

---

# L'évaluation du comportement hygroscopique de différents géotypes de Douglas

Amine JAMAAOUI<sup>1</sup>, Ion Octavian POP<sup>2</sup>, Guy COSTA<sup>3</sup>, Frederic DUBOIS<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Univ. Limoges, GEMH, EA 3178, F-19300 Egletons, France, [amine.jamaaoui@unilim.fr](mailto:amine.jamaaoui@unilim.fr)

<sup>2</sup> Univ. Limoges, GEMH, EA 3178, F-19300 Egletons, France, [ion-octavian.pop@unilim.fr](mailto:ion-octavian.pop@unilim.fr)

<sup>3</sup> Univ. Limoges, LCSN, UPRES EA 1069, F-87000 Limoges, France [guy.costa@unilim.fr](mailto:guy.costa@unilim.fr)

<sup>4</sup> Univ. Limoges, GEMH, EA 3178, F-19300 Egletons, France, [frederic.dubois@unilim.fr](mailto:frederic.dubois@unilim.fr)

---

*RÉSUMÉ. Dans le cadre de cette étude, nous présentons une approche originale de la durabilité en proposant une transversalité entre patrimoine génétique de différentes familles de Douglas et durabilité en structure en employant, comme 'marqueur', le comportement hygroscopique du matériau. Cette transversalité entre biologie et mécanique du bois a pour but d'accroître ce degré de durabilité afin de limiter le recours systématique à ces traitements de préservation souvent agressifs. Ce travail se présente sous forme d'une étude statistique avec ambition de mettre en exergue des géotypes en lien avec un faible coefficient de diffusion et des isothermes de sorption à humidité d'équilibre basse.*

*ABSTRACT. This study present an original approach of wood durability by proposing a coupling between different genetic families of Douglas and the structures durability using as 'marker', the hygroscopic behavior of materials. The transversality between biology and wood mechanics aims to increase this durability and to limit the systematic use of aggressive preservation treatments. This approach appears as a statistical study which has the ambition to highlight genotypes linked with a low diffusion coefficient and of low equilibrium moisture.*

*MOTS-CLÉS: Douglas, comportement hygroscopique, génétique.*

*KEY WORDS: Douglas, hygroscopic behavior, genetic.*

---

---

## 1. Introduction

La durabilité des constructions en bois est principalement corrélée aux risques d'attaques biologiques et de fissuration tempérés par les conditions environnementales et, plus particulièrement, par l'exposition à l'humidité. Naturellement durable en classe de risque 3, l'utilisation de Douglas demande des traitements particuliers et complexes sous des expositions plus sévère à l'humidité, et ce, avec des impacts environnementaux encore trop marqués aujourd'hui.

Dans le cadre de la chaire 'Ressources Forestières & Usages du Bois' mise en place par l'Université de Limoges et en partenariat avec l'INRA d'Orléans, le PIAF et l'Institut Pascal de Clermont Ferrand, nous présentons une approche originale avec comme objectif d'accroître ce degré de durabilité naturelle afin de limiter le recours systématique aux traitements de préservation souvent agressifs vis-à-vis de l'environnement. Cette approche de la durabilité propose une transversalité entre patrimoine génétique des différentes familles de Douglas et la durabilité structurelle en employant, comme 'marqueur', le comportement diffusif du douglas dans son domaine hygroscopique. Ce travail se focalise alors, sur 4 génotypes de Douglas et la caractérisation de leurs comportements en termes de propriétés de diffusion et d'isothermes de sorption. Cette étude statistique alimentera une base de données qui permettra, une fois complétée, de mettre en exergue quelques marqueurs en lien avec des caractéristiques d'inertie hydrique limitants, à la fois, les pics hydriques extrêmes (en ambiances très sèches et très humides) et la pénétration du front hydrique dans les éléments massifs structuraux.

