



République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed Seddik BEN YAHIA-JIJEL
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master
Filière : Génie Mécanique,
Spécialité : Construction Mécanique

Thème :

Etude du fluage en flexion du matériau bois

Réalisé par :

- FLILISSA Sifeddine.
- HAMADOUCHE Belkacem.

Devant un jury composé de :

- Dr SAADALLAH Younès. MC/B à l'université de JIJEL « Encadreur »
- Mr SEDRET Toufik. MA/B à l'université de JIJEL « Président »
- Mr DELIOU Adel. MA/B à l'université de JIJEL « Examineur »

Soutenue le : 15 /07 /2021

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Dieu « ALLAH », notre créateur, le tout puissant, de nous avoir donné la force, la volonté et le courage pour avoir accomplie ce modeste travail.

Nous adressons nos vifs remerciements à notre encadreur Dr. SAADALLAH Younes pour ses conseils et ses dirigés du début jusqu'à la fin de ce travail de recherche.

Nous tenons également à remercier tous les responsables de département de génie mécanique de l'université Mohammed Seddik Benyahia « JIJEL », en particulier Mr BOUNNECHE Samir, chef de département de Construction Mécanique(CM), pour toute l'aide et l'accompagnement qu'ils nous ont fourni durant toute la période de notre cursus.

Nous souhaitons tant exprimer nos reconnaissances à Mr. Omar, Mr. Sofiane et à Mr. Abdenour KHDIMALLAH responsables du hangar de technologies, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre projet et pour leurs précieux conseils et remarques pendant toute la période du travail, ainsi pour leurs disponibilités et leurs encouragements.

Finalement, nous tenons à exprimer nos profondes gratitude à nos familles respectives FLILISSA et HAMADOUCHE qui nous ont toujours soutenus, sans oublier pour autant l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à réaliser ce travail de recherche.

Merci à vous tous !

Dédicace

J'ai l'immense plaisir de dédier cet ouvrage,

A moi-même, parce que j'ai toujours essayé d'atteindre mes objectifs,

A ma chère maman Dalila.F,

Qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études

A mon frère et mes sœurs (Amina, Bouthaina et Inès),

A Mrs. SFAKSI Zoubeida et son fils Mazen pour leur aide pendant le

cursus de Master,

Mes amis Belkacem, Imad, Dhiab, Hamzeh (Jordanie), Ragheed

(Syrie), Salim (Palestine), Haneen (Tunisie), Efe et Ertan

DÜNDAR(Allemagne), pour leur réconfort moral et leur disponibilité,

à ceux qui étaient toujours présents pour moi, je les remercie pour leur

motivation et surtout de ne jamais perdre l'espoir !

Merci beaucoup !

Sif eddine FLILISSA

Dédicace

Chaleureusement je dédie ce modeste travail :

A ma très chère famille (Ma Mère Ayacha H, Mon Père Rezki H,

Mon frère Omar, Mes sœurs Sabrina, Samia et Saida)

Qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles

de ce long chemin,

Et qui ont sacrifié toute leur vie afin de me voir devenir ce que je suis ;

A mon binôme FLILISSA Sifeddine

Mes amis Imad, Rahim, Ridha, Chahine, Hanane et Amel

Sans M'oublier Moi-Même.

A tous mes amis de promotion de ISTA 2016

& A Tous Ceux Qui Me Sont Chers

Belkacem HAMADOUCHE

SOMMAIRE

| | |
|-------------------------------|------|
| REMERCIEMENTS | II |
| Dédicace | III |
| Dédicace | IV |
| SOMMAIRE | V |
| Liste des tableaux | VIII |
| Liste des figures | IX |
| Introduction Générale..... | 1 |
| ○Contexte de l'étude :..... | 1 |
| ○Problématique | 1 |
| ○Organisation du mémoire..... | 2 |

Chapitre I : « Revue de littérature »

| | |
|--|----|
| 1 .1. Historique | 4 |
| 1 .2. Le matériau bois | 5 |
| 1 .3. Structure du bois..... | 6 |
| 1 .4. Composition chimique du bois..... | 8 |
| 1 .5. Corrélation entre les propriétés et les comportements du bois..... | 8 |
| 1.5.1. Propriétés mécaniques du bois | 9 |
| 1.5.1.1. Élasticité | 9 |
| 1.5.1.2. Influence de la densité..... | 11 |
| 1.5.1.3. Effet de la température et de la teneur en humidité..... | 11 |
| 1.5.2. Comportement mécanique du bois | 14 |
| 1.5.2.1. Modèle élastique | 15 |
| 1.5.2.2. Modèle viscoélastique | 15 |

Chapitre II : «Etude du phénomène de fluage»

| | |
|--|----|
| 2 .1. Définition | 18 |
| 2.1.1. Diagramme typique de fluage | 19 |
| 2.1.2. Différents stades de fluage | 19 |
| 2 .2. Mécanismes physiques de fluage | 20 |
| 2 .3. Modélisation du fluage..... | 20 |

| | |
|--|----|
| 2.3.1. Modèles rhéologiques de base..... | 20 |
| 2.3.2. Modèles analogiques | 21 |
| 2.3.2.1. Modèle de Kelvin-Voigt..... | 21 |
| 2.3.2.2. Modèle de Maxwell..... | 22 |
| 2.3.2.3. Solide viscoélastique | 24 |
| 2.3.3. Modèles analogiques généralisés | 25 |
| 2.3.3.1. Modèle de Maxwell généralisé | 25 |
| 2.3.3.2. Modèle de Kelvin-Voigt généralisé | 25 |
| 2.4. Machines de fluage..... | 26 |

Chapitre III :« Etude expérimentale et modélisation »

| | |
|--|----|
| 3.1. Réalisation de la machine du fluage en flexion..... | 29 |
| 3.1.1. Description de la machine | 29 |
| 3.1.2. Différents éléments de la machine de fluage | 31 |
| 3.1.3. Matériaux utilisés pour la machine du fluage en flexion | 31 |
| 3.1.4. Procédés d'usinage de la machine..... | 32 |
| 3.2. Expérimentation | 34 |
| 3.2.1. Matériaux objets d'étude | 34 |
| 3.2.1.1. Bois hêtre..... | 34 |
| 3.2.1.2. Bois d'olivier..... | 35 |
| 3.2.2. Préparation des échantillons..... | 36 |
| 3.2.3. Protocole expérimental..... | 38 |
| 3.3. Modélisation..... | 39 |
| 3.3.1. Proposition d'un modèle rhéologique | 39 |
| 3.3.2. Identification des paramètres viscoélastique | 40 |

Chapitre IV :« Discussion des résultats»

| | |
|---|----|
| 4.1. Analyse et discussion des résultats..... | 43 |
| 4.1.1. Présentation des courbes (Déplacement en fonction du temps)..... | 43 |
| 4.1.2. Description des courbes | 45 |
| 4.1.3. Identification du module de Young..... | 46 |
| 4.1.3.1. Module de Young à partir de l'essai normalisé..... | 47 |
| 4.1.3.2. Module de Young à partir des autres essais : | 48 |
| 4.1.3.3. Commentaire sur la différence | 49 |
| 4.2. Fonction du fluage..... | 50 |

| | |
|---|----|
| 4.2.1. Courbes de la fonction du fluage..... | 50 |
| 4.2.1.1. Courbes à partir de l'essai normalisé | 50 |
| 4.2.1.2. Courbes à partir des autres essais | 51 |
| 4.2.1.3. Description des courbes | 52 |
| 4.3. Paramètres viscoélastique identifiées..... | 52 |
| 4.3.1. Courbes de fluage Test-Modèle | 54 |
| 4.3.1. Comparaison des résultats Test-Modèle | 57 |
| Conclusion générale & perspectives de recherche | 60 |
| Références bibliographique | |
| Annexe 01 | |
| Annexe 02 | |
| Annexe 03 | |
| Résumé | |
| Abstract | |
| تلخيص | |

Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau I. 1: Caractéristiques dimensionnelles des cellules assurant le soutien de l'arbre..... | 7 |
| Tableau III. 1: Les propriétés du matériau utilisé [29]..... | 31 |
| Tableau IV. 1: Module de Young et déplacement instantané de l'essai normalisé | 48 |
| Tableau IV. 2: Module de Young et déplacement instantané des autres essais..... | 49 |
| Tableau IV. 3: paramètres viscoélastiques (K et μ) de l'essai normalisé | 58 |
| Tableau IV. 4: paramètres viscoélastiques (K et μ) des autres essais..... | 58 |

Liste des Figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1: Matériau bois..... | 5 |
| Figure I.2: Anatomie et structure du bois « Éléments composants le tronc ». | 6 |
| Figure I.3: Vue schématique de la structure d'un résineux et des directions privilégiés (gauche) et vue au microscope électronique à balayage de l'agencement des cellules (droite)[3]. | 7 |
| Figure I.4: Courbe contrainte déformation du matériau bois..... | 9 |
| Figure I.5: Effet de la température sur les modules d'élasticité pour différentes espèces (d'après Sulzberger 1953). | 12 |
| Figure I.6: Évolution du module d'Young en fonction de la teneur en humidité. (Goulet et Ouellet) [18]. | 13 |
| Figure I.7: Évolution de la déformation d'une éprouvette de bois soumise à une contrainte constante : OA : déformation élastique; AB : déformation viscoélastique; BC : retour élastique et CD : recouvrance différée [21]. | 15 |
| Figure I.8: Représentation rhéologique du fluage viscoélastique par n -éléments de Kelvin associés en série | 17 |
| Figure II. 1: Essai uni-axiale de fluage..... | 18 |
| Figure II. 2: Allure générale d'une courbe de fluage,(a) Evolution de la déformation et (b) la vitesse de déformation en fonction du temps. | 19 |
| Figure II. 3: Représentation rhéologique d'un solide élastique et d'un liquide newtonien. ... | 20 |
| Figure II. 4: Modèle de Kelvin-Voigt..... | 21 |
| Figure II. 5: Réponse de fluage de Kelvin-Voigt. | 22 |
| Figure II. 6: Modèle de Maxwell..... | 22 |
| Figure II. 7: Réponses en fluage et en relaxation du modèle de Maxwell..... | 23 |
| Figure II. 8: Solide viscoélastique | 24 |
| Figure II. 9: Modèle de Maxwell généralisé..... | 25 |
| Figure II. 10: Modèle de Kelvin-Voigt généralisé..... | 26 |
| Figure II. 11: Machines de fluage [26]. | 27 |
| Figure II. 12: Appareil didactique de fluage..... | 27 |

| | |
|--|----|
| Figure III. 1: Prototypé de la machine de fluage en flexion..... | 29 |
| Figure III. 2: Vue éclaté des éléments de la machine de fluag..... | 30 |
| Figure III. 3: Etapes de réalisation de la machine | 32 |
| Figure III. 4: Matière première..... | 32 |
| Figure III. 5: Coupage des tubes carrés..... | 33 |
| Figure III. 6: Soudage des tubes carrés..... | 33 |
| Figure III. 7: Machine d'essai de fluage..... | 34 |
| Figure III. 8: Bois hêtre..... | 35 |
| Figure III. 9: Dimensions d'une éprouvette selon la norme NF B 51-008 (AFNOR 1987)... | 36 |
| Figure III. 10: Eprouvette réelle du bois d'olivier..... | 36 |
| Figure III. 11: Dimensions des éprouvettes..... | 37 |
| Figure III. 12: Variantes du bois..... | 37 |
| Figure III. 13: Compateur MITUTOYO..... | 38 |
| Figure III. 14: Dispositif expérimental..... | 39 |
| Figure III. 15: Modèle rhéologique viscoélastique..... | 40 |
| | |
| Figure IV. 1: Déplacement-temps 3Kg..... | 44 |
| Figure IV. 2: Déplacement-temps 5Kg..... | 44 |
| Figure IV. 3: Déplacement-temps de l'essai normalisé en 3Kg..... | 45 |
| Figure IV. 4: Charges..... | 46 |
| Figure IV. 5: l'essai normalisé..... | 48 |
| Figure IV. 6: l'essai selon les travaux de la référence [32]..... | 49 |
| Figure IV. 7: Courbe du fluage à partir de l'essai normalisé en 3Kg..... | 50 |
| Figure IV. 8: Courbe du fluage à partir des autres essais en 3Kg..... | 51 |
| Figure IV. 9: Courbe du fluage à partir des autres essais en 5Kg..... | 52 |
| Figure IV. 10: Etape 01 wood_fitness..... | 53 |
| Figure IV. 11: Etape 02 wood_contraint..... | 53 |
| Figure IV. 12: Etape 03 wood_solve..... | 53 |
| Figure IV. 13: Etape 04 Run wood_solve..... | 53 |
| Figure IV. 14: Courbe de fluage de bois d'olivier humide Test-Modèle en 3Kg..... | 54 |
| Figure IV. 15: Courbe de fluage de bois d'olivier sec Test-Modèle en 3Kg..... | 54 |
| Figure IV. 16: Courbe de fluage de bois de hêtre Test-Modèle en 3Kg..... | 55 |

| | |
|--|----|
| Figure IV. 17: Courbe de fluage de bois d'olivier humide Test-Modèle en 5Kg..... | 55 |
| Figure IV. 18: Courbe de fluage de bois d'olivier sec Test-Modèle en 5Kg..... | 56 |
| Figure IV. 19: Courbe de fluage de bois de hêtre Test-Modèle en 5Kg..... | 56 |
| Figure IV. 20 : Courbe de fluage de bois de bois d'olivier sec à partir d'un essai normalisé Test-Modèle en 3Kg..... | 57 |

Introduction Générale

○ Contexte de l'étude :

À la lumière des développements actuels, le besoin du secteur industriel et mécanique pour de nombreux matériaux augmente au fur et à mesure. Dans ce contexte, les matériaux naturels, ou bien les éco-matériaux, sont devenus un concurrent important des matériaux contemporains, et cela devrait ouvrir de nouvelles perspectives pour ces matériaux et les positionner de manière objective dans le domaine de construction. Les polymères naturels, comme le bois et le liège, sont des matériaux nobles, disponibles en abondance, écologiques, récupérables et renouvelables.

Le bois est un matériau naturel constitué d'une matière ligneuse élaborée par un organisme vivant au milieu d'un écosystème. Il se compose de : l'écorce qui est une couche protectrice constituée de cellules mortes ; le liber, couche spongieuse qui permet la conduction de la sève et le cambium, couche mince qui représente la partie vivante de l'arbre. En effet, le cambium est un organe de croissance qui forme le liber vers l'extérieur et les cellules du bois vers l'intérieur. C'est un tissu végétal rigide, composé de cellules aux parois ligno-cellulosiques particulièrement performantes d'un point de vue mécanique. Les qualités de bois varient en fonction de l'ensoleillement, la nature du terrain, l'altitude, la température ambiante et la pollution. Sa découverte et son utilisation dans le domaine industriel ont accompagné un énorme développement.

○ Problématique

En effet, le bois étant un polymère naturel, il montre un comportement viscoélastique à température ambiante. La connaissance de ce comportement est une condition essentielle pour une utilisation efficace de ce matériau. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce projet de mémoire de fin d'études dont l'objectif principal est l'étude du fluage en flexion du matériau de bois. Ainsi, pour mener à terme ce travail, il faudrait :

- Identifier le matériau bois et le phénomène du fluage en flexion qui s'y applique ;
- Concevoir et réaliser une machine du fluage pour conduire les essais correspondants ;
- Proposer un modèle rhéologique pour simuler le comportement du bois en fluage.

Afin de mener à bien ce sujet, nous avons commencé tout d'abord par un diagnostic de l'existant, soit la situation actuelle dans laquelle la problématique de notre projet est localisée. Cette situation permet de déceler les pistes de progrès afin de tracer la situation souhaitée par le biais de certains objectifs bien déterminés.

La situation actuelle se résume en l'absence des propriétés mécaniques de certaines espèces de bois ; le manque de modèles du fluage viscoélastique en flexion de plusieurs espèces de bois et, localement, l'indisponibilité d'une machine d'essais de fluage. Ainsi, le présent travail vise principalement l'identification des propriétés mécaniques de certaines espèces de bois à travers la proposition d'un modèle pertinent pour représenter leur comportement viscoélastique tout en passant à l'avance par une étape de réalisation d'une machine d'essai de fluage.

○ **Organisation du mémoire**

Pour expliciter la démarche suivie dans la réalisation de notre projet de recherche, nous avons choisi de scinder ce mémoire en quatre chapitres qui viennent après une introduction générale du sujet.

- **Le chapitre I :** est une revue de littérature qui permet de présenter des généralités sur le matériau bois. Le matériau est défini, sa structure, sa composition chimique et ses propriétés physiques et mécaniques sont passées en revue.
- **Le chapitre II :** s'intéresse au phénomène du fluage. Le phénomène est identifié, sa cinétique est illustrée par des courbes et les essais qui le mettent en évidence sont décrits.
- **Le chapitre III :** fait l'objet d'une étude expérimentale et de modélisation. Il expose dans une première partie la conception sous logiciel SOLIDWORKS et la réalisation d'une machine du fluage. Ensuite il présente le dispositif expérimental. Enfin le modèle rhéologique pris en compte est proposé et la méthode d'identification des paramètres est explicitée.
- **Le chapitre IV :** vise principalement la validation des résultats. Ainsi suite aux résultats obtenus, une analyse et des interprétations de ces résultats sont faites et des comparaisons test-modèle sont établies.

Le document s'achève par une conclusion générale et dresse quelques perspectives.

Chapitre I :

« Revue de littérature »

Dans le chapitre I, nous donnerons des généralités sur le matériau bois et ses caractéristiques.

1 .1. Historique

Plus que tout autre, le matériau bois évoque le temps et l'âge : le temps parce que sa production est assurée par la croissance des arbres qui deviennent récoltables après une période assez longue, variable selon l'espèce et la station ; l'âge, parce qu'il est, dans l'histoire, celui qui est utilisé par l'homme depuis le plus longtemps. C'est sans doute parce que la dépense d'énergie nécessaire à sa transformation est particulièrement faible, en comparaison avec l'élaboration des métaux ou l'exploitation des minéraux, que l'homme a mis en œuvre très tôt, que ce soit pour se défendre, pour chasser ou s'abriter. C'est également parce que, dès l'origine des temps, la forêt a joué son rôle de "forêt-abri" et de "forêt nourricière"[1]. C'est donc l'histoire d'une rencontre entre l'homme et la forêt qui initia, depuis l'aube de l'humanité, une "filière-bois" qui s'organisa immédiatement autour de trois axes principaux : biens d'équipement et construction (armes, outils, huttes...); agro-alimentaire (cueillette, baies, champignons...) ; énergie (le feu, ...).

L'usage du bois a été longtemps lié à l'arbre. L'homme a observé et compris tout le parti qu'il pouvait tirer de cette architecture particulière et exceptionnelle. La nature a pourvu l'arbre d'un fût rond. À cet égard, l'inventeur de la précontrainte ne fut sans doute pas Eugène Freyssinet [2], mais bien l'arbre qui, à travers son organisation structurelle, apporte un éclairage intéressant sur l'équilibre des contraintes sans lequel il ne pourrait s'élever. Parfois l'homme força la nature pour mieux en tirer profit, avec à l'origine une complicité certaine : la disposition naturelle des branches, des racines était utilisée pour concevoir immédiatement un siège, un élément de charpente, une fourche à fourrage, etc.

Puis l'homme et son insatisfaction permanente, source de créativité, a inventé le bois rectangulaire ; l'industrie du sciage était née. Cette dernière n'a cessé de se développer et de s'adapter aux produits générés par la forêt d'une part, aux attentes des prescripteurs d'autre part. Les besoins en sections, longueurs, surfaces n'ont cessé de croître et ont conduit aux techniques de reconstitution bien maîtrisées aujourd'hui : lamellé-collé, contreplaqués, etc.

Si l'âge du bronze, l'âge du fer sont à ce jour dépassés, l'âge du bois est une telle évidence d'actualité que les experts s'efforcent de l'ignorer. Depuis l'origine, les arbres et le bois représentent l'un des succès majeurs de l'évolution des espèces [3]. Ils nous sont devenus si familiers que nous ne réalisons plus à quel point il y a là un matériau ultra perfectionné, à la structure ingénieuse et optimisée : un matériau composite naturel et renouvelable, vraie réponse à l'ensemble des problèmes des sociétés et civilisations qui nous ont précédés et vraie réponse aux problématiques du siècle qui s'avance. Matériau de toujours, dans ce contexte, la qualification la plus pertinente que l'on puisse donner au bois [1].

