stress on Growth and Anatomical Structure of Red Pine (Pinus resinosa Ait.): Torque Stress". Can. J. For. Res.5 (4) (1975) 691-699.
- [11] A. Famiri, "Contribution à la caractérisation et à la valorisation du bois de la forêt marocaine. Cas des eucalyptus et du chêne vert". Thèse d'état, Université Mohammed V-Agdal, Rabat (2005).
- [12] DAYA A., 2006 : "Étude des contraintes de croissance des arbres sur pied d'Eucalyptus grandis et de chêne vert, Caractérisation et valorisation sous forme de bois collé". Thèse de l'Université Hassan II-ENSEM Casablanca.