## 2. Protocole expérimental

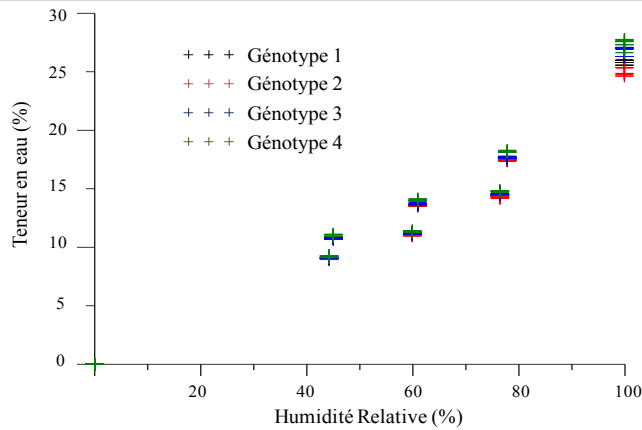
4 génotypes de Douglas ont été sélectionnés. Ils proviennent d'une parcelle située à Gimel (Corrèze 19) qui a été plantée en 1994 avec des jeunes plants issus de différentes populations clonales, sélectionnées sur des caractères d'intérêt pour les sylviculteurs. Afin de vérifier que le patrimoine génétique de ces Douglas était identique entre arbres d'une même population et différent entre arbres de populations distinctes, un génotypage de tous les arbres prélevés a été réalisé. Des aiguilles ont été prélevées sur les arbres. Après un broyage dans l'azote liquide, leur ADN a été extrait en employant le kit « DNAeasy plant mini kit ». Le génotypage a été effectué à partir de 11 séquences microsatellites nucléaires qui ont été identifiées chez le douglas et décrites comme des outils fiables pour l'identification de génotype [Sla 02]. Les résultats obtenus confirment que les 4 populations clonales pouvaient être assimilées à 4 génotypes distincts.

Une campagne expérimentale est menée par la suite dans le but de caractériser le comportement hygroscopique de chacun des 4 génotypes, en termes de diffusion hydrique et isothermes de sorption. Le principe consiste à suivre la teneur en eau d'un échantillon subissant des variations contrôlées de l'humidité relative de l'ambiance dans un dessiccateur isotherme contenant différentes solutions salines en accord avec les équilibres hydriques recherchés. L'évolution de la teneur en eau moyenne est définie par pesage tout au long de l'essai. Cette teneur en eau est mesurée par la technique de pesées successives. Pour éviter toutes perturbations des conditions hygrométriques, le dessiccateur permet également le passage des mains, et les pesées sont effectuées à l'intérieur. Les solutions sont contenues dans un sas chapoté également par des trappes qui permettent d'isoler le dessiccateur, ainsi que l'ambiance qui y règne à l'intérieur, au moment du passage à la condition d'humidité relative suivante après l'atteinte de l'équilibre hygroscopique.