1 .2. Le matériau bois

Le bois est la matière ligneuse et compacte qui compose les branches, le tronc et les racines des arbres et des arbrisseaux. L'ensoleillement, la nature du terrain, l'altitude, la température ambiante et la pollution atmosphérique sont parmi les facteurs qui interviennent directement sur la croissance des arbres. Le bois (**Figure I.1**) est un ensemble de tissus composé de fibres ligneuses, de parenchymes et de vaisseaux [4].

C'est une matière ligneuse produite par un organisme vivant au milieu d'un écosystème. En effet, l'origine végétale du bois explique ses propriétés particulières, mais aussi sa richesse et sa variété, en tant que matériau de choix pour différentes applications.



Figure I.1 : Matériau bois.

1 .3. Structure du bois

Un tronc d'arbre doit remplir deux fonctions : véhiculer la sève des racines aux feuilles pour la sève brute (eau) et des feuilles aux racines pour la sève nourricière ; supporter les charges mécaniques (poids propres de l'arbre, de ses feuilles et de ses fruits, charges de neige et devient). Ces deux fonctions sont assurées par une structure (**Figure I.2**) composée de l'extérieur à l'intérieur par les éléments suivants :

- **L'écorce** qui joue le rôle de protection vis à vis de l'extérieur,
- **Le liber** qui sert au transport de la sève nourricière,
- **Le cambium** qui est la couche de croissance formée par division tangentielle au printemps,
- **L'aubier** qui sert au transport de la sève brute,
- **Le bois de cœur ou duramen**, inactif et qui se durcit au cours du temps. C'est cette partie de l'arbre qui sera utilisée comme bois de construction [5].

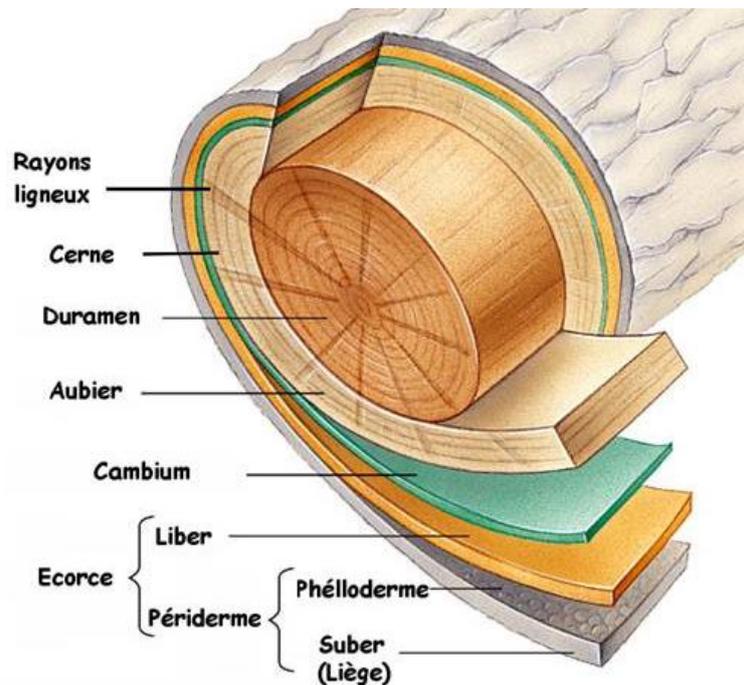


Figure I.2 : Anatomie et structure du bois « Éléments composants le tronc ».

En terme de mécanique, la fonction de soutien (de résistance mécanique) est la plus importante. Elle est réalisée par les cellules suivantes (**Figure I.3**) :

- Les trachéides longitudinales du bois final, aussi appelé bois d'été, dans le cas des résineux,
- Des éléments longitudinaux de type « fibre »: fibres libriformes- simpliciponctuées et/ou fibres-trachéides et/ou trachéides et les vaisseaux pour les feuillus.

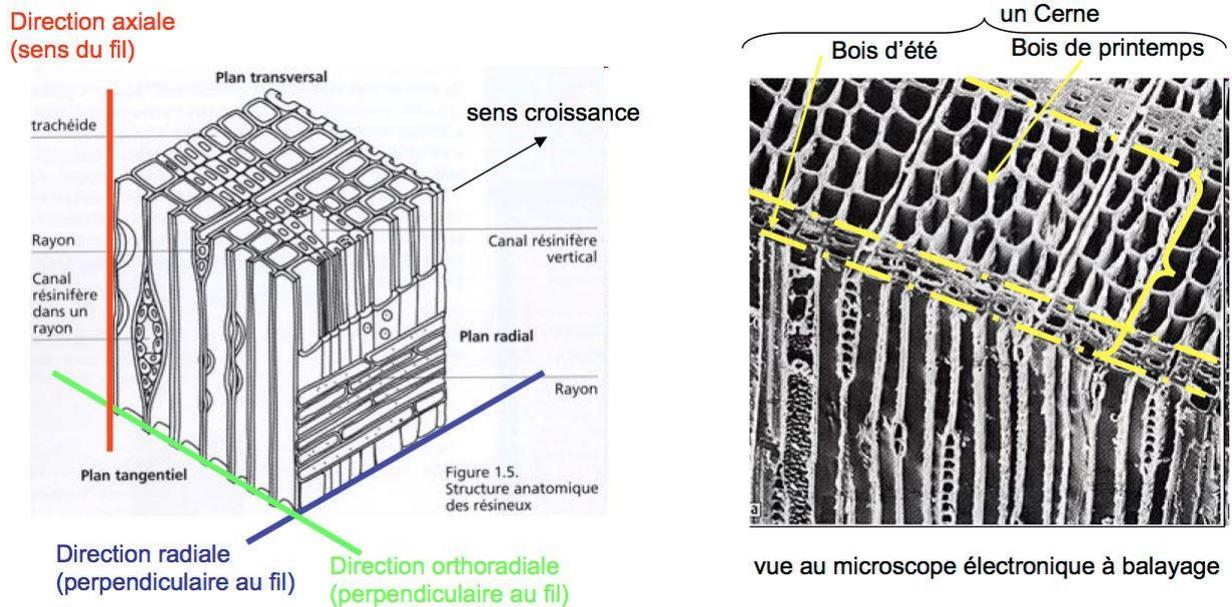


Figure I.3: Vue schématique de la structure d'un résineux et des directions privilégiés (gauche) et vue au microscope électronique à balayage de l'agencement des cellules (droite)[3].

Le tableau I.1 regroupe les caractéristiques dimensionnelles des cellules assurant la fonction de soutien dans le cas des résineux et dans le cas des feuillus.

Tableau I. 1: Caractéristiques dimensionnelles des cellules assurant le soutien de l'arbre

| Caractéristiques dimensionnelles des cellules | Résineux (trachéides) | Feuillus (fibres) |
|---|-----------------------|-------------------|
| Volume (%) | ≈90 | 50 à 60 |
| Longueur (mm) | 1 à 8 | 2.5 maxi |
| Epaisseur e (µm) | 25 à 75 | 20 à 40 |

| | | |
|---|--------------|----------------|
| Epaisseur paroi (μm) | 2 à 7 | 1 à 1.1 |
|---|--------------|----------------|

1.4. Composition chimique du bois :

La composition chimique élémentaire du bois varie suivant les espèces, mais les constituants chimiques des cellules sont principalement de la cellulose, des hémicelluloses et de la lignine. Et d'un faible pourcentage (de 1 à 1,5 %) d'éléments minéraux :

- Cellulose (environ 50 %) ;
- Lignine (20 à 30 %) ;
- Hémicellulose (15 à 25 %) ;
- Autres substances organiques : polysaccharides, pentosanes, hexosanes, résines, tannins, colorants, cires, alcaloïdes, composés aromatiques volatiles, etc.[6].

En chimie le bois est constitué d'environ 50 % de carbone, 42 % d'oxygène, 6 % d'hydrogène, 1 % d'azote et 1 % de minéraux (principalement Ca, K, Na, Mg, Fe, Mn). On trouve également du soufre, du chlore, du silicium, du phosphore, et d'autres éléments en faible quantité [7]. Un tronc d'arbre est composé de l'assemblage de plusieurs types de cellules, toutes de faibles dimensions (\approx mm). Chacune de ces cellules constitue la brique élémentaire qui compose le matériau bois.

1.5. Corrélation entre les propriétés et les comportements du bois

De ce qui précède, la modélisation du comportement mécanique du bois nécessite de connaître de nombreux paramètres liés au matériau. On en cite principalement, la sensibilité au temps, à la température et à l'humidité ; l'anisotropie et l'hétérogénéité à plusieurs échelles. A cette complication s'ajoute la grande disparité des propriétés d'un arbre à l'autre au sein d'une même espèce. Pour ne pas avoir à réaliser une batterie d'essais préalablement à toute simulation, de nombreuses études visent à trouver des liens entre les propriétés simples à mesurer et celles ne s'obtenant que par des essais destructifs [8].

1.5.1. Propriétés mécaniques du bois

Les propriétés mécaniques du bois caractérisent la rigidité et la résistance du bois face aux forces qui tendent à le déformer. En effet, le bois est un solide déformable qui réagit à l'application des charges en se déformant sous leurs effets.

1.5.1.1. Élasticité :

L'élasticité est la propriété qu'ont certains matériaux de reprendre leur forme ou leurs dimensions initiales lorsque la charge causant la déformation est enlevée. Ceci a lieu lorsqu'on est en dessous de la limite élastique. Cette limite étant dépassée, une partie de la déformation sera permanente, même après enlèvement de la charge. La limite élastique est un paramètre indispensable pour distinguer le comportement élastique du comportement plastique. La courbe contrainte déformation en traction simple (**Figure I.4**) permet d'illustrer le phénomène. Le module d'élasticité E ou module de Young représente la pente de la ligne élastique [9].

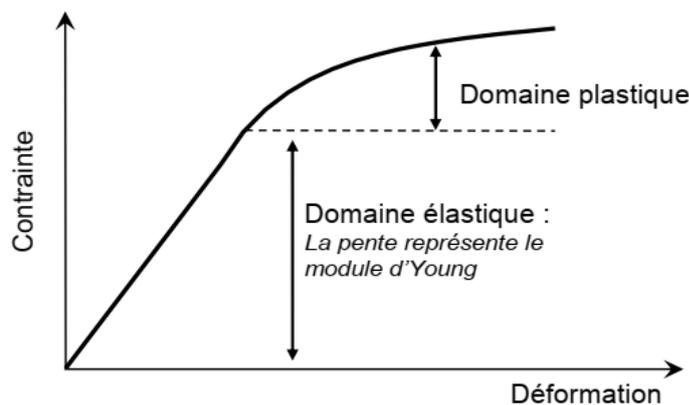


Figure I.4 : Courbe contrainte déformation du matériau bois.

La loi de Hooke est une relation linéaire reliant la déformation à la contrainte pour la modélisation du comportement d'un solide élastique parfait. Étant donné l'anisotropie du bois, la loi de Hooke généralisée (Equation. 1.1) est couramment utilisée, faisant apparaître un tenseur d'ordre 3, appelé tenseur des complaisances élastiques.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{RL} \\ \gamma_{RT} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_R & -\nu_{RT}/E_T & -\nu_{RL}/E_L & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{TR}/E_R & 1/E_T & -\nu_{TL}/E_L & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LR}/E_R & -\nu_{LT}/E_T & 1/E_L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{TL} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{RL} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{RT} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_L \\ \tau_{TL} \\ \tau_{RL} \\ \tau_{RT} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Où :

$\varepsilon_R, \varepsilon_T, \varepsilon_L$: les déformations axiales suivant les directions R, T et L

$\sigma_R, \sigma_T, \sigma_L$: les contraintes normales suivant les directions R, T et L

$\gamma_{TL}, \gamma_{RL}, \gamma_{RT}$: les déformations angulaires par rapport à R, T et L

$\tau_{TL}, \tau_{RL}, \tau_{RT}$: les contraintes de cisaillement dans les plans TL, RL ou RT

E est le module de Young ; G est le module de cisaillement.

T ; R ; L représentent respectivement les directions tangentielle, radiale et longitudinale.

Les valeurs des propriétés mécaniques impliquées dans l'équation (1.1) pour les bois résineux et les bois feuillus séchés au voisinage de l'humidité de 12% et à l'état vert sont fournies dans différentes références [10].

Les propriétés élastiques du bois sont sensibles à la variation de son état physique. Parmi les influences physiques, les paramètres principaux sont la densité, la teneur en humidité et la température. Lors du séchage du bois, l'influence de la température et de la teneur en humidité sur le comportement mécanique du bois est très marquée. La complexité du comportement du bois est multipliée par les variations de ses propriétés mécaniques avec la température et la teneur en humidité et l'interaction entre elles. Beaucoup de travaux ont été effectués sur cet aspect [11].

1.5.1.2. Influence de la densité :

L'influence de la densité sur les propriétés mécaniques du bois a été observée depuis longtemps. Ylinen [12] et Bodig et Jayne [10] ont mis en évidence que les modules de Young, les coefficients de Poisson et les coefficients de Coulomb sont fortement dépendants de la densité du bois. Bodig et Jayne [10] relient les propriétés mécaniques impliquées dans l'équation (1.1) à la densité du bois par la formule suivante :

$$Y = aD^b \dots\dots\dots (1.2)$$

Où Y sont les propriétés élastiques, D est la densité du bois, a et b sont des constantes données dans des tables pour chaque espèce de bois.

Des études sur l'effet de la densité sur la limite d'élasticité ont été effectuées par Ylinen [12] et il a été observé que la limite d'élasticité augmente proportionnellement avec la densité et que la relation entre ces deux paramètres peut être représentée par une fonction linéaire.

1.5.1.3. Effet de la température et de la teneur en humidité :

La résistance du bois est affectée par la teneur en humidité au-dessous du PSF (le point de saturation des fibres) et la température. La température est un paramètre physique très important qui conditionne le comportement mécanique du bois. Thunell [11] a publié une courbe montrant la diminution du module d'élasticité en fonction de l'augmentation de la température entre -20°C et 50°C . L'étude la plus détaillée de cette période est celle de Sulzberger [13]. Les résultats obtenus montrent que de façon générale, les modules E de plusieurs espèces diminuent lorsque la température augmente (**Figure I.5**). L'auteur a proposé une représentation de la relation entre la température et le module d'élasticité par :

$$E_2 = E_1 [1 - \alpha (T_2 - T_1)] \dots\dots\dots (1.3)$$

Où E_1 et E_2 sont les modules correspondant aux températures T_1 et T_2 et α le coefficient de dilatation thermique.

Hearmon [10] a remarqué qu'il était juste de présumer un lien linéaire entre le module d'élasticité et la différence de température tel que présenté à l'équation (1.3). Sano [14] a

observé la même tendance suite à des essais expérimentaux sur différentes espèces de bois et a utilisé l'équation (1.3) pour toutes les composantes de la matrice de complaisance. La même tendance a été rapportée par Gerhards [15] qui a réalisé une synthèse des différentes études sur l'effet de la température et de la teneur en humidité sur les propriétés élastiques de différentes espèces.

Au cours du séchage la variable la plus importante est la teneur en humidité, particulièrement pour les valeurs comprises entre l'état anhydre et le point de saturation des fibres (PSF) puisqu'elle a un effet important sur les caractéristiques élastiques ainsi que la limite d'élasticité du bois.

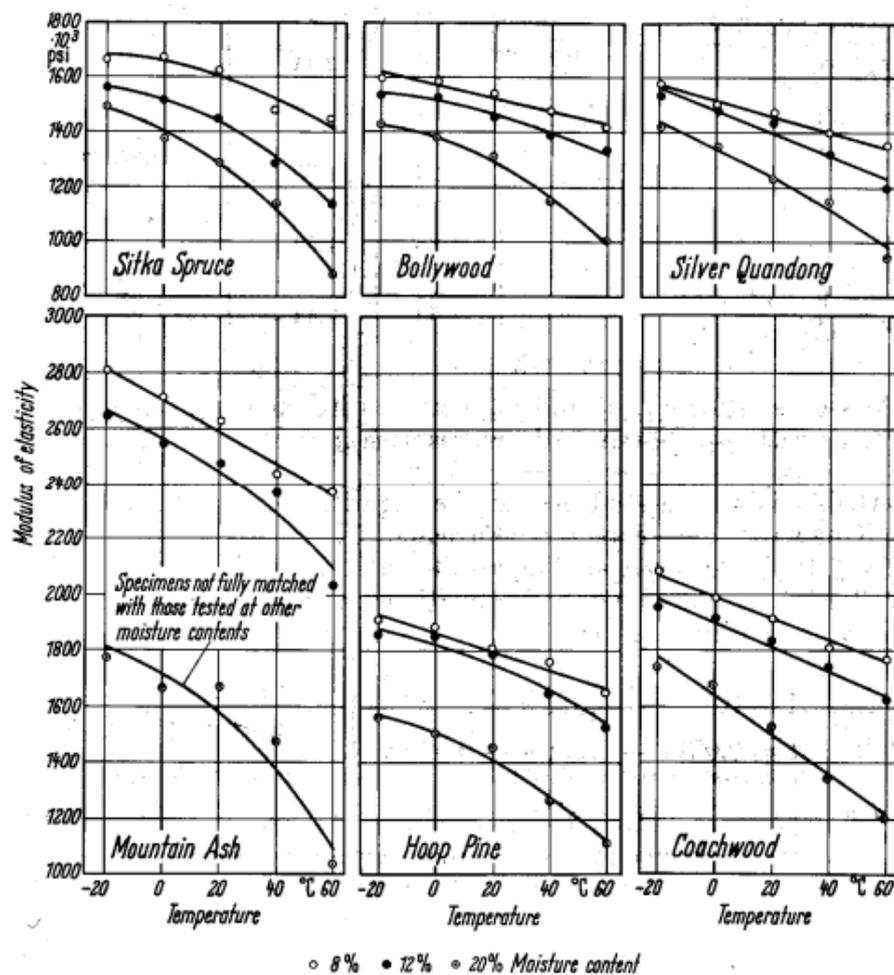


Figure I.5 : Effet de la température sur les modules d'élasticité pour différentes espèces (d'après Sulzberger) [13].

Par exemple, le module d'élasticité à la teneur en humidité de 25% peut être deux fois plus faible qu'à 12% H. La (Figure I.6) illustre l'allure générale de l'effet de la teneur en humidité sur le module élastique en direction tangentielle de différentes espèces.

Dans le cas unidimensionnel, Takemura [16] et Kawai [17] ont étudié l'effet de la teneur en humidité sur les propriétés mécaniques du bois. Ils ont exprimé le module d'Young sous forme d'une fonction linéaire de la teneur en humidité comme suit.

$$E = E_0 - cH \text{ avec } H < H_{psf} \dots \dots \dots (1.4)$$

Où E_0 le module d'élasticité du bois à l'état anhydre; H est la teneur en humidité et c une constante.

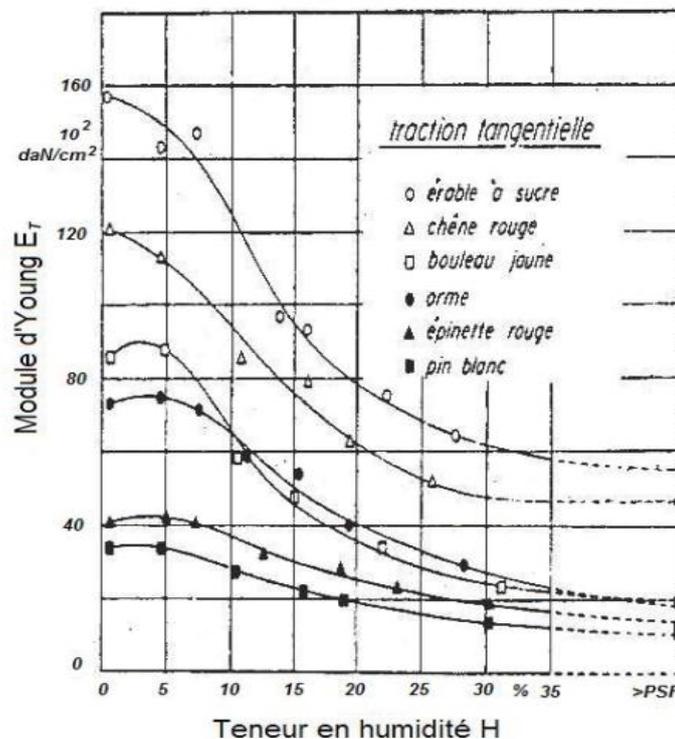


Figure I.6 : Évolution du module d'Young en fonction de la teneur en humidité. (Goulet et Ouellet) [18].

En plus d'affecter les modules élastiques, la teneur en humidité affecte fortement la limite d'élasticité et la contrainte de rupture. La teneur en humidité est le paramètre le plus critique affectant la limite d'élasticité. Les travaux faits par Schlyter et Winberg [19] ont permis d'observer une diminution linéaire de la limite d'élasticité de 10% jusqu'au PSF. Les

auteurs ont montré que 1% d'augmentation de la teneur en humidité résulte en une diminution de 3% de la limite d'élasticité dans la direction longitudinale.

Parallèlement à la mesure expérimentale des effets de la température et de la teneur en humidité sur le comportement mécanique du bois, certains chercheurs ont aussi tenté de déterminer une expression explicite. Lessard [20] a proposé une formule pour prédire le module et également la limite d'élasticité du bois de la forme suivante:

$$Y = a_0 + a_1T + a_2H + a_3H^2 + a_4TH + a_5TH^2 \dots\dots\dots (1.5)$$

Où a_i ($i = 0, \dots, 5$) sont des coefficients définis au moyen de la régression multiple à partir de résultats expérimentaux, T est la température et H la teneur en humidité.

1.5.2. Comportement mécanique du bois :

Il est temps d'introduire le terme fluage qui désigne toute déformation du matériau bois évoluant avec le temps lorsque ce dernier est soumis à une contrainte constante ou variable dans le temps. Une éprouvette de bois à température et hygrométrie constantes, soumise pendant un certain temps à une contrainte constante, puis libérée de cette contrainte présente une déformation qui évolue en fonction du temps selon la **Figure 1.7**. À noter que si au cours du temps, la déformation permanente s'annule, alors il n'y a pas eu de déformation plastique au cours du chargement.

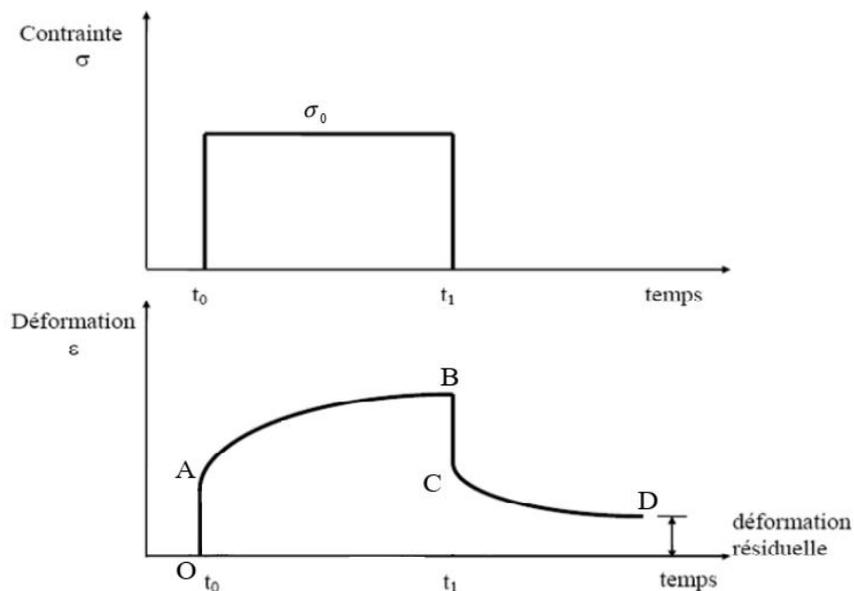


Figure I.7 : Évolution de la déformation d'une éprouvette de bois soumise à une contrainte constante : OA : déformation élastique; AB : déformation viscoélastique; BC : retour élastique et CD : recouvrance différée [21].

Les modèles de comportement mécanique du bois prennent en compte les déformations élastiques ε_e , viscoélastique ε_v , plastique ε_p et mécanosorptive ε_{ms} . Ainsi, la déformation mécanique $\varepsilon_{méc}$ peut être exprimée comme suit:

$$\varepsilon_{méc} = \varepsilon_e + \varepsilon_v + \varepsilon_p + \varepsilon_{ms} \dots \dots \dots (1.6)$$

Pour modéliser les différents comportements mécaniques élémentaires du bois cités précédemment, on fait généralement appel à des modèles rhéologiques qui sont établis en utilisant des éléments de base constitués de ressorts, caractérisant l'élasticité, et d'amortisseurs, caractérisant la viscosité du bois. La simulation basée sur un modèle rhéologique donné réside dans la formulation mathématique de la loi de comportement adoptée.

Les modèles fondamentaux utilisés sont : les modèles élastique, élasto-plastique, viscoélastique, élasto-viscoplastique et dans le cas du séchage, le modèle mécanosorptif. Nous allons nous intéresser dans ce travail aux modèles viscoélastiques dans le cas du fluage à température ambiante.

1.5.2.1. Modèle élastique :

Il est plus facile d'utiliser le modèle élastique dont tous les paramètres nécessaires sont relativement bien connus. D'ailleurs, ce type de comportement a été le plus fréquemment utilisé pour tous les matériaux en général. Cependant ce modèle présente l'inconvénient de ne traduire qu'une déformation élastique instantanée. Il établit donc une relation linéaire entre la contrainte et la déformation instantanée.

1.5.2.2. Modèle viscoélastique :

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

Haque et al. [22] a comparé la pertinence de ces différents modèles en plus d'un modèle empirique basé sur l'équation de Bailer–Norton et conclu que le modèle de Kelvin semble le mieux adapté pour interpoler les courbes expérimentales. Cependant, la différence entre le modèle de Burger et celui de Kelvin ne semble pas être très significative, mais sa conclusion se base sur le fait que le fluage atteint un certain plateau donc totalement recouvrable après décharge.

Plusieurs auteurs adoptent le modèle de Kelvin, ou plus précisément l'association en série de n -éléments de Kelvin la **Figure I.8**, pour reconstituer le comportement viscoélastique du matériau bois au cours d'un essai de fluage [23]. Toutefois, les problèmes d'identification deviennent rapidement insolubles puisqu'il faut déterminer au moins autant de coefficients que d'éléments introduits, ce qui peut être irréalisable en pratique surtout que ces paramètres sont fortement dépendants de la teneur en humidité et de la température.

Un nouveau concept a été proposé par Zhuoping [24], se basant sur le fait que les modèles rhéologiques classiques sont habituellement adaptés pour une charge donnée; l'auteur propose un modèle rhéologique à paramètres variables utilisant uniquement un élément de Maxwell. Étant donné que le modèle de Maxwell est constitué d'un ressort et d'un amortisseur en série, l'auteur propose de déterminer les paramètres des deux composantes en fonction du temps et de la charge appliquée en divisant la courbe de fluage en plusieurs petites sections correspondant à des petits intervalles de temps, identifiant ainsi les deux paramètres de Maxwell à ces différents intervalles de temps par la technique de régression et pour différentes charges appliquées.

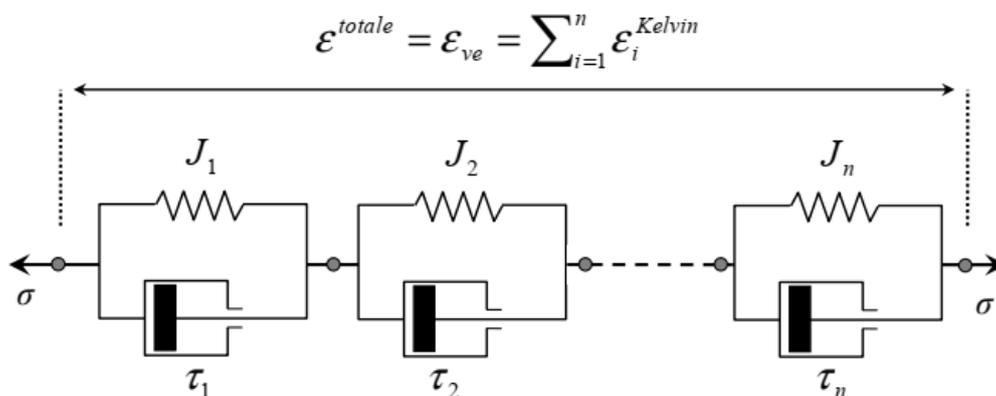


Figure I.8: Représentation rhéologique du fluage viscoélastique par n -éléments de Kelvin associés en série

Chapitre II :
*«Etude du phénomène de
fluage»*

Ce chapitre expose une explication de phénomène « le fluage en flexion » et les différents machines utilisés pour faire des essais et de connaître le fonctionnement de ce genre d'expérience.

2.1. Définition

L'expérience isotherme de fluage appelée encore expérience de retard, sous sollicitation uni-axiale, permet de mettre en évidence et d'identifier le comportement différé des matériaux viscoélastiques. Pour réaliser cette expérience, on impose à un corps de forme convenable (éprouvette de traction par exemple) une sollicitation uni-axiale en contrainte, réputée homogène. Dans le cas de l'expérience de fluage en traction simple d'une éprouvette de polymère en restant dans le cadre des petites déformations, et en maintenant la température constante.

- L'éprouvette n'est initialement pas chargée ; elle est en équilibre et son matériau constitutif est alors dans son état naturel (état de contrainte nul en tout point).
- A l'instant t_0 on impose « instantanément » un échelon de contrainte d'amplitude σ_0 .
- Cette contrainte est ensuite maintenue constante (**Figure II.1.A**).

On observe la réponse uni-axiale correspondante, c'est-à-dire l'évolution dans le temps, ou l'histoire de la déformation longitudinale ε supposée homogène dans l'éprouvette, comptée à partir de l'état naturel pris comme référence géométrique (**Figure II.1.B**) [6].

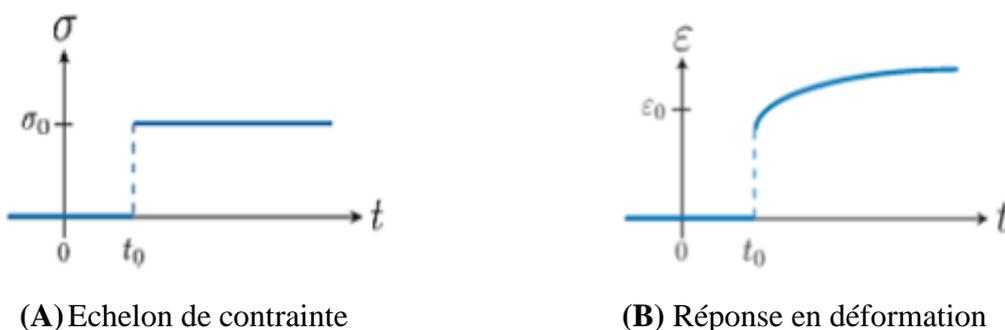


Figure II. 1 : Essai uni-axiale de fluage.

2.1.1. Diagramme typique de fluage

Typiquement, le fluage des matériaux présente trois phases : le fluage primaire ; le fluage secondaire et le fluage tertiaire. La **Figure II.2** présente une courbe typique d'essai de fluage en termes de la déformation et de sa vitesse [25].

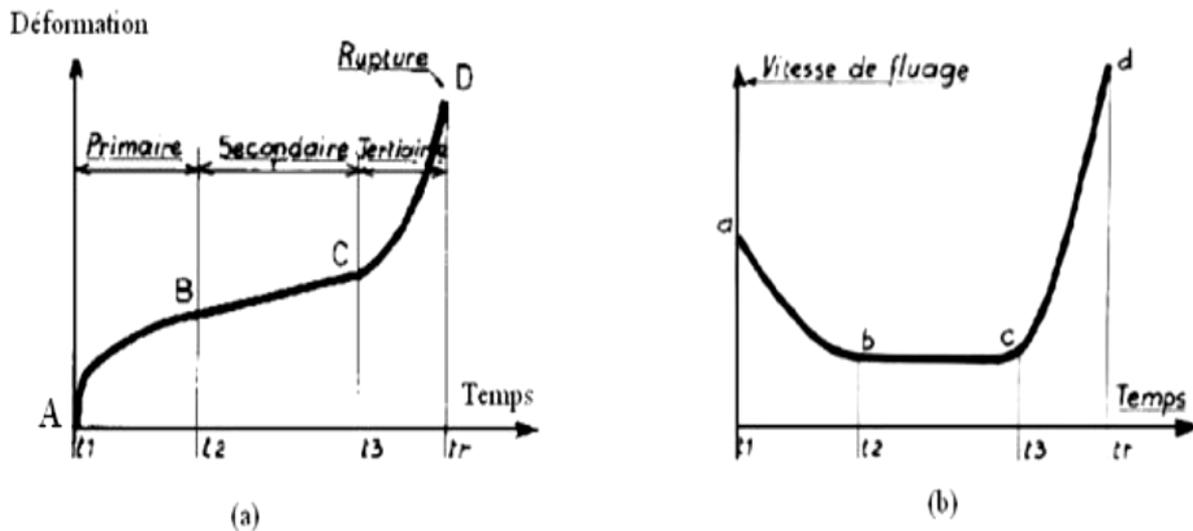


Figure II. 2 : Allure générale d'une courbe de fluage,(a) Evolution de la déformation et (b) la vitesse de déformation en fonction du temps.

2.1.2. Différents stades de fluage

On distingue généralement trois stades d'évolution de la déformation (**Figure II.2**) :

- **Le stade primaire, ou transitoire (AB)** : pendant lequel la vitesse de déformation diminue avec le temps, ce qui traduit une augmentation de la résistance du matériau.
- **Le stade secondaire, ou stationnaire (BC)** : pendant lequel la vitesse de déformation se stabilise.
- **Le stade tertiaire (CD)** : où la vitesse de déformation augmente jusqu'à rupture de l'éprouvette.

2.2. Mécanismes physiques de fluage

Depuis une cinquantaine d'années, de nombreux travaux ont été réalisés pour comprendre le mécanisme et l'origine du couplage existant entre les contraintes mécaniques et le processus de sorption dans le bois. Les observations macroscopiques de la mécano-sorption du bois ont été abondamment décrites dans la littérature. Cependant, l'explication de ce phénomène au niveau microscopique, sa modélisation et son interaction avec le fluage viscoélastique, restent des problèmes d'actualité pour la communauté scientifique [25].

2.3. Modélisation du fluage

2.3.1. Modèles rhéologiques de base

Les instruments les plus classiques de la modélisation rhéologique sont constitués par un ressort qui modélise un solide élastique parfait et un amortisseur celui d'un fluide visqueux newtonien. Le comportement viscoélastique linéaire est représenté en général par la construction d'un modèle constitué d'un assemblage de ressorts et d'amortisseurs. Il s'agit donc d'un modèle symbolique et analogue. Le matériau viscoélastique sera représenté par une association de ressorts et d'amortisseurs en série et en parallèle plus ou moins complexe. L'équation rhéologique du matériau est obtenue en utilisant les équations rhéologiques des constituants élémentaires (ressort et amortisseur) et en respectant aussi les lois d'association en série et en parallèle des différents éléments. La **Figure II.3** montre ces éléments de base et leurs équations rhéologiques respectives

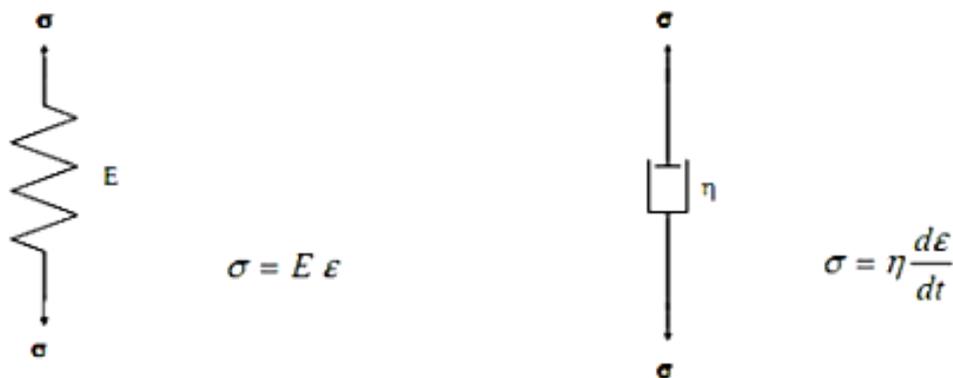


Figure II. 3 : Représentation rhéologique d'un solide élastique et d'un liquide newtonien.

2.3.2. Modèles analogiques

2.3.2.1. Modèle de Kelvin-Voigt

Ce modèle résulte de l'association en parallèle d'un ressort de module d'élasticité E_0 et d'un amortisseur de coefficient de viscosité η . Il est particulièrement bien adapté pour représenter le comportement d'un solide.

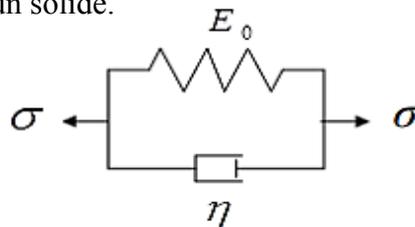


Figure II. 4 : Modèle de Kelvin-Voigt

Soient ε_r et ε_a les déformations, σ_r et σ_a les contraintes, respectivement dans le ressort et dans l'amortisseur. On a :

$$\begin{cases} \sigma_r = E_0 \varepsilon_r \\ \sigma_a = \eta \frac{d\varepsilon_a}{dt} \end{cases} \dots\dots\dots (2.1)$$

D'après les lois d'association en parallèle, la déformation et la contrainte totales s'écrivent :

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_r = \varepsilon_a \\ \sigma = \sigma_r + \sigma_a \end{cases} \dots\dots\dots (2.2)$$

L'équation rhéologique s'écrit donc :

$$\sigma = E_0 \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \dots\dots\dots (2.3)$$

En résolvant l'équation différentielle (2.4), on obtient l'expression de la fonction de fluage de Kelvin-Voigt :

$$J(t) = \frac{1}{E_0} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \dots\dots\dots (2.4)$$

Avec $\tau = \frac{\eta}{E_0}$, possédant les dimensions d'un temps et qui est appelé temps de retard.

Nous avons illustré le tracé de cette fonction sur la **Figure II.5**.

La relaxation est impossible avec ce modèle, car il ne peut pas subir une déformation instantanée qui conduirait à une contrainte infinie.

En appliquant la transformée de Carson sur l'équation (2.3), nous obtenons le module complexe de ce modèle dans le domaine fréquentiel :

$$E^*(\omega) = E_0 + i\eta\omega \dots \dots \dots (2.5)$$

Lorsqu'on analyse ce module complexe de Kelvin-Voigt, on trouve qu'il est trop simple pour pouvoir représenter le comportement expérimental, car la partie réelle du module complexe est une constante qui ne dépend pas de la fréquence et que la partie imaginaire croît linéairement avec celle-ci.

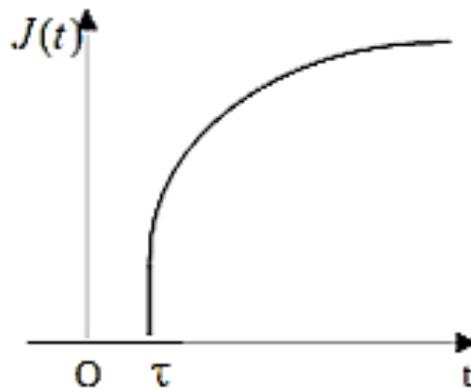


Figure II. 5 : Réponse de fluage de Kelvin-Voigt.

2.3.2.2. Modèle de Maxwell

Il est constitué d'un ressort et d'un amortisseur montés en série représentant la réponse viscoélastique d'un matériau à une sollicitation mécanique. Cette représentation est plutôt réservée aux fluides.

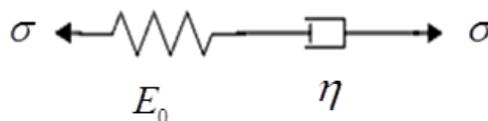


Figure II. 6 : Modèle de Maxwell

Chapitre II Etude du phénomène de fluage

En raisonnant de la même manière que précédemment, les lois d'association en série de la déformation et la contrainte totales s'écrivent :

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_a \\ \sigma = \sigma_r = \sigma_a \end{cases} \dots\dots\dots (2.6)$$

La dérivée de la déformation totale de l'équation (2.6) donne :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_r}{dt} = \frac{d\varepsilon_a}{dt} \dots\dots\dots (2.7)$$

En combinant (2.1) et (2.7), nous obtenons l'équation rhéologique de modèle de Maxwell :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E_0} \frac{\sigma_a}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma \dots\dots\dots (2.8)$$

Après intégration de l'équation (2.8), on trouve les expressions de la fonction de fluage et celle de relaxation :

$$\begin{cases} J(t) = \frac{1}{E_0} + \frac{t}{\eta} \\ R(t) = E_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \end{cases} \dots\dots\dots (2.9)$$

Avec $\tau = \eta/E_0$ qui est le temps de retard de notre fonction de relaxation.

Les réponses de ces deux fonctions sont représentées sur la (**Figure II.7**).