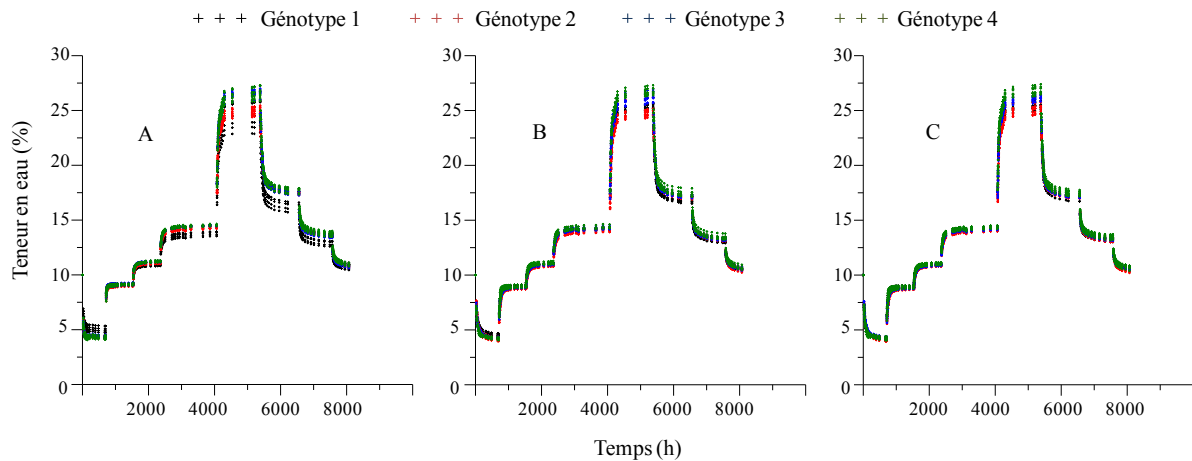
Quatre faces sur six ont été étanchées à l'aide d'une fine couche de résine afin de caractériser, de façon uniaxiale, les propriétés de diffusion dans les trois directions d'orthotropie. Une pré-simulation a permis d'optimiser la géométrie des échantillons (20x15x10 mm en L, R et T, respectivement) et obtenir des temps expérimentaux similaires pour les trois directions de diffusion. Ce choix résulte d'un compromis entre l'équilibre hygroscopique et le temps expérimental.

## 3. Résultats

Après 12 mois d'essais, les phases d'adsorption et désorption touchent à leur fin. Dans les figures ci-dessous on retrouve les cinétiques de diffusion (fig.2) ainsi que les isothermes de sorption (fig.1) correspondants aux quatre génotypes.



**Figure 1. Isothermes de sorption**



**Figure 2. Cinétique de diffusion A-Direction longitudinale B-Direction radiale C-Direction tangentielle**

Les graphiques ci-dessus présentent les comportements hygroscopiques des quatre génotypes. Visuellement, les isothermes de sorption sont distinctes selon les génotypes. Le deuxième et le quatrième génotype présentent deux comportements extrêmes, avec un écart qui atteint les 2% d'humidité interne, à l'état saturé (Hr = 100%). En revanche, les isothermes correspondant respectivement, au premier et troisième génotype sont comparables. Pour les cinétiques de sorption, il nous est difficile de conclure à partir des graphiques, car les humidités d'équilibre sont différentes selon le génotype. Pour mettre en évidence l'influence du patrimoine génétique du Douglas sur le comportement hygroscopique, une analyse inverse a été établie afin d'identifier respectivement, les paramètres d'isothermes et de diffusion.

Dans la littérature, on retrouve plusieurs modèles qui mettent en relation la teneur en eau d'un matériau hygroscopique ( $w$ ) avec la température et l'humidité relative ambiantes (Hr). Pour cette étude, le modèle thermodynamique de Merakeb [Mer 09] [1] a été utilisé. Les constantes de calibration ( $\rho_a$ ,  $\rho_d$ ,  $a_a$ ,  $a_d$ ) correspondant respectivement à la phase d'adsorption et désorption, ainsi que la teneur en eau d'équilibre en point de saturation des fibres ( $w_s$ ) ont été identifiés (Tab.1).

$$\ln \frac{w}{w_s} = \rho \ln Hr.e^{a.Hr} \quad [1]$$

L'identification des paramètres de diffusion (Tab.2) repose principalement sur, d'une part l'utilisation d'un modèle direct aux éléments finis [Ole 11] basé sur la seconde loi de Fick [2], qui permet de définir l'état hydrique du matériau et son évolution temporelle [Man 12], et d'autre part, son couplage avec un algorithme de résolution inverse (Simplex)[Ngu 14]. Le processus d'inversion s'effectue par une minimisation d'écart entre la teneur en eau mesurées par pesées et celle calculée avec le modèle éléments finis.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot \underline{\underline{D_w \nabla w}} \quad [2]$$

Avec  $\underline{D}_w$  le tenseur de diffusion hydrique orthotrope ( $m^2s^{-1}$ ) dont les valeurs propres sont  $D_L, D_R, D_T$  dans les directions longitudinale, radiale et tangentielle.