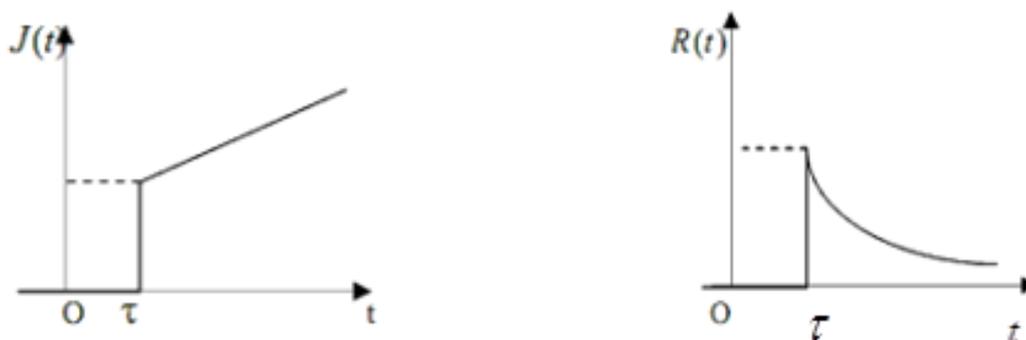


Figure II. 7 : Réponses en fluage et en relaxation du modèle de Maxwell.

Le module complexe de ce modèle de Maxwell s'obtient en appliquant la transformée de Laplace-Carson sur l'équation différentielle (2.8) :

$$\frac{1}{E(\omega)} = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{i\eta\omega} \dots\dots\dots (2.10)$$

Que l'on peut écrire encore en posant $\tau = \frac{\eta}{E_0}$:

$$E(\omega) = E_0 + \frac{i\eta\omega}{1+i\eta\omega} \dots\dots\dots (2.11)$$

Si nous séparons la partie réelle et la partie imaginaire de ce module complexe de Maxwell, nous obtenons :

$$E(\omega) = \frac{E_0(\omega\tau)^2}{1+(\omega\tau)^2} + i \frac{\eta\omega}{1+(\omega\tau)^2} \dots\dots\dots (2.12)$$

Ce modèle aussi ne présente pas totalement le comportement viscoélastique, car sa réponse en fluage est une fonction linéaire, qui ne correspond pas à celle réalisée par l'essai de retard ou de fluage dans le cadre expérimental.

2.3.2.3. Solide viscoélastique

C'est un modèle constitué d'un modèle de Kelvin-Voigt associé en série avec un ressort de module d'élasticité E_1 .

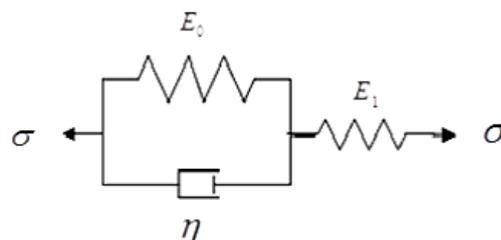


Figure II. 8 : Solide viscoélastique

En suivant le même raisonnement que l'élément de Maxwell et connaissant aussi la contrainte pour celui de Kelvin, on trouve aisément l'équation de comportement du modèle de Zener :

$$(E_0 + E_1)\sigma + \eta \frac{d\sigma}{dt} = E_1(E_0\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}) \dots\dots\dots (2.13)$$

2.3.3. Modèles analogiques généralisés

Au vu des faiblesses observées pour les trois modèles étudiés précédemment, il est évident qu'ils s'adaptent très mal à nos données expérimentales et qu'ils ne peuvent pas fournir une bonne modélisation pour notre matériau. De ce fait, nous pouvons généraliser ces modèles en considérant un groupement quelconque des N éléments linéaires de type ressort ou amortisseur.

2.3.3.1. Modèle de Maxwell généralisé

Ce modèle est formé d'un assemblage en parallèle de N modèle de Maxwell et élément élastique.

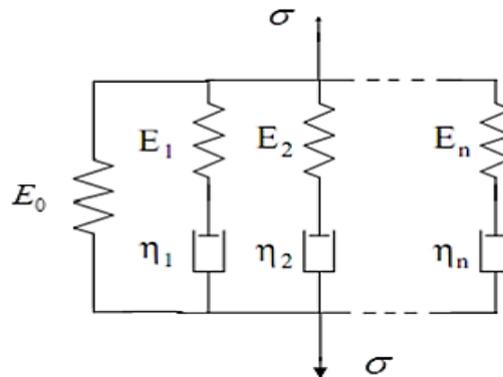


Figure II. 9 : Modèle de Maxwell généralisé

L'équation de comportement s'écrit :

$$\sum_{k=1}^n (\eta_k \frac{d\sigma}{dt} + E_k \sigma) = \sum_{k=1}^n (E_k \eta_k \frac{d\varepsilon}{dt} + E_0 \eta_k \frac{d\varepsilon}{dt} + E_0 E_k \varepsilon) \dots\dots\dots (2.14)$$

La fonction de relaxation de cette équation est donnée par :

$$R(t) = E_0 + \sum_{k=1}^n E_k e^{-\frac{E_k t}{\eta_k}} \dots\dots\dots (2.15)$$

2.3.3.2. Modèle de Kelvin-Voigt généralisé

La généralisation du modèle de Kelvin-Voigt consiste en un assemblage en série de N éléments de Kelvin. Ce modèle est illustré par le schéma ci-dessous :

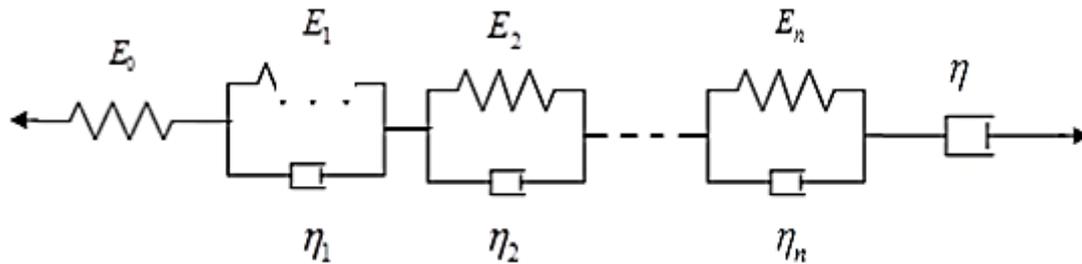


Figure II. 10 : Modèle de Kelvin-Voigt généralisé

L'équation caractérisant la relation entre les contraintes et les déformations s'écrit :

$$\sum_{k=1}^n \left(\eta_k \frac{d^2}{dt^2} + E_k \frac{d}{dt} \right) = \sum_{k=1}^n \left[\frac{\eta_k}{E_0} \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \left(\frac{E_k}{E_0} + \frac{\eta_k}{\eta} \right) \sigma + \frac{E_k}{\eta} \sigma \right] \dots \dots \dots (2.16)$$

La fonction de retard de (2.24) est :

$$J(t) = \frac{1}{E_0} + \frac{t}{\eta} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{E_k} \left(1 - e^{-\frac{E_k t}{\eta_k}} \right) \dots \dots \dots (2.17)$$

Les modèles analogiques généralisés donnent une bonne description du comportement pour une grande variété de matériaux viscoélastiques car il s'agit tout simplement des extensions des modèles simples vus précédemment mais avec un plus grand nombre des paramètres à déterminer.

Cependant l'identification de ces paramètres est onéreuse numériquement. Pour limiter le nombre de paramètres nécessaire, nous proposons d'autres modèles mathématiques dits des modèles paramétriques complexes plus élaborés que ces modèles analogiques généralisés permettant de mieux approximer la réalité avec des expressions assez simples [7].

2 .4. Machines de fluage

Il y a des machines qui travaillent sur le fluage en traction et le fluage en flexion, de type mécanique et hydraulique (**Figure II.11**) :



(A) Machine de fluage de type mécanique



(B) Machine de fluage de type hydraulique

Figure II. 11 : Machines de fluage .

Il existe d'autre part des appareils didactique de fluage comme l'appareil didactique d'étude du fluage de table permettant d'étudier le fluage de différents matériaux à l'aide d'une charge uniforme, stable appliquée par un système de bras de levier n'engendrant pas de flexion. Les essais sont effectués en température contrôlée à l'intérieur d'une enceinte avec possibilité de chauffer et de refroidir les éprouvettes d'essai.



Figure II. 12 : Appareil didactique de fluage

➤ En tant que notre projet est basé sur le fluage en flexion du matériau du bois, nous avons réalisé une petite machine pour notre essai sur le bois. Et toutes les étapes d'usinage de cette machine seront mentionnées dans le chapitre suivant.

Chapitre III :

*« Etude expérimentale et
modélisation »*

Ce chapitre fait l'objet d'une étude expérimental suivie d'une modélisation. D'abord, on s'intéresse à la réalisation de la machine d'essai. Puis ces essais de fluage sont conduits et enfin la formulation mathématique du modèle est établie.

3.1. Réalisation de la machine du fluage en flexion

3.1.1. Description de la machine

La structure de cette machine du fluage en flexion est un ensemble de tubes carrés d'épaisseur 0,5 à 1 millimètres découpées par une scie de fer, de matière acier **S235**, et soudé sous forme de structure. C'est une machine simple permettant d'étudier le fluage de différents matériaux polymériques à l'aide d'une charge (contrainte de fluage constante) uniforme, appliquée par une masse fixée aux bords de l'éprouvette. Elle est composée de 9 pièces assemblées en symétrie par soudage. Elle se compose de deux supports principaux qui forment la base. Deux supports perpendiculaires à la base portent un système de fixation manuel, et un comparateur pour mesurer les déplacements verticaux.

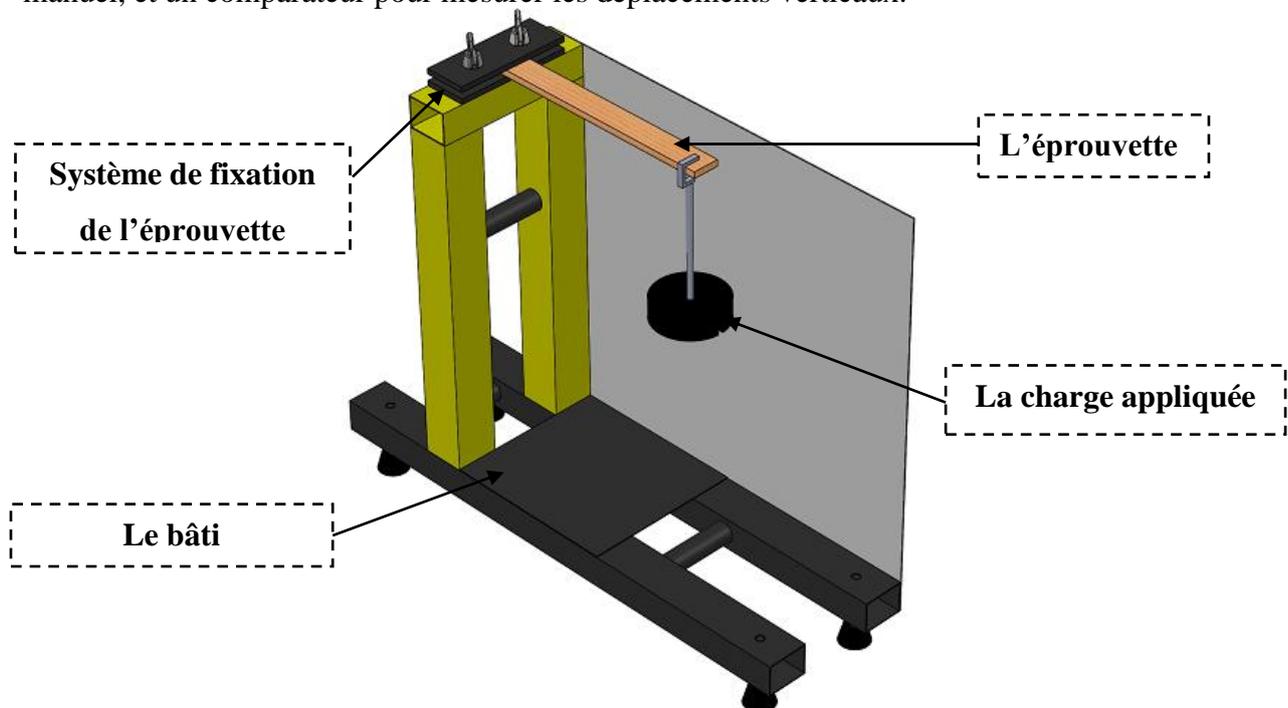


Figure III. 1 : Prototype de la machine de fluage en flexion

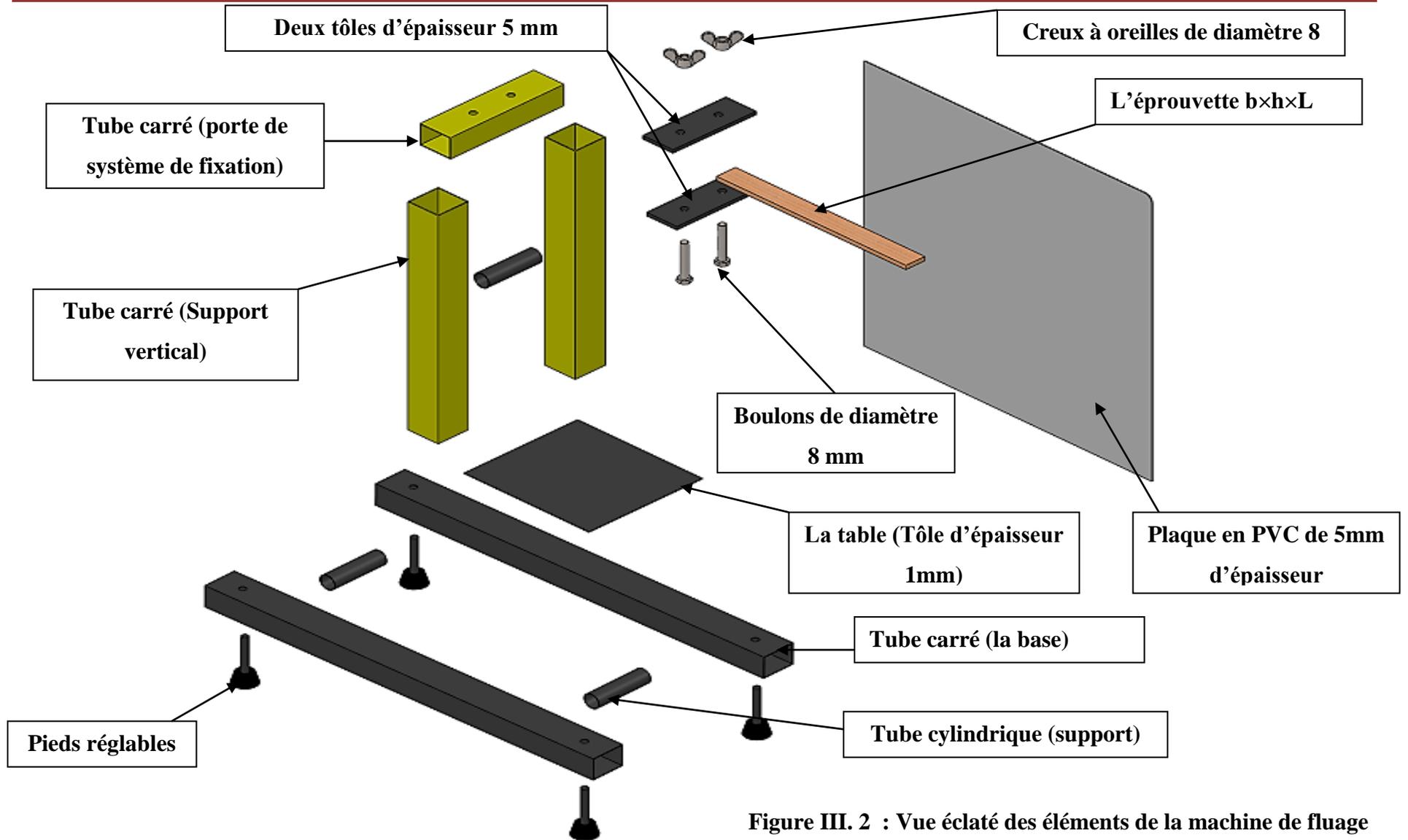


Figure III. 2 : Vue éclaté des éléments de la machine de fluage

3.1.2. Différents éléments de la machine de fluage

L'ensemble de la machine de fluage comprend les éléments suivants :

- **Support de base** : C'est un élément qui forme la structure de base de cette machine, composé de deux tubes carrés et deux tubes cylindriques assemblés en parallèle.
- **Support vertical** : Elément fixe, portant le système de fixation (deux tubes carrés et un support au milieu avec des nervures).
- **Système de fixation** : Un étau donnant la possibilité de fixer l'éprouvette de l'éprouvette composé de deux tôles suffisamment rigides pour éviter leu flexion lors de l'application de la charge et deux boulons.
- **Boulons de fixation** : Eléments de réglage ou serrage de système de fixation (deux boulons avec leurs creux).
- **Plaque en PVC**: Le background de la machine.
- **Un comparateur** : C'est un élément de la machine qui mesure les déplacements verticaux pendant l'essai avec 0.01de précision.

3.1.3. Matériaux utilisés pour la machine du fluage en flexion

La plupart de tubes carrés sont constitués d'un acier S235. C'est la nuance d'acier la plus courante en construction mécanique. Il a de bonnes caractéristiques mécaniques, telles que la rigidité, la ténacité et la soudabilité. L'Acier S235 est une nuance d'acier de construction au carbone non allié, selon la norme EN 10025-2. Les propriétés du matériau utilisé sont mentionnées sur le tableau III.1

Tableau III. 1 : Les propriétés du matériau utilisé [26].

| Propriété | Valeur | Unité |
|------------------------|------------------------|-------------------------|
| Module d'élasticité | 2.100000031e+11 | N/m² |
| Coefficient de Poisson | 0.28 | S.U |
| Module de cisaillement | 7.9e+10 | N/m² |
| Masse volumique | 7800 | kg/m³ |
| Limite d'élasticité | 235000000 | N/m² |
| Conductivité thermique | 14 | W/(m·K) |

3.1.4. Procédés d'usinage de la machine

L'usinage de la machine suit ces étapes (**Figure III.3**) :

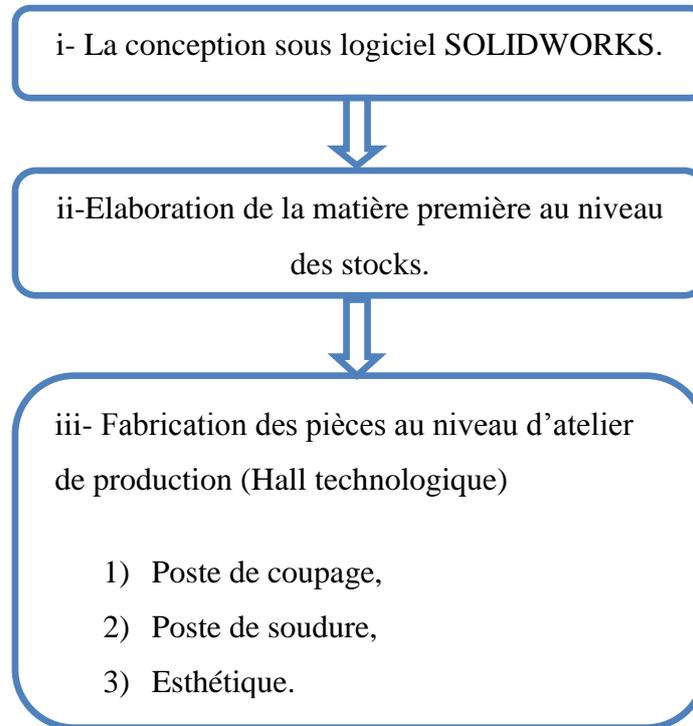


Figure III. 3 : Etapes de réalisation de la machine

La conception de la machine était faite sous l'logiciel SOLIDWORKS : les dessins de définition (les mises en plan) de chaque pièce sont mis en annexe 01.

La matière première consiste en des tubes rectangulaires et des plaques en acier. La **Figure III.4** en présente un échantillon.



Figure III. 4 : Matière première.

Les pièces constitutives sont fabriquées au niveau de l'atelier de production (Hall de technologique) appartenant au département de génie mécanique de l'université de Jijel.

- Le découpage a été fait à l'aide d'une tronçonneuse électrique (**Figure III.5**).



Figure III. 5 : Coupage des tubes carrés.

- Le soudage a été réalisé par un poste à souder de métal (**Figure III.6**).



Figure III. 6 : Soudage des tubes carrés.

Pour l'esthétique de la machine, nous avons ajouté des accessoires au but de faciliter le travail et de donner une belle apparence. Il s'agit d'une plaque en PVC et des couvre-boulons. La machine d'essai de fluage en flexion est présentée dans sa version finale sur la **Figure III.7**.



Figure III. 7 : Machine d'essai de fluage.

3.2. Expérimentation

3.2.1. Matériaux objets d'étude

3.2.1.1. Bois hêtre

Le bois hêtre est apprécié pour son homogénéité du fait de la présence « de vaisseaux égaux de calibres assez petits, nombreux et régulièrement disséminés et la présence de pores diffus. Cette homogénéité est caractérisée par l'absence de zone de bois initial poreuse. Par ailleurs, d'après la norme NF EN 350-2, le bois de hêtre est de faible durabilité, conduisant par ailleurs à des difficultés lors de sa conservation après abattage. En outre, il s'agit d'un bois lourd à forte masse volumique. Enfin, il est reconnu pour être difficilement prenable.

Le bois de hêtre est généralement qualifié de bois « nerveux » : lors de l'abattage, il y a libération des contraintes développées durant l'ensemble de la croissance de l'arbre : le bois présente des fentes à l'abattage réduisant très largement sa valeur économique et présentant un grave danger pour le bûcheron présent lors de l'abattage.

De surcroît, il a un coefficient de retrait volumique important et ce point a pour finalité la déformation des pièces de bois lors du séchage ou encore une faible stabilité en présence de changements d'humidités ambiantes.



Figure III. 8 : Bois hêtre.

3.2.1.2. Bois d'olivier

L'olivier est un arbre fruitier au tronc noueux qui peut atteindre 20 mètres de hauteur et vivre plusieurs siècles. L'olivier est un bois très lourd avec une masse volumique entre 800 et 1120 kg/m³ à un taux d'hygrométrie de 12 %. Le bois d'olivier est qualifié de dur et dense de sorte qu'il peut être utilisé comme étant matière première dans l'industrie de papier, dans la fabrication des meubles et d'ouvrage d'art. peut également servir de produit comme renfort des matrices polymères dans le but d'obtenir des matériaux composites [27]. En revanche, la dureté exceptionnelle du bois d'olivier nécessite un savoir-faire certain et des outils spécifiques pour le travailler.

3.2.2. Préparation des échantillons

Les échantillons du bois d'olivier sont prélevés des arbres de la zone de Jijel. La géométrie des éprouvettes a d'abord, été adaptée selon la norme NF B 51-008 (AFNOR 1987). Elles sont découpées sous forme de barre de section carrée de dimensions 360 mm (L) \times 20 mm (h) \times 20 mm (b) (**Figure III.9**). Cette norme a été investie pour la détermination du module de Young.

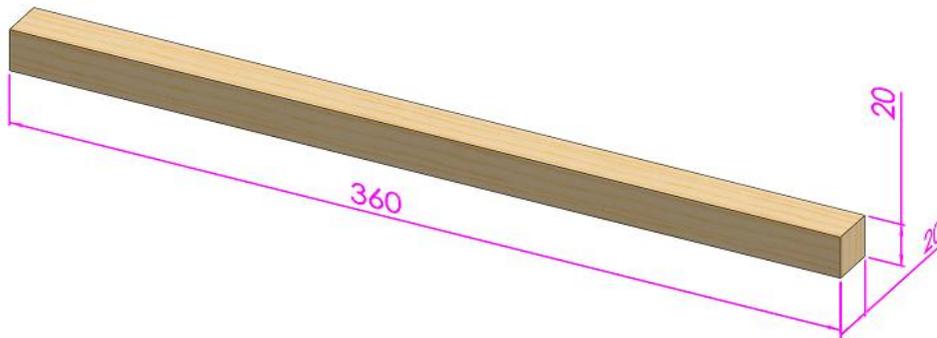


Figure III. 9 : Dimensions d'une éprouvette selon la norme NF B 51-008 (AFNOR 1987).



Figure III. 10 : Eprouvette réelle du bois d'olivier.

Dans l'absence de normes suivies pour l'identification des paramètres viscoélastiques en flexion, nous nous sommes inspirés des travaux de la référence [28]. Celui-ci s'est intéressé à l'identification des paramètres viscoélastiques et viscoplastiques du bois au cours du séchage. Il a utilisé des éprouvettes sous forme de barreaux prismatiques de dimensions 75 mm (L) \times 7 mm(h) \times 25 mm (b) (**Figure III.11**). Trois éprouvettes ont été testées pour chaque matériau. Il s'agit du bois hêtre (**Figure III.12 (A)**) et du bois d'olivier. Deux variantes du bois d'olivier sont utilisées. Un bois récent (qualifié d'humide) à deux jours de sa coupure de l'arbre (**Figure III.12 (B)**) et un bois asséché à l'air pendant un an (**Figure III.12 (C)**).

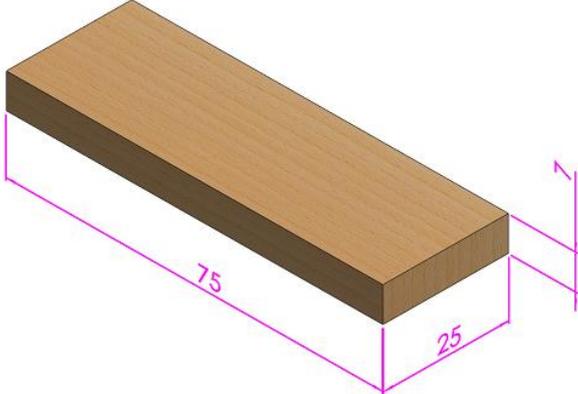


Figure III. 11 : Dimensions des éprouvettes.



(A) Bois de hêtre.



(C) Bois d'olivier sec



(B) Bois d'olivier humide

Figure III. 12 : Variantes du bois.

3.2.3. Protocole expérimental

Afin d'étudier le fluage en flexion de bois, un dispositif adéquat a été mis en place. L'éprouvette prismatique est fixée à une extrémité et chargée à son extrémité libre. La machine de fluage en flexion est équipée d'un comparateur qui mesure les déplacements verticaux suite à l'application d'une charge à l'extrémité libre de la poutre. La charge est suspendue à l'extrémité libre à l'aide d'un fil de masses négligeable. Les mesures concernent aussi bien le déplacement instantané que les déplacements effectués au cours du temps à charge constante. Une fois l'essai du fluage achevé, la recouvrance du matériau est mesurée.

L'essai a lieu à température ambiante qui est la température d'intérêt dans cette étude. La flèche a été mesurée à l'aide d'un capteur de déplacement (un comparateur de marque MITUTOYO 0.01 à 10mm) tel qu'il est illustré sur la **Figure III.13**.



Figure III. 13 : Comparateur MITUTOYO.

Pour mesurer le module d'élasticité longitudinal en fluage, le déplacement est enregistré dès l'application de la charge. Les mesures suivantes serviront de données pour identifier les paramètres viscoélastiques. Afin de pouvoir réaliser ces essais avec le matériel à notre disposition une adaptation de la norme a dû être faite. Le comparateur MITUTOYO est donc installé sur le bâti de la machine. Un support immobile comme illustré par **Figure III.14**.



Figure III. 14 : Dispositif expérimental.

On s'est servi des déplacements mesurés par le comparateur MITUTOYO pour déterminer le module d'élasticité en fluage selon l'équation (3.1) tout en gardant les principes d'application de ces essais. En effet, la courbe temps-déplacement pour chaque cycle de charge-décharge (qui est la flèche mesurée par le comparateur MITUTOYO) a été retracée, puis les valeurs de déplacement et de temps correspondants ont été représentées sous forme de tableaux.

3.3. Modélisation

3.3.1. Proposition d'un modèle rhéologique

Le modèle de Kelvin-Voigt est le modèle très adapté pour présenter les comportements viscoélastiques des éprouvettes en bois. Ce modèle que nous avons adopté est la combinaison d'une part élastique instantanée représenté par un ressort et d'une part viscoélastique constituée d'un ressort et d'un amortisseur montés en série. Les détails de ce modèle sont déjà mentionnés sur le chapitre II.

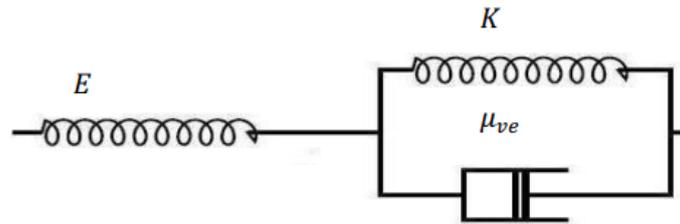


Figure III. 15 : Modèle rhéologique viscoélastique.

3.3.2. Identification des paramètres viscoélastique

La flèche, qui représente le déplacement maximal à l'extrémité libre de la poutre est évalué selon le comportement élastique instantané par :

$$u = \frac{PL^3}{3I} J \dots\dots\dots (3.1)$$

Où $J = \frac{1}{E}$

Maintenant si l'on prend en compte le déplacement viscoélastique représenté par le modèle de Kelvin-Voigt à élasticité instantanée, le déplacement s'exprime par :

$$u(t) = \frac{PL^3}{3I} J(t) \dots\dots\dots (3.2)$$

Où $J(t)$ est dite fonction de fluage et s'exprime par :

$$J(t) = \frac{1}{E} + \frac{1}{K} \left(1 - e^{-\frac{K}{\mu}t} \right) \dots\dots\dots (3.3)$$

Où K et μ sont les paramètres viscoélastique du matériau.

Ainsi l'équation de la flèche viscoélastique s'écrit comme :

$$u(t) = \frac{PL^3}{3I} \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{K} \left(1 - e^{-\frac{K}{\mu}t} \right) \right) \dots\dots\dots (3.4)$$

Nous remarquons que pour $t = 0$, le déplacement n'est que la composante élastique instantanée de la flèche.

Il existe plusieurs méthodes pour l'identification des paramètres. Nous nous intéressons dans ce travail à l'identification par l'analyse inverse. Celle-ci consiste en une fonction qui minimise l'écart entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle. Elle se formule comme suit :

$$F = u_{exp} - u_{mod}(K, \mu) \dots\dots\dots (3.5)$$

Le problème mathématique se formule alors :

Trouver K, μ !

De façon que $F = \textit{minimale}$

La résolution du problème est faite dans le chapitre suivant à l'aide du logiciel MATLAB à l'aide de la technique des algorithmes génétiques.

Chapitre IV :
« *Discussion des résultats* »

Ce chapitre s'intéresse principalement à la validation du modèle. Ainsi les résultats sont discutés et des comparaisons Test-modèle sont effectués.

4.1. Analyse et discussion des résultats

Les travaux exposés dans cette partie intègrent l'étude de fluage viscoélastique des éprouvettes du bois pendant des essais continus. On s'intéresse au déplacement du bois de l'olivier et du hêtre sous sollicitation de flexion.

Une éprouvette représentative de l'olivier est sélectionnée pour étudier sa réponse pendant un essai normalisé. Ensuite les résultats obtenus avec les autres échantillons sont discutés et comparés. Ainsi, les comportements et les propriétés mécaniques, dont les modules de Young et les paramètres viscoélastiques, des éprouvettes testées sont analysés.

4.1.1. Présentation des courbes (Déplacement en fonction du temps)

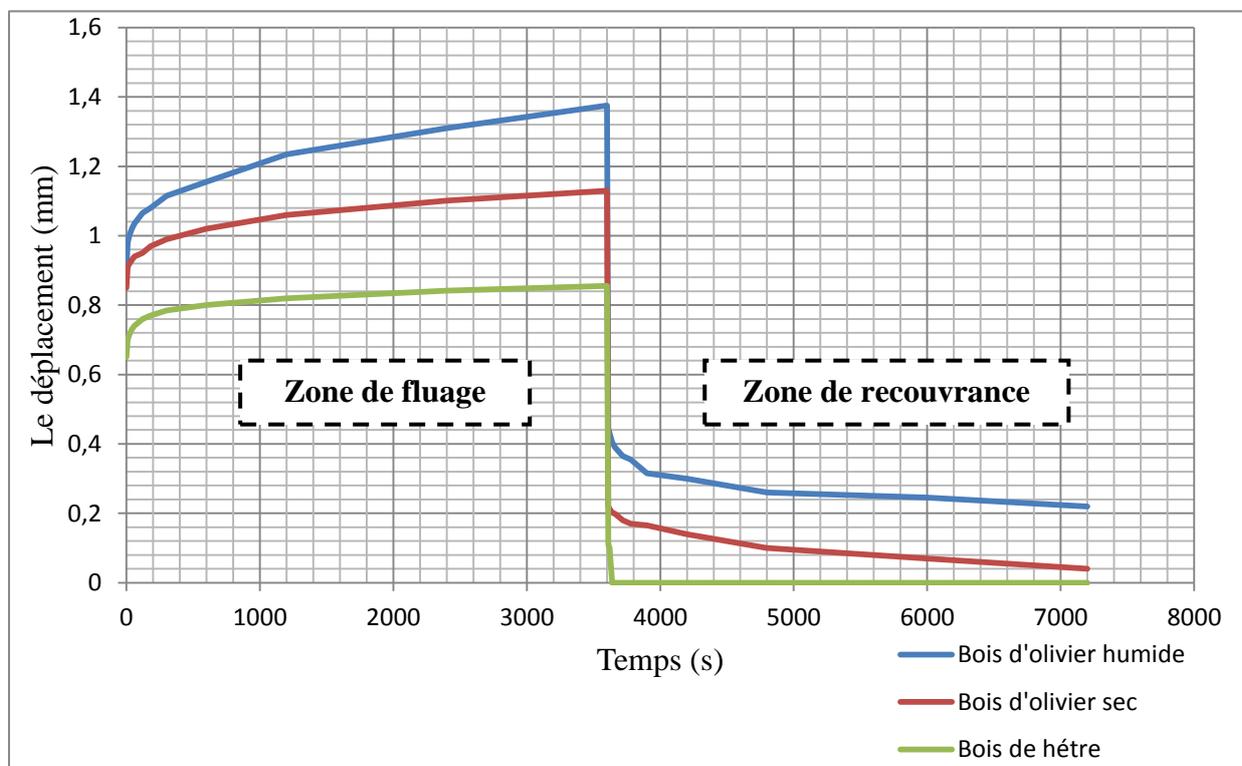


Figure IV. 1 : Déplacement-temps 3Kg.

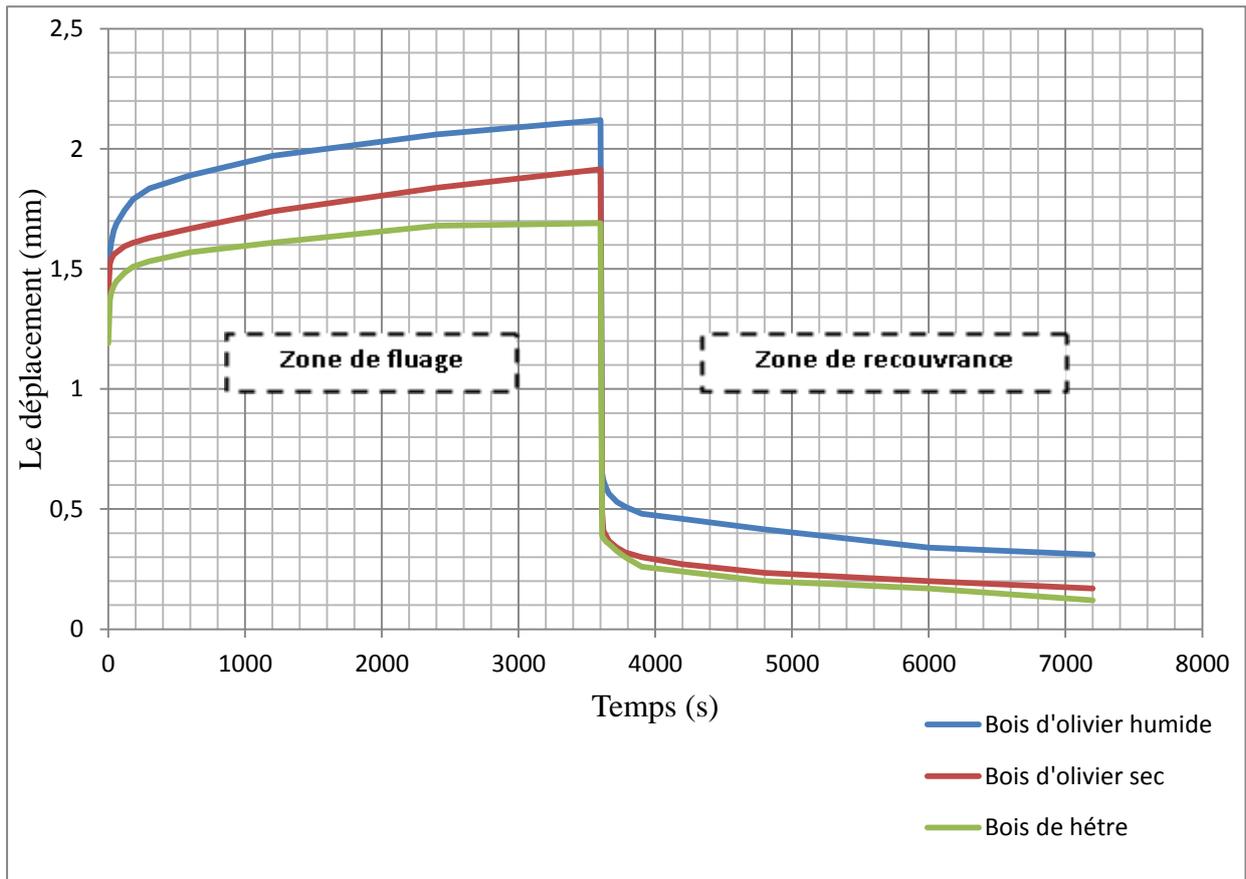


Figure IV. 2: Déplacement-temps sous 5Kg.

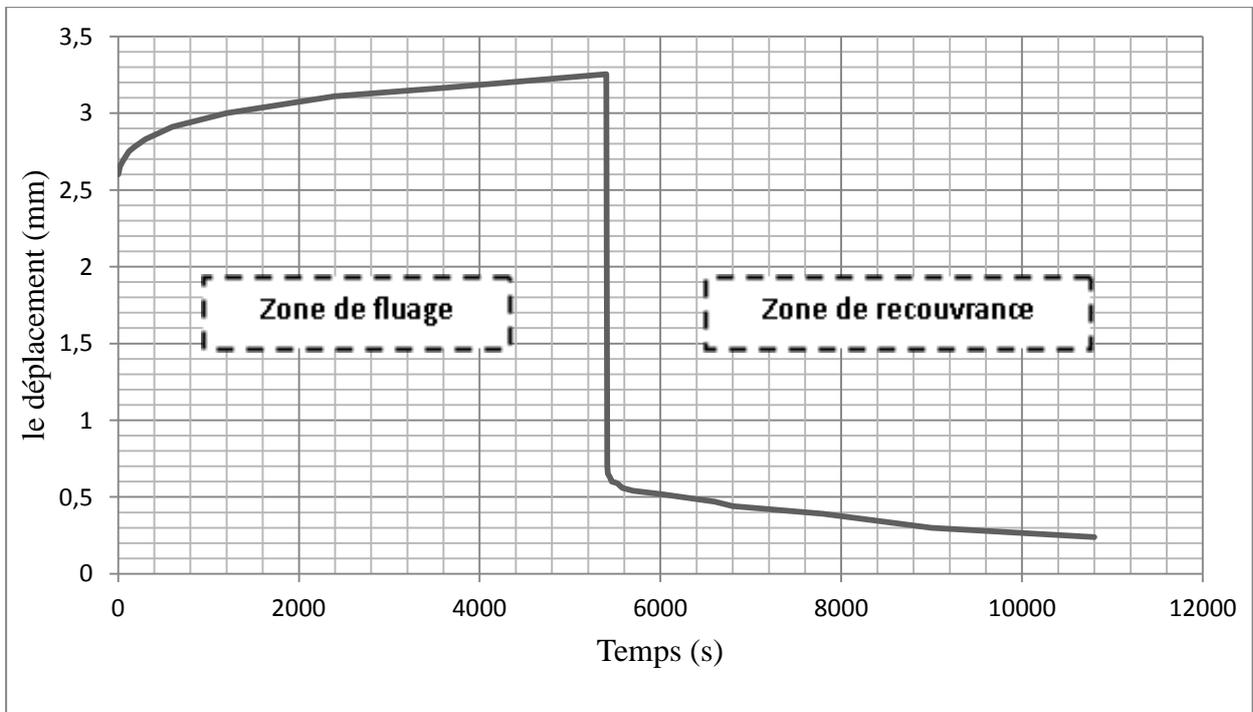


Figure IV. 3: Déplacement-temps de l'essai normalisé sous 3Kg.