**Tableau 1. Paramètres d'isothermes de sorption (modèle thermodynamique)**

	Génotype 1		Génotype 2		Génotype 3		Génotype 4	
	Moyenne	E. type	Moyenne	E. type	Moyenne	E. type	Moyenne	E. type
$\rho_a$	0.628	1.91E-03	0.626	6.40E-03	0.628	8.09E-03	0.633	1.09E-02
$\rho_d$	0.698	6.29E-03	0.711	8.25E-03	0.676	7.83E-03	0.695	1.14E-02
$a_a$	1.619	1.27E-02	1.568	2.92E-02	1.691	1.45E-02	1.688	3.95E-02
$a_d$	1.012	1.73E-02	0.907	5.14E-02	1.166	2.54E-02	1.102	6.78E-02
$w_s$ (%)	25.90	1.75E-03	25.06	3.30E-03	26.96	3.23E-03	27.48	4.70E-03

**Tableau 2. Coefficients de diffusion pour chaque génotype, et pour les 3 directions d'orthotropie**

Directions	Génotype 1		Génotype 2		Génotype 3		Génotype 4	
	Moyenne	E. type	Moyenne	E. type	Moyenne	E. type	Moyenne	E. type
$D_L E^{-9} (m^2s^{-1})$	0.197	1.03E-2	0.195	5.78E-3	0.196	6.59E-3	0.195	1.09E-2
$D_R E^{-11} (m^2s^{-1})$	9.45	4.62E-1	7.64	5.47E-1	9.08	6.01E-1	9.35	4.17E-1
$D_T E^{-11} (m^2s^{-1})$	4.44	2.32E-1	3.92	1.94E-1	4.05	2.43E-1	4.36	2.64E-1

#### 4. Conclusion

Les résultats obtenus sont assez encourageants dans le sens où les comportements hygroscopiques des quatre génotypes sont distincts. Les paramètres identifiés (Tab.1 ; Tab.2) confirment les premiers constats graphiques. Ainsi on remarque que le deuxième génotype se distingue des autres, d'une part, par sa faible teneur en eau d'équilibre en point de saturation des fibres, et aussi par son processus de diffusion qui est assez lent dans les deux directions radiale et tangentielle. En revanche, il faut attendre la fin du protocole expérimental avant de pouvoir valider ces conclusions. Même si les résultats actuels affichent clairement un génotype avec des caractéristiques d'inertie hydrique plus limitants, ils demeurent tout de même conditionnés par l'hypothèse de la teneur en eau du départ, relevé sur les éprouvettes qui n'ont pas fait partie du protocole par crainte de dénaturer le matériau à l'étuve.

#### Bibliographie

- [SLA 03] SLAVOV, G.T., HOWE, G.T., YAKOVLEV, I., EDWARDS, K.J., KRUTOVSKII, K.V., TUSKAN, G.A., CARLSON, J.E., STRAUSS, S.H., ADAMS, W.T., « Highly variable SSR markers in Douglas-fir: Mendelian inheritance and map locations », *Theoretical and Applied Genetics*, 108 (5), p. 873-880
- [NGU 14] NGUYEN, T. A. , *Approches Expérimentales et Numériques Pour l'étude Des Transferts Hygroscopiques Dans Le Bois*. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2014.
- [Mer 09] Merakeb, S., Dubois, F. & Petit, C., « Modeling sorption hysteresis in hygroscopic materials », *Comptes Rendus - Mécanique*, 337(1), p.34–39.
- [Ole 11] Olek, W., Perré, P. & Weres, J., « Implementation of a relaxation equilibrium term in the convective boundary condition for a better representation of the transient bound water diffusion in wood ». *Wood Science and Technology*, 45(4), p.677–691.
- [Man 12] Manfoumbi Boussougou, N., *Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement* , Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2012.