4.1.2. Description des courbes

La **Figure IV.1** représente les courbes de déplacement-temps ($U(t)$) de deux éprouvettes d'olivier (humide et sec) et une éprouvette du hêtre de dimensions identiques sollicitées en flexion avec 3Kg de charge pendant deux heures de temps.

Zone de fluage : On constate une augmentation instantanée du déplacement juste après l'application de la charge sur les deux essences du bois. Ensuite, un palier transitoire du déplacement reproduisant ainsi un fluage primaire. Enfin, apparaît un palier stationnaire à vitesse minimale qui représente le fluage secondaire. La courbe de l'éprouvette bleue (Bois d'olivier humide) présente un déplacement maximal très élevée par rapport aux autres éprouvettes. Lorsque $t = 0$, le bois d'olivier humide se déplace instantanément avec 0,9 mm, après il sera suivi par une partie non-linéaire jusqu'à ce que le déplacement atteigne sa valeur maximale $U = 1,375$ mm. Par contre les deux autres matériaux montrent un déplacement inférieur.

Zone de recouvrance : En général, durant les essais de fluage il y a toujours une recouvrance, mais cette dernière est dépend la matière et ses propriétés.

Dans ce cas, une chute instantanée est observée juste après la décharge. Une décente transitoire apparaît ensuite et finit par un palier stationnaire jusqu'à ce que le déplacement atteigne sa valeur minimale. On remarque que la recouvrance est totale pour le bois de hêtre, par contre le bois d'olivier conserve un faible déplacement permanent. Ceci peut s'expliquer par les traitements thermiques que subit le bois avant sa mise en consommation et qui lui confère une grande élasticité.

La **Figure IV.2** représente les courbes déplacement-temps ($U(t)$) de deux éprouvettes d'olivier (humide et sec) et une éprouvette de hêtre de dimensions identiques sollicitées en flexion avec 5Kg de charge pendant deux heures de temps. A partir de ces courbes expérimentales, on remarque, en zone de fluage que l'allure de ces courbes peut être décrite par une petite partie transitoire après un déplacement instantané. La courbe prend progressivement un aspect linéaire jusqu'à ce que le déplacement atteigne sa valeur

maximale. Le déplacement dans cette essai de 5 Kg de charge est grand que l'essai de 3Kg de charge.

La **Figure IV.3** L'allure de courbe déplacement-temps ($U(t)$) de cette éprouvette normalisée d'olivier (sec) de dimensions selon la norme NF B 51-008 (AFNOR 1987) sollicitée en flexion avec 3Kg de charge pendant trois heures de temps.

Zone de fluage : Une déplacement instantané est observé dès que la charge est appliquée. Un stade transitoire non linéaire apparait où le temps semble inférieur à 1min. La courbe devient légèrement linéaire jusqu'à ce que le déplacement atteigne sa valeur maximale. Le déplacement dans cet essai est plus grand que les autres essais.

Zone de recouvrance : Cette phase débute lorsque la charge est enlevée. La courbe du déplacement diminue instantanément puis non linéairement. Un déplacement permanent est observé après un temps de recouvrance égal au temps du fluage.

Les valeurs des courbes déplacement-temps des éprouvettes sollicitées en flexion sont résumées dans les Tableaux qui sont fournis en annexe 2.

4.1.3. Identification du module de Young

On retient pour chaque éprouvette, le module de Young calculé pour les deux charges correspondantes à (29.43N et 49.05N) :



Figure IV. 4: Charges.

Le module de Young est évalué à partir de l'équation ci-dessous :

$$E = \frac{PL^3}{3I_{GZ}U_{max}} \dots\dots\dots (4.1)$$

Avec :

$$I_{GZ} = \frac{bh^3}{12} \dots\dots\dots (4.2)$$

Soit : E : le module d'élasticité en MPa;

P : la charge en flexion en N;

L : la distance entre la contrainte d'encastrement et le point d'application de la charge en mm;

I_{GZ} : le centre d'inertie en mm^4 ;

U_{max} : le déplacement en mm.

b : la largeur en mm ; h : la hauteur en mm.

4.1.3.1. Module de Young à partir de l'essai normalisé

La charge est appliquée à l'extrémité libre d'éprouvette (**Figure IV.5**). Le matériau utilisé pour cet essai est le bois d'olivier sec, la longueur de la poutre est supposée être au moins dix fois plus grande que son épaisseur selon la norme NF B 51-008 (AFNOR 1987), ce qui nous permet de négliger les effets de cisaillement ainsi que les composantes de la contrainte normale suivant les axes autres que la direction axiale.

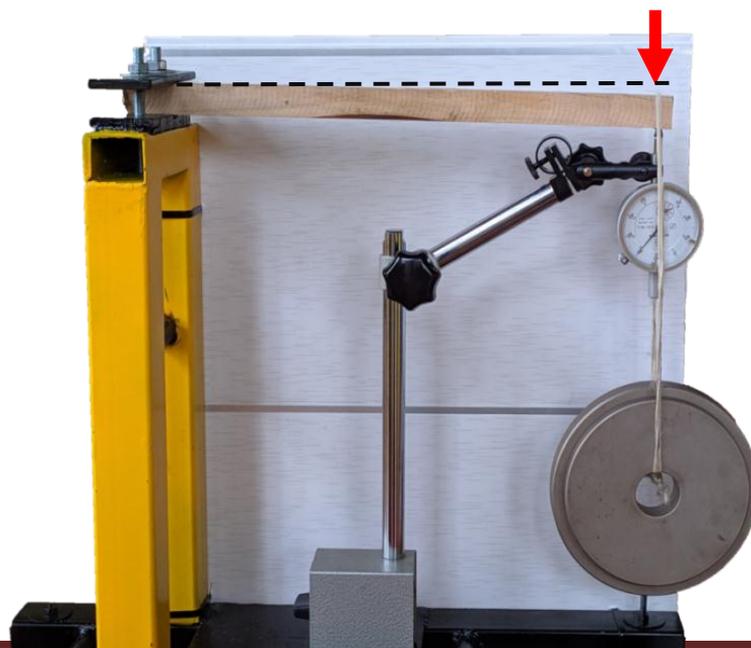


Figure IV. 5: l'essai normalisé.

Afin d'identifier le module de Young instantané à partir de cette essai normalisé, on a mesuré le déplacement instantané, et après on a appliqué l'équation (4.1)

$$E = \frac{PL^3}{3I_{GZ}U_{max}} \dots\dots\dots (4.1)$$

Le résultats obtenus sont résumés sur le Tableau VI-1.

Tableau IV. 1 :Module de Young et déplacement instantanée de l'essai normalisé

| Charge | 3Kg | |
|-------------------|-----------------|---------------|
| Paramètres | E (MPa) | U (mm) |
| Valeurs | 9624.808 | 2.6 |

4.1.3.2. Module de Young à partir des autres essais :

Nous avons modifié les dimensions des éprouvettes selon les travaux de la référence [32] puis calculé le module de Young pour chaque éprouvette en appliquant différentes charges (3Kg et 5Kg). Les résultats sont résumés dans le Tableau VI-2.

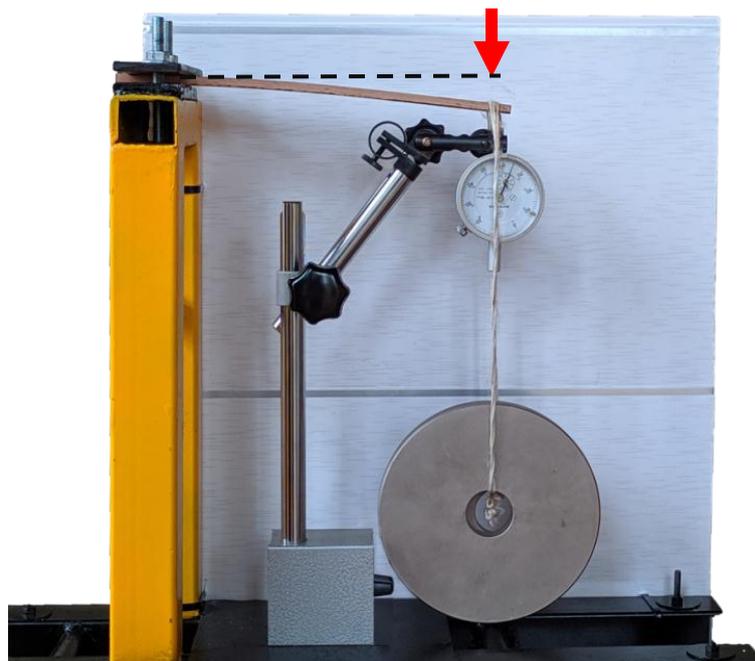


Figure IV. 6: l'essai selon les travaux de la référence [32].

Tableau IV. 2: Module de Young et déplacement instantané des autres essais

❖ Bois d'olivier humide :

| Charge | 3Kg | | 5Kg | |
|------------|---------|--------|---------|--------|
| Paramètres | E (MPa) | U (mm) | E (MPa) | U (mm) |
| Valeurs | 6435.2 | 0.9 | 6657.1 | 1.45 |

❖ Bois d'olivier sec :

| Charge | 3Kg | | 5Kg | |
|------------|---------|--------|---------|--------|
| Paramètres | E (MPa) | U (mm) | E (Mpa) | U (mm) |
| Valeurs | 6613.7 | 0.85 | 6894.8 | 1.4 |

❖ Bois de hêtre :

| Charge | 3Kg | | 5Kg | |
|------------|---------|--------|---------|--------|
| Paramètres | E (MPa) | U (mm) | E (MPa) | U (mm) |
| Valeurs | 8910.2 | 0.65 | 8111.5 | 1.19 |

4.1.3.3. Commentaire sur la différence

La différence entre le module de Young de l'essai normalisé et les autres essais peut être liée à plusieurs facteurs, parmi lesquels on cite : les dimensions des éprouvettes, l'homogénéité longitudinal des éprouvettes et leurs masses volumiques.

De l'habitude, quoique les essais changent, le module de Young instantané reste presque le même, on dit « presque » car il existe rarement une expérience parfaite. Nos résultats sont presque pareils, même si on change la charge.

- Le module de Young de bois d'olivier l'humide est ≈ 6550 MPa.
- Le module de Young de bois d'olivier sec est ≈ 6780 MPa.
- Le module de Young de bois d'olivier sec à partir de l'essai normalisé est ≈ 9624.808 MPa.

➤ Le module de Young de bois de hêtre est ≈ 8910.2 MPa.

D'après les essais, nous pouvons dire que le module de Young de bois d'olivier sec est dans cet intervalle [de 6780 MPa à 9624.808 MPa]. Nous avons choisi le bois hêtre pour servir d'étalonnage de notre travail dans l'absence de propriétés élastiques du bois d'olivier.

4.2. Fonction du fluage

L'essai du fluage consiste en l'application d'une contrainte constante induisant un déplacement qui évolue au cours du temps. La réponse du matériau dans ce cas est la somme d'une part élastique instantanée et d'une part viscoélastique.

$$J(t) = \frac{1}{E} + \frac{1}{K} \left(1 - e^{-\frac{K}{\mu}t} \right) \dots \dots \dots (3.3)$$

4.2.1. Courbes de la fonction du fluage

4.2.1.1. Courbes à partir de l'essai normalisé

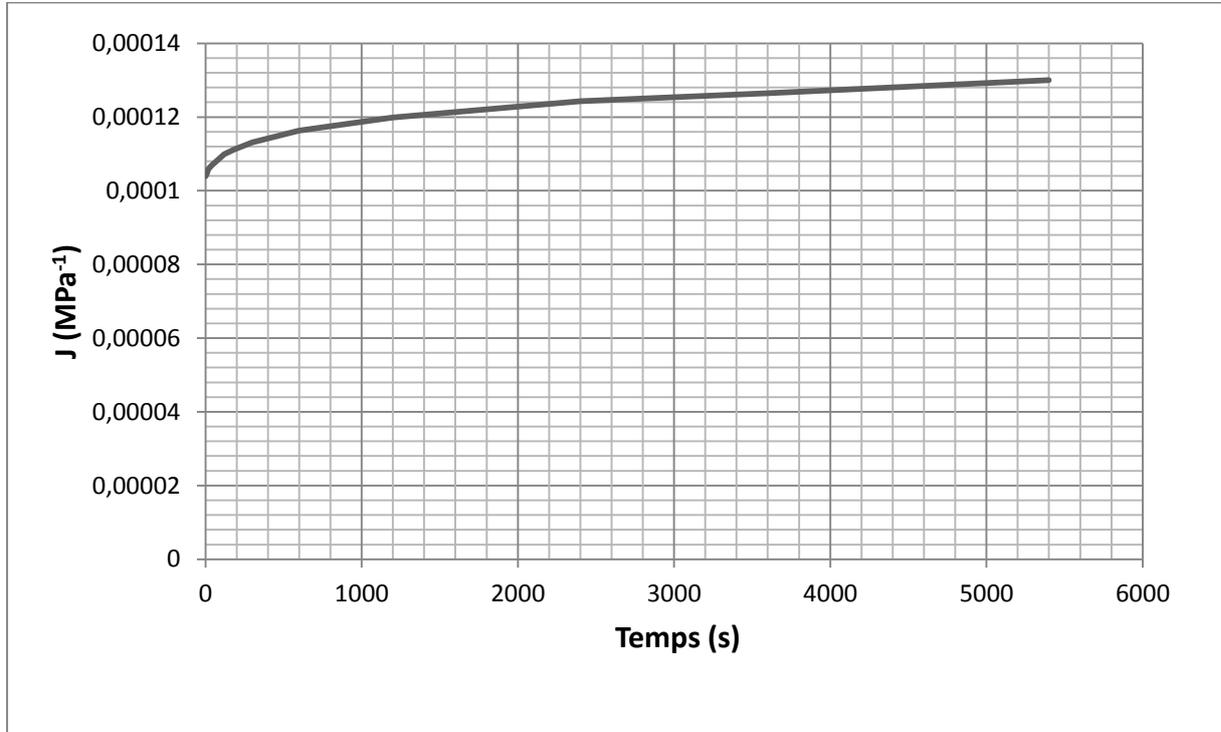


Figure IV. 7: Courbe du fluage à partir de l'essai normalisé en 3Kg.

4.2.1.2. Courbes à partir des autres essais

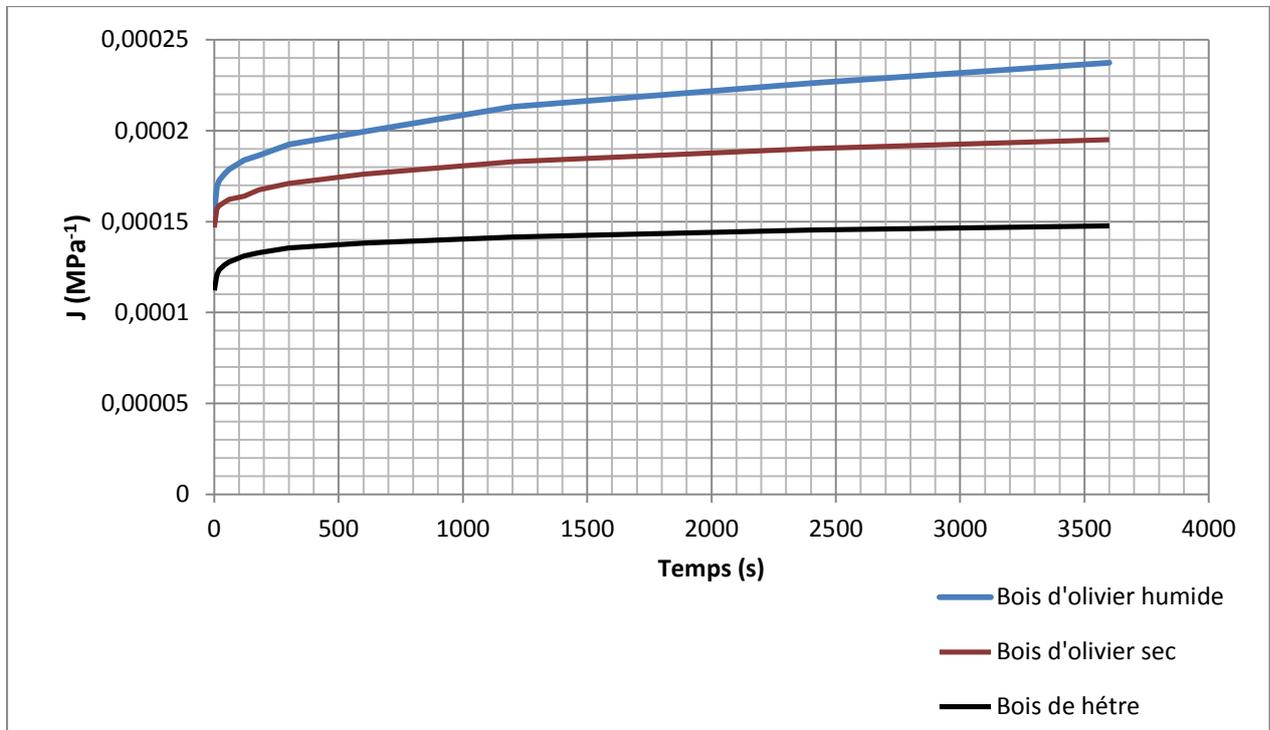


Figure IV. 8: Courbe du fluage à partir des autres essais en 3Kg.

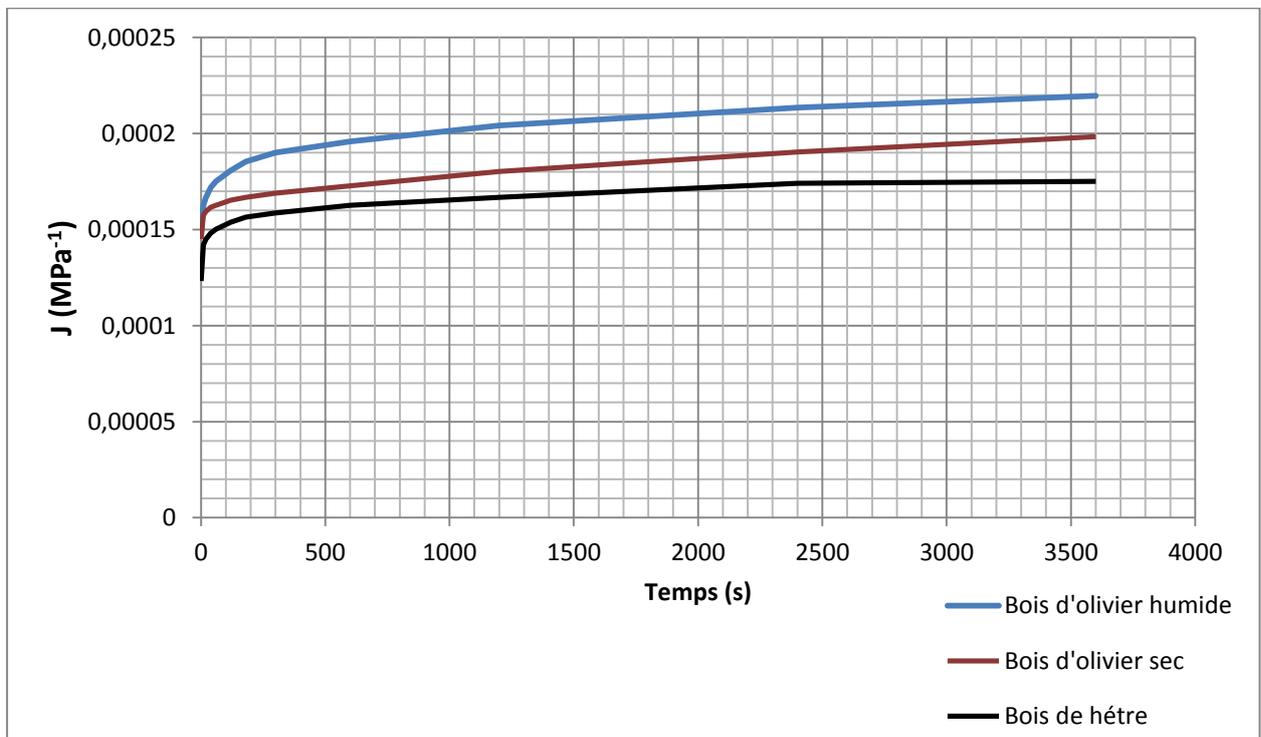


Figure IV. 9: Courbe du fluage à partir des autres essais en 5Kg.

4.2.1.3. Description des courbes

La **Figure IV.7** représente la courbe de la fonction du fluage ($J(t)$) d'une éprouvette normalisé (bois d'olivier sec). On constate une relation non-linéaire entre la fonction du fluage et le temps. Au début la valeur de fluage instantanée est 0.00011 ensuite elle augmente jusqu'à 0.00013 dans une heure et demi de temps.

Les **Figures IV.8** et **IV.9** représentent les courbes de la fonction de fluage ($J(t)$) des autres éprouvettes (bois d'olivier sec, humide et le bois hêtre). On voit que le bois d'olivier humide flue plus que les deux autres éprouvettes, ces dernières sont presque proches en cinq Kg.

❖ Les valeurs des courbes fluage-temps ($J(t)$) sont résumées dans le Tableau qui est fourni en annexe 2.

4.3. Paramètres viscoélastique identifiées

Les paramètres viscoélastiques sont identifiés à partir d'une analyse inverse basée sur la technique (AG) des algorithmes génétiques à l'aide de logiciel MATLAB. Le cas de notre étude, nous avons utilisé un programme d'optimisation pour minimiser l'écart entre les résultats expérimentaux avec les résultats de modèle viscoélastique. Les **Figures** de **IV.10** à **IV.13** illustrent les étapes de faire cette optimisation avec le logiciel MATLAB 7.5.0

```
function y = wood_fitness(x)
%Data
3 - t=[0 10 20 40 60 120 180 300 600 1200 2400 3600];
4 - U=[0.9 0.98 1 1.02 1.035 1.065 1.08 1.115 1.155 1.235 1.32 1.375];
5 - % Reassign the variables.
6 - P=29.43;
7 - E=6435.2;
8 - L=75;b=25;h=7;
9 - I=(b*h^3)/12;
10 - K=x(1);
11 - Mu=x(2);
12 - n=length(t);
13 - for i=1:n
14 - J(i)=((1/E)+(1/K)*(1-exp(-
15 - y = (sum(U(i)-(((P*L^3)/(3*I))*J(i))))^2)/n;
16 - end
17 - end
18
```

Temps

Déplacement

P : la charge ;
E : le module de Young ;
L : la longueur ; b : le largeur ; h : la hauteur
I : moment d'inertie ;

La fonction du fluage

Figure IV. 10: Etape 01 wood_fitness.

```
1 function [c, ceq] = wood_constraint(x)
2     c(1) = -x(1);
3     c(2) = -x(2);
4     ceq = [];
5 end
```

Figure IV. 11: Etape 02 wood_constraint.

```
1 clear
2 ObjectiveFunction = @wood_fitness;
3 options = gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf,@gaplotmaxconstr},'Display','iter');
4 nvars = 2; % Number of variables
5 Lb = [1; 0]; % Lower bound
6 Ub = [1.8e4; 1e8]; % Upper bound
7 ConstraintFunction = @wood_constraint;
8 [x,fval] = ga(ObjectiveFunction,nvars,[],[],[],[],Lb,Ub,ConstraintFunction);
```

Figure IV. 12: Etape 03 wood_solve.



Figure IV. 13: Etape 04 Run wood_solve.

Après avoir terminé ces étapes, nous obtenons les résultats montrés sous forme des courbes avec des valeurs de K et μ .

4.3.1. Courbes de fluage Test-Modèle

- En trois kilogrammes de charge :

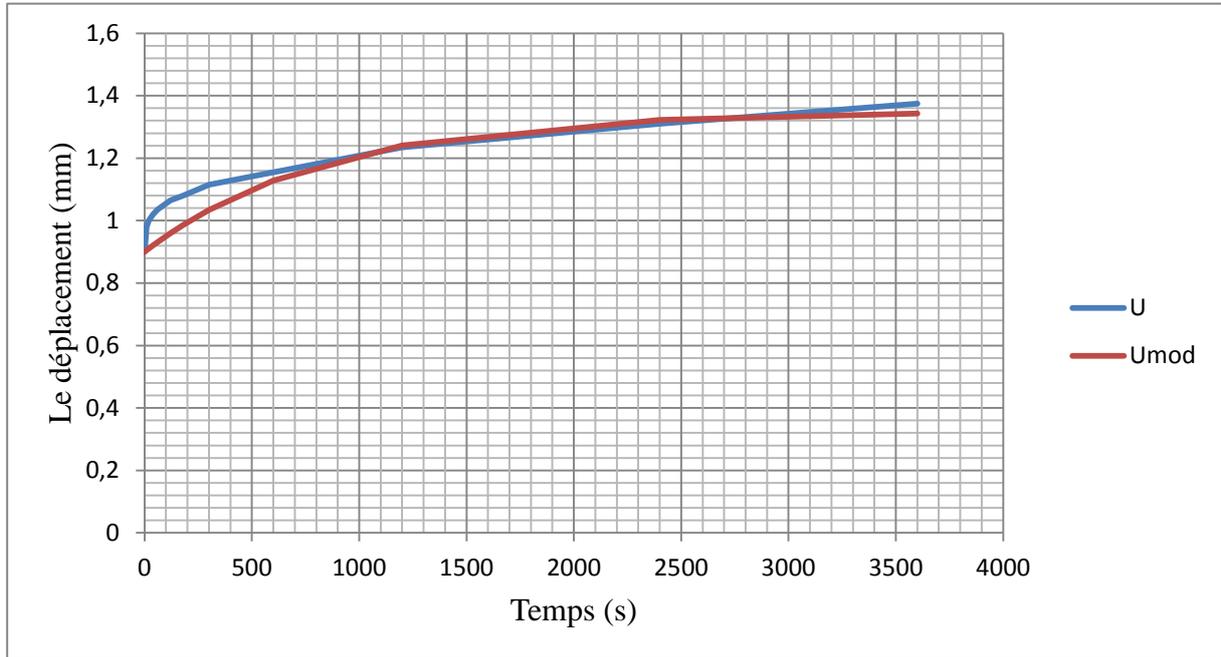


Figure IV. 14: Courbe de fluage de bois d'olivier humide Test-Modèle en 3Kg.

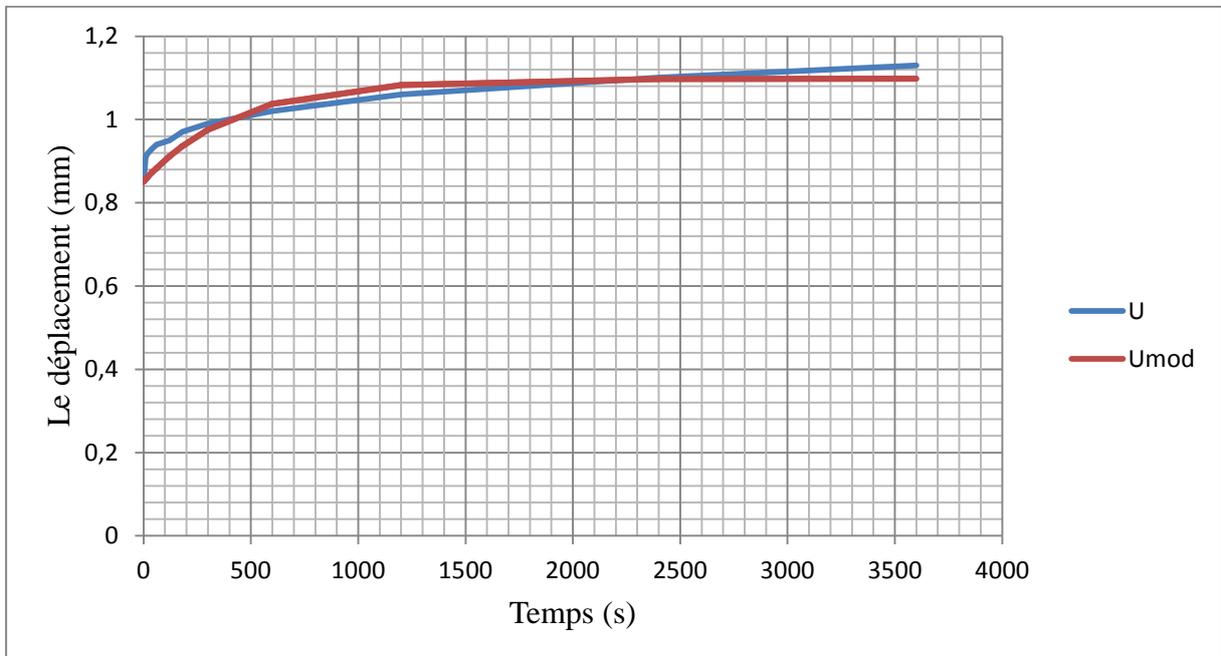


Figure IV. 15: Courbe de fluage de bois d'olivier sec Test-Modèle en 3Kg.

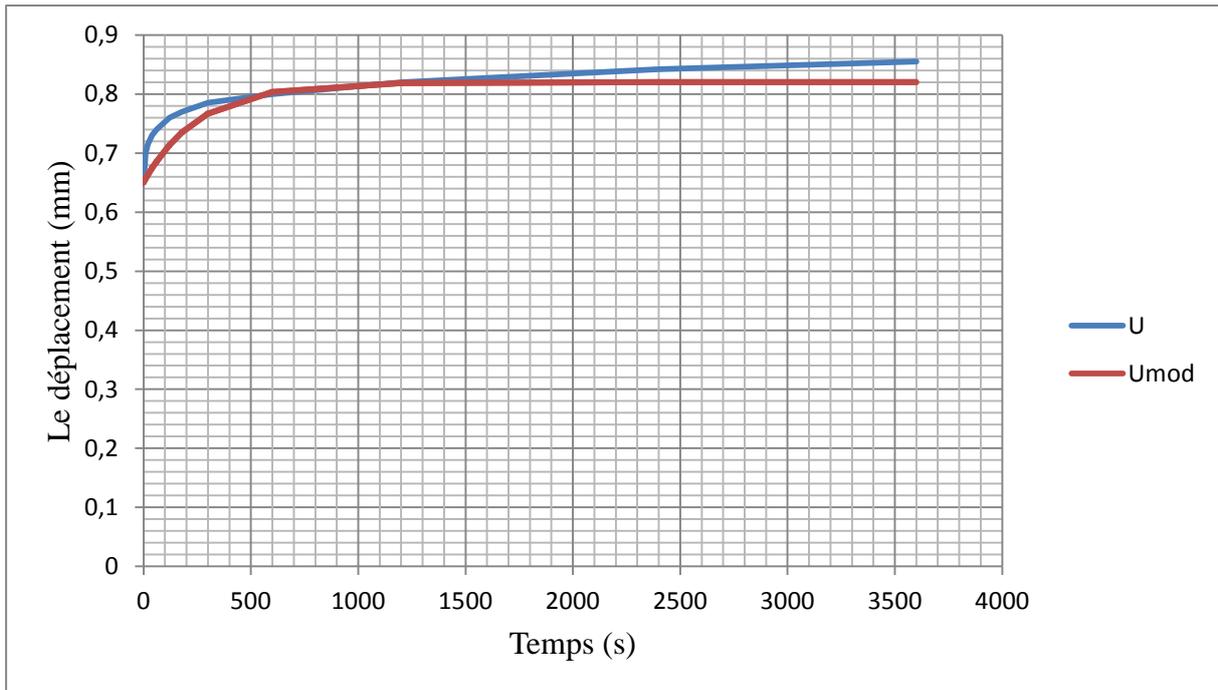


Figure IV. 16: Courbe de fluage de bois de hêtre Test-Modèle en 3Kg.

- En cinq kilogrammes de charge :

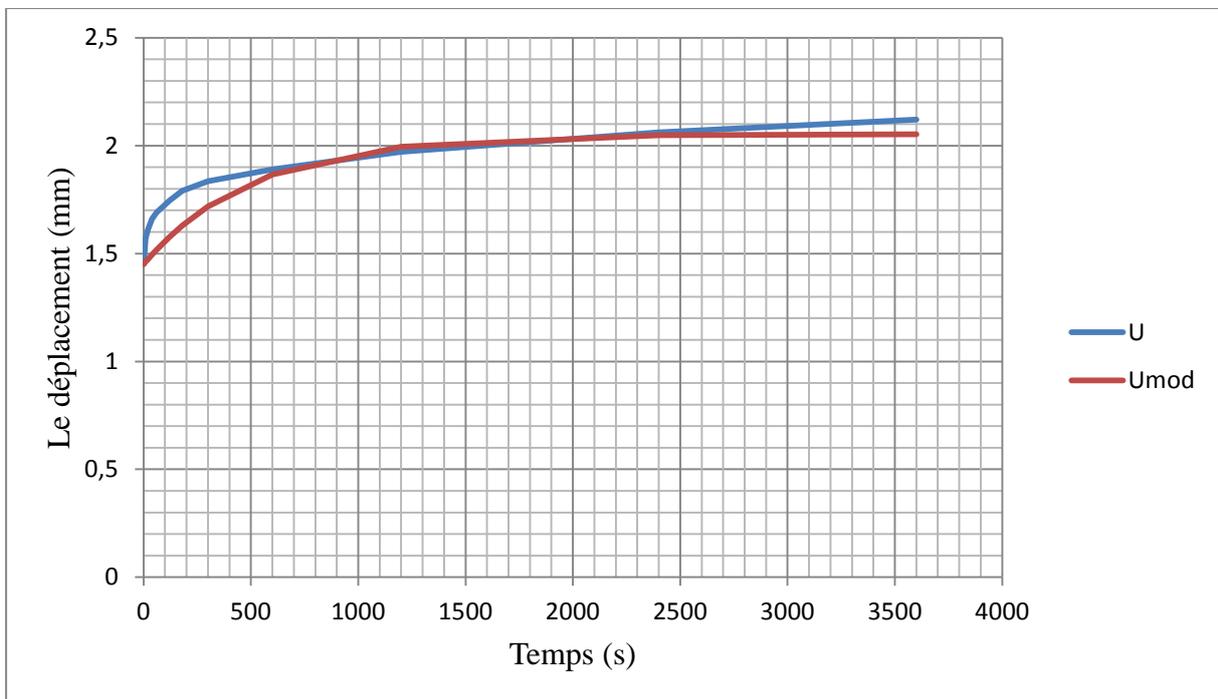


Figure IV. 17: Courbe de fluage de bois d'olivier humide Test-Modèle en 5Kg.

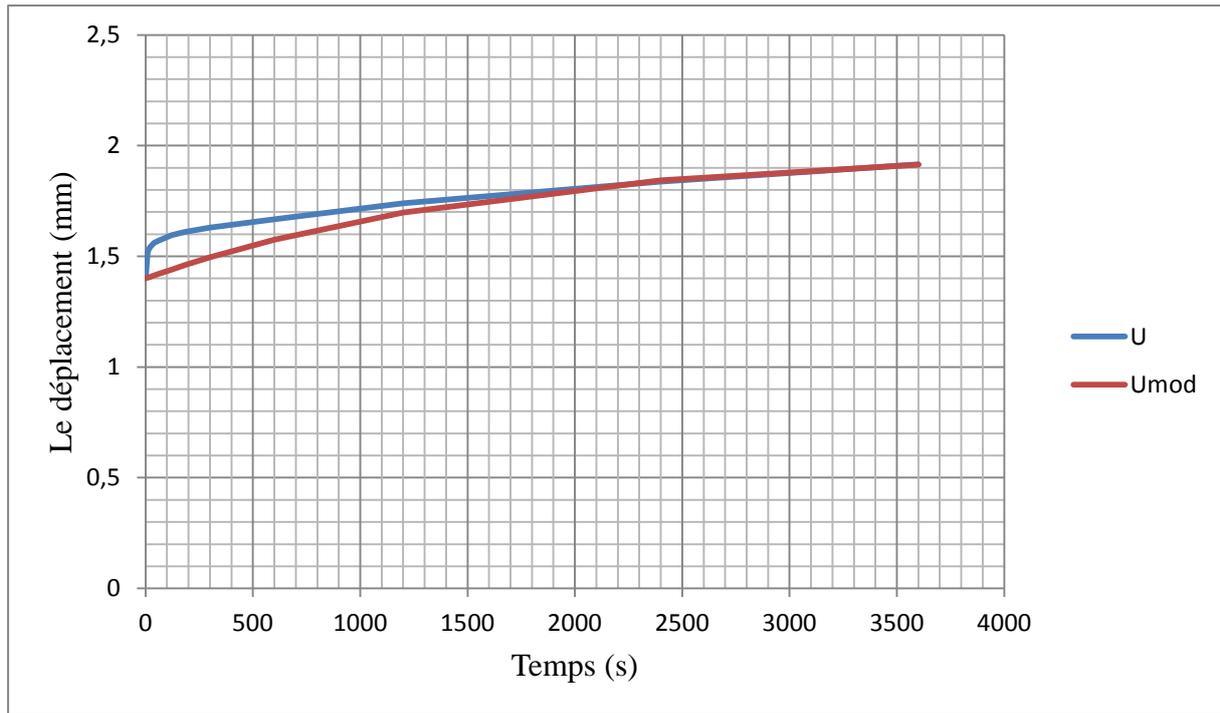


Figure IV. 18: Courbe de fluage de bois d'olivier sec Test-Modèle en 5Kg.

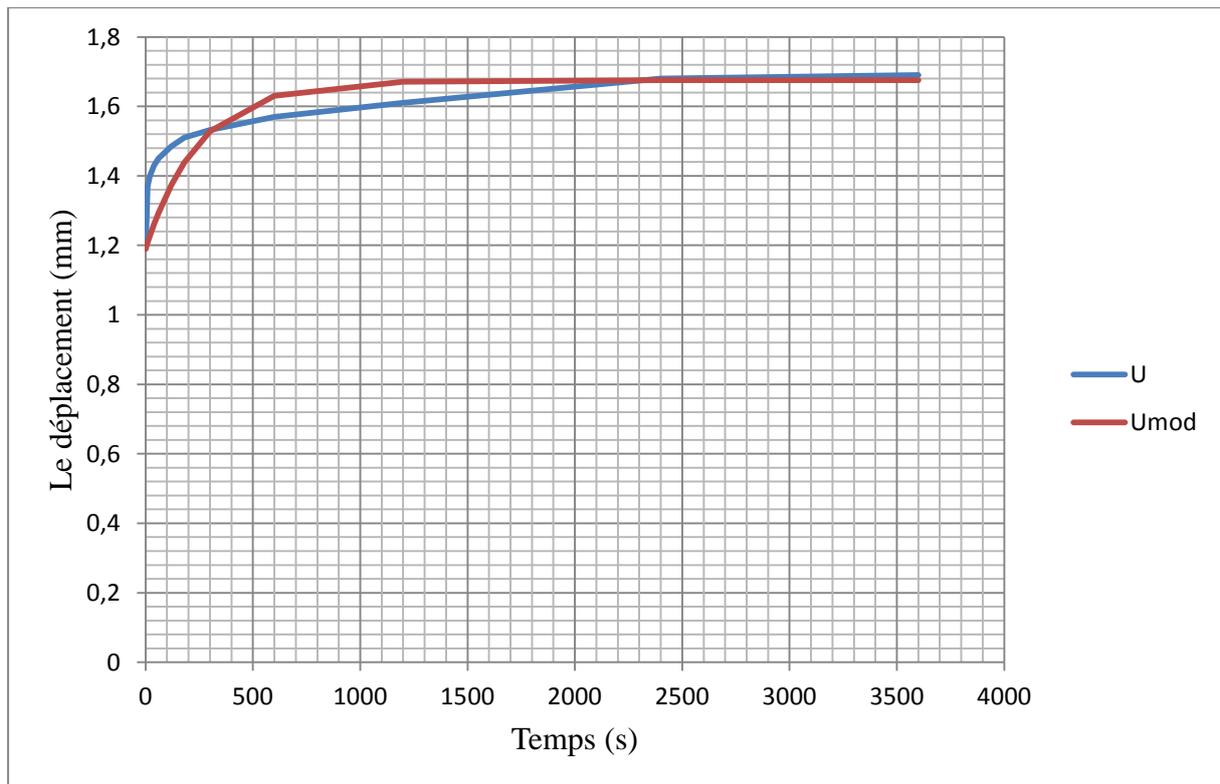


Figure IV. 19: Courbe de fluage de bois de hêtre Test-Modèle en 5Kg.

- En cas de l'essai normalisé en 3Kg de charge :

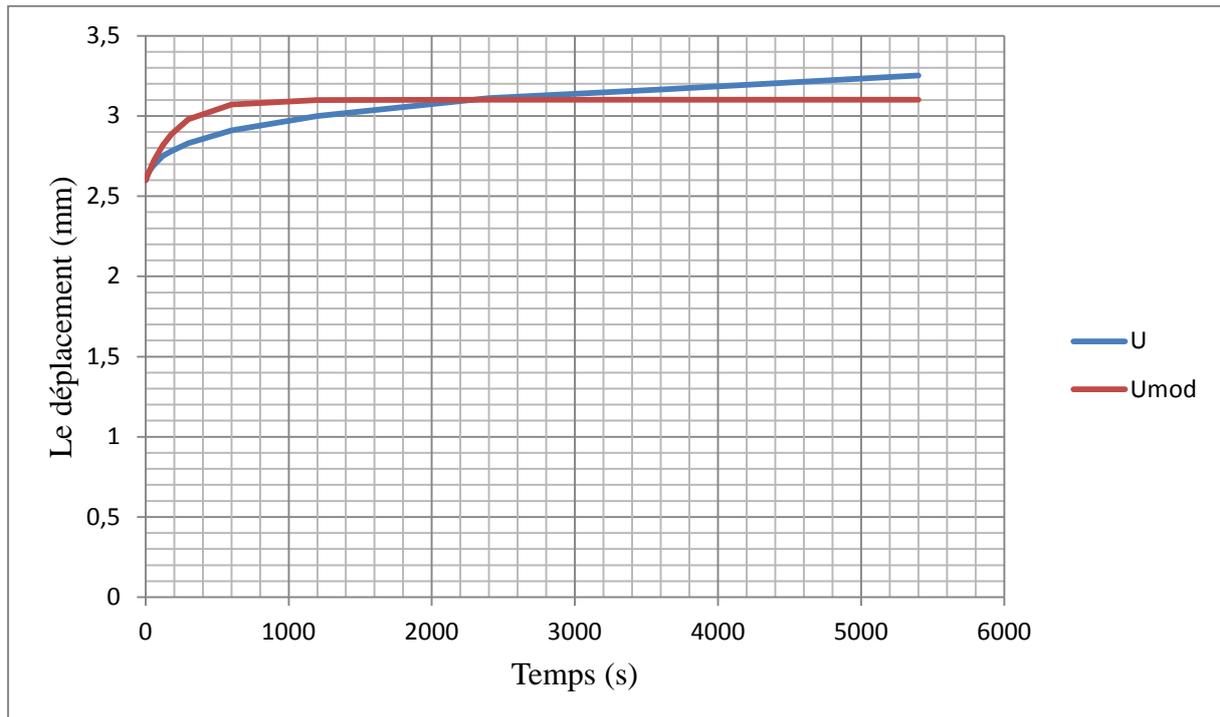


Figure IV. 20 : Courbe de fluage de bois d'olivier sec à partir d'un essai normalisé Test-Modèle en 3Kg.

4.3.1. Comparaison des résultats Test-Modèle

Après la minimisation qui a été faite sous logiciel MATLAB, Les **Figures** de **IV.14** à **IV.20** présentent une confrontation Test-modèle entre le déplacement expérimental et le déplacement du modèle de fluage. On y voit des courbes presque identiques du fluage. Les courbes augmentent ensuite de manière progressive et non-linéaire au cours du régime transitoire. Puis il y a presque un domaine de stabilisation (voir les tableaux en Annexe 03) pour le cas Modèle, par contre on assiste à une augmentation non-linéaire jusqu'à ce que la courbe atteigne sa valeur maximale dans le cas Test. L'écart enregistré entre les courbes expérimentaux et les courbes du modèle est presque très petit quel que soit le chargement.

La **Figure IV.19** montre bien la différence entre la courbe du modèle et la courbe de Test. Dans le cas de modèle, le palier transitoire est plus faible par rapport à celui de cas Test.

Les valeurs des paramètres viscoélastiques (K et μ) après la minimisation sont résumées dans les Tableaux ci-dessous :

Tableau IV. 3 : paramètres viscoélastiques (K et μ) de l'essai normalisé

| Charge | 3Kg | |
|------------|---------|---------------|
| Paramètres | K (MPa) | μ (MPa.s) |
| Valeurs | 1.6 e4 | 1.1 e7 |

Tableau IV. 4: paramètres viscoélastiques (K et μ) des autres essais

❖ Bois d'olivier humide :

| Charge | 3Kg | | 5Kg | |
|------------|---------|---------------|---------|---------------|
| Paramètres | K (MPa) | μ (MPa.s) | K (MPa) | μ (MPa.s) |
| Valeurs | 1.29 e4 | 1.091 e7 | 1.6 e4 | 0.8188888 e7 |

❖ Bois d'olivier sec :

| Charge | 3Kg | | 5Kg | |
|------------|------------|---------------|------------|---------------|
| Paramètres | K (MPa) | μ (MPa.s) | K (MPa) | μ (MPa.s) |
| Valeurs | 2.33905 e4 | 0.99999958 e7 | 1.65432 e4 | 2.78978468 e7 |

❖ Bois de hêtre :

| Charge | 3Kg | | 5Kg | |
|------------|------------|---------------|------------|---------------|
| Paramètres | K (MPa) | μ (MPa.s) | K (MPa) | μ (MPa.s) |
| Valeurs | 3.39909 e4 | 0.87899858 e7 | 1.98909 e4 | 0.4998185 e7 |

En conclusion, même si le modèle sous-estime faiblement les résultats expérimentaux, les résultats restent très proches et le modèle peut être jugé pertinent, du moins sur le plan qualitatif. Il convient de prévoir des modèles généralisés pour obtenir des résultats pertinents mais avec l'inconvénient d'augmenter le nombre de paramètres.

Conclusion générale & perspectives de recherche

Conclusion générale & perspectives de recherche

En guise de conclusion, ce projet de fin d'étude a permis de mettre en pratique nos compétences multidisciplinaires, acquises pendant nos cinq années de formation universitaire, que nous espérons ont fort bien ajouté un plus au domaine de recherche scientifique et à l'université Mohammed Seddik Benyahia, Jijel, qui nous a proposé ce sujet.

L'objectif principal de ce projet est l'étude du fluage en flexion du matériau bois. De ce fait, nous avons réalisé une machine d'essai de fluage pour l'étude expérimentale. Des essais de fluage en flexion ont été conduits sur deux espèces du bois : le bois d'olivier et le hêtre. Ensuite un modèle rhéologique existant a été adopté pour représenter le comportement viscoélastique du bois. Puis les paramètres viscoélastiques ont été identifiés. Enfin, les résultats test-modèle sont confrontés et commentés.

A travers ce travail nous avons étudié dans un premier temps, le matériau bois et ses caractéristiques en générale, puis on a vu le phénomène du fluage et comment ça se déroule réellement, et après suite à la nécessité d'utiliser une machine de fluage, nous avons réalisé une petite machine pour faire nos essais. La conception de la machine de fluage est faite également sous le logiciel Solidworks. On y ajoute le recours au logiciel Matlab pour l'identification des paramètres du modèle.

Notre étude a donc été basée sur la modélisation rhéologique d'un essai de fluage viscoélastique du bois d'olivier. L'évolution du déplacement au cours du temps a été suivie. Les courbes temps-déplacements sont tracées et la confrontation des résultats test-modèle, montre une très bonne approximation.

Nous pouvons également ajouter que ce travail nous a permis d'avoir des compétences professionnelles dont le travail en groupe, la patience et la persévérance et d'échanger des informations avec le personnel qui nous a guidé vers un esprit de traitement des problèmes plutôt pratique que purement académique.

C'est ainsi que nous avons vécu une expérience très pertinente dans le domaine des matériaux polymériques. Cette vision globale qui nous a apporté cette expérience sera sans aucun doute un atout dans nos futures expériences professionnelles.

Les résultats étant convaincants, le projet est apte d'être évolutif mais il reste toujours ajustable, car il n'y a pas des limites en termes de science.

Références bibliographique

- [1] **P. TRIBOULOT / B. REITZ**, Le bois dans le contexte des matériaux de construction, Bois et Environnement, Préparation de la conférence nationale CNDB sur les thèmes environnementaux, 1999/2000.
- [2] **PICON (A.)**, L'Art de l'ingénieur, constructeur, entrepreneur, inventeur, Éditions du Moniteur, 1997 (ISBN : 2858509115).
- [3] **GORDON (J.E.)**, Structures et matériaux, l'explication mécanique des formes, Pour la Science Belin Éd., 1994.
- [4] <https://pdfslide.tips/documents/leboispartie.html>
- [5] **Dr. GHOMARI Fouad**, Science des matériaux de construction, de l'université Aboubekr BELKAID - Faculté des sciences de l'ingénieur département de génie civil.
- [6] **THIBAUD Surini**, Technologie du bois, La composition chimique du bois, le 26 septembre 2010.
- [7] **C. Hazard, J.-P. Barette et J. Mayer**, Mémotech Bois et Matériaux Associés, Paris, Éditions Casteilla, 1996, 455 p. (ISBN 2-7135-1645-5).
- [8] **MOHSSINE MOUTEE**, Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage, Aout 2006.
- [9] **YAHYAOUI Imen**, Contribution au suivi par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois, 21/12/2017.
- [10] **Hearmon, R.F.S**, The elasticity of wood and plywood, Forest Products Research, Dept. of Sci, Indust. Research, Special report No.7, London, pp. 4-45, 1948.
- [11] **Thunell, B**, Über die Elastizität schwedischen Kiefernholzes, Holz Roh- Werkst. 1:15-18, 1941.

[12] **Ylinen, A**, The influence of latewood ratio and density on strength and elastic properties of softwood, *Acta forestalia fennica*, 50: 5-30, 1942.

[13] **Sulzberger, P.H**, The effect of temperature on the strength of wood. *Aeron. Res. Cons. Comm. Rep. ACA-46*, Melbourne, 1953.

[14] **Sano, E**, Effects of temperature on the mechanical properties of wood. I. Compression parallel-to-grain, *Mokuzai Gakkaishi* 7(4):147-150, 1961.

[15] **Gerhards, C.C**, Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: An analysis of immediate effects. *Wood Fiber* 14(1):4-36, 1982.

[16] **Takemura, T**, on the memory effect of wood during drying. IV. Prediction of drying stresses of a board. *Mokuzai Gakkaishi* 18(3):105-114, 1972.

[17] **Kawai, S**, Computation of drying stresses resulting from moisture gradients in wood during drying. I- computative method. *Mokuzai Gakkaishi* 25(2):103-110, 1979.

[18] **Goulet, M. et Ouellet, E**, Effet de la teneur en humidité du bois sur sa résistance à l'attraction transversale. Notes de recherches n° 1, Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval, Ste-Foy. 17p, 1968.

[19] **Schlyter, R. et Winberg, G**, Svenskt furuvirkes hallfasthetsegenskaper och deras beroende av fuktighetshalt och volymvikt. *Stat. Provningsanst. Medd.* 42, Stockholm, 1929.

[20] **Lessard, R.A**, Modeling and controlling the lumber drying process. Ph.D dissertation, Univ, of New Hampshire, UMI Dissertation Information Service, Ann Arbor, Mich. 48106, 1978.

[21] **SIMON Pierre**, Approche multi-échelle du comportement mécanique du bois dans le plan transverse, 2009.

[22] **Haque, M.N**, Model fitting for viscoelastic creep of *Pinus radiata* during kiln drying. *Wood Sci. Technol.* 34:447-457, 2000.

[23] **Mårtensson, A**, Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variations. Thesis, Lund Institute of Technology (THL), Departement of Structural Engineering, Lund, 175 p/

Hanhijärvi, A. 1999. Deformation properties of Finnish spruce and pine wood in tangential and radial directions in association to high temperature drying. Part II. Experimental results under constant conditions (viscoelastic creep). Holz Roh- Werkst. 57:365- 372, 1992.

[24] **Zhuoping, S**,The variable parameter rheological model of wood. Wood Sci,Technol. 39(1):19-26, 2005.

[25] **LAOUINI Abdeljalil**, Réalisation d'un appareil de fluage des métaux, le 26 juin 2012.

[26] Propriétés des matériaux sur logiciel SOLIDWORKS.

[27] **BOUHAMED NESRINE**, Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de farine de bois d'olivier, Thèse de doctorat, Université de Sfax (Tunisie), 2020.

[28] **MOHSSINE MOUTEE, YVES FORTIN, MARIO FAFARD**, A global rheological model of wood cantilever as applied to wood drying, Wood Science and technology 41(3), 209, 2007.

Annexe 01

Les mises en plan

Annexe 02

Tableau 1 : Déplacement et module de Young en 3Kg

| Charge (Kg) | 3 (Kg) | | | | | |
|--------------------|-----------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------|---------------|
| Bois | Olivier humide | | Olivier sec | | hêtre | |
| Temps (s) | U(mm) | E(MPa) | U(mm) | E(MPa) | U(mm) | E(MPa) |
| 0 | 0.9 | 6435.2 | 0.85 | 6813.7 | 0.65 | 8910.2 |
| 10 | 0.98 | 5909.8 | 0.91 | 6364.4 | 0.7 | 8273.8 |
| 20 | 1 | 5791.6 | 0.919 | 6302.1 | 0.715 | 8100.2 |
| 40 | 1.02 | 5678.1 | 0.93 | 6227.6 | 0.73 | 7933.8 |
| 60 | 1.035 | 5595.8 | 0.94 | 6161.3 | 0.74 | 7826.5 |
| 120 | 1.065 | 5438.2 | 0.95 | 6096.5 | 0.76 | 7620.6 |
| 180 | 1.08 | 5362.6 | 0.97 | 5970.8 | 0.77 | 7521.6 |
| 300 | 1.115 | 5194.3 | 0.99 | 5850.1 | 0.785 | 7377.9 |
| 600 | 1.155 | 5014.4 | 1.02 | 5678.1 | 0.8 | 7239.6 |
| 1200 | 1.235 | 4689.6 | 1.06 | 5463.8 | 0.82 | 7063 |
| 2400 | 1.31 | 4421.1 | 1.101 | 5260.3 | 0.842 | 6878.4 |
| 3600 | 1.375 | 4212.1 | 1.13 | 5125.3 | 0.855 | 6773.8 |
| 3610 | 0.445 | / | 0.22 | / | 0.11 | / |
| 3620 | 0.43 | / | 0.212 | / | 0.1 | / |
| 3640 | 0.405 | / | 0.202 | / | 0 | / |
| 3660 | 0.39 | / | 0.198 | / | 0 | / |
| 3720 | 0.365 | / | 0.18 | / | 0 | / |
| 3780 | 0.355 | / | 0.17 | / | 0 | / |
| 3900 | 0.315 | / | 0.165 | / | 0 | / |
| 4200 | 0.3 | / | 0.14 | / | 0 | / |
| 4800 | 0.26 | / | 0.1 | / | 0 | / |
| 6000 | 0.245 | / | 0.07 | / | 0 | / |
| 7200 | 0.22 | / | 0.04 | / | 0 | / |

Tableau 2 : Déplacement et module de Young en 5Kg

| Charge (Kg) | 5 (Kg) | | | | | |
|--------------------|-----------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------|---------------|
| Bois | Olivier humide | | Olivier sec | | hêtre | |
| Temps (s) | U(mm) | E(MPa) | U(mm) | E(MPa) | U(mm) | E(MPa) |
| 0 | 1.45 | 6657.1 | 1.4 | 6894.8 | 1.19 | 8111.5 |
| 10 | 1.57 | 6148.2 | 1.52 | 6350.5 | 1.37 | 7045.8 |
| 20 | 1.61 | 5995.5 | 1.54 | 6268 | 1.4 | 6894.8 |
| 40 | 1.66 | 5814.9 | 1.56 | 6187.7 | 1.43 | 6750.2 |
| 60 | 1.69 | 5711.7 | 1.57 | 6148.2 | 1.45 | 6657.1 |
| 120 | 1.745 | 5531.7 | 1.595 | 6051.9 | 1.485 | 6500.2 |
| 180 | 1.79 | 5392.6 | 1.61 | 5995.5 | 1.51 | 6392.5 |
| 300 | 1.835 | 5260.3 | 1.63 | 5921.9 | 1.532 | 63227 |
| 600 | 1.89 | 5107.3 | 1.668 | 5787 | 1.57 | 6148.2 |
| 1200 | 1.971 | 4897.4 | 1.74 | 5547.6 | 1.61 | 5995.5 |
| 2400 | 2.06 | 4685.8 | 1.838 | 5251.8 | 1.68 | 5745.7 |
| 3600 | 2.12 | 4553.2 | 1.915 | 5040.6 | 1.69 | 5711.7 |
| 3610 | 0.65 | / | 0.49 | / | 0.39 | / |
| 3620 | 0.62 | / | 0.41 | / | 0.38 | / |
| 3640 | 0.59 | / | 0.39 | / | 0.365 | / |
| 3660 | 0.565 | / | 0.368 | / | 0.355 | / |
| 3720 | 0.53 | / | 0.34 | / | 0.325 | / |
| 3780 | 0.51 | / | 0.32 | / | 0.3 | / |
| 3900 | 0.48 | / | 0.3 | / | 0.26 | / |
| 4200 | 0.46 | / | 0.27 | / | 0.24 | / |
| 4800 | 0.415 | / | 0.235 | / | 0.235 | / |
| 6000 | 0.34 | / | 0.2 | / | 0.23 | / |
| 7200 | 0.31 | / | 0.17 | / | 0.22 | / |

Tableau 3 : Déplacement et module de Young (éprouvette normalisé) en 3Kg

| Charge (Kg) | 3 (Kg) | |
|--------------------|--------------------|---------------|
| Bois | Olivier Sec | |
| Temps (s) | U(mm) | E(MPa) |
| 0 | 2.6 | 9624.8 |
| 10 | 2.62 | 9551.3 |
| 20 | 2.65 | 9443.2 |
| 40 | 2.675 | 9355 |
| 60 | 2.695 | 9285.5 |
| 120 | 2.75 | 9099.8 |
| 180 | 2.78 | 9001.6 |
| 300 | 2.83 | 8842.6 |
| 600 | 2.91 | 8599.5 |
| 1200 | 3 | 8341.5 |
| 2400 | 3.11 | 8046.5 |
| 3600 | 3.165 | 7906.6 |
| 5400 | 3.253 | 7692.7 |
| 5410 | 0.7 | / |
| 5420 | 0.65 | / |
| 5440 | 0.63 | / |
| 5460 | 0.6 | / |
| 5520 | 0.59 | / |
| 5580 | 0.56 | / |
| 5700 | 0.54 | / |
| 6000 | 0.52 | / |
| 6600 | 0.49 | / |
| 6800 | 0.44 | / |
| 7800 | 0.39 | / |
| 9000 | 0.3 | / |
| 10800 | 0.24 | / |

Annexe 03

Tableau 1 : Déplacement expérimental et déplacement de modèle en 3Kg.

| Charge (Kg) | 3 (Kg) | | | | | |
|--------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------|----------------------------|
| Bois | Olivier humide | | Olivier sec | | Hêtre | |
| Temps (s) | U(mm) | U_{mod}(mm) | U(mm) | U_{mod}(mm) | U(mm) | U_{mod}(mm) |
| 0 | 0.9 | 0.89999 | 0.85 | 0.849997 | 0.65 | 0.649998 |
| 10 | 0.98 | 0.905268 | 0.91 | 0.855721 | 0.7 | 0.656461 |
| 20 | 1 | 0.910483 | 0.919 | 0.861313 | 0.715 | 0.662679 |
| 40 | 1.02 | 0.92073 | 0.93 | 0.872113 | 0.73 | 0.674416 |
| 60 | 1.035 | 0.930738 | 0.94 | 0.882418 | 0.74 | 0.68528 |
| 120 | 1.065 | 0.95938 | 0.95 | 0.910594 | 0.76 | 0.713256 |
| 180 | 1.08 | 0.98606 | 0.97 | 0.935081 | 0.77 | 0.735439 |
| 300 | 1.115 | 1.1281 | 0.99 | 0.974856 | 0.785 | 0.766976 |
| 600 | 1.155 | 1.034064 | 1.02 | 1.036753 | 0.8 | 0.803644 |
| 1200 | 1.235 | 1.1240311 | 1.06 | 1.082648 | 0.82 | 0.81874 |
| 2400 | 1.31 | 1.322663 | 1.101 | 1.096699 | 0.842 | 0.820369 |
| 3600 | 1.375 | 1.342591 | 1.13 | 1.097548 | 0.855 | 0.820385 |

Tableau 2 : Déplacement expérimental et déplacement de modèle en 5Kg.

| Charge (Kg) | 5 (Kg) | | | | | |
|--------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------|----------------------------|
| Bois | Olivier humide | | Olivier sec | | Hêtre | |
| Temps (s) | U(mm) | U_{mod}(mm) | U(mm) | U_{mod}(mm) | U(mm) | U_{mod}(mm) |
| 0 | 1.45 | 1.449994 | 1.4 | 1.399994 | 1.19 | 1.189995 |
| 10 | 1.57 | 1.461667 | 1.52 | 1.403444 | 1.37 | 1.208928 |
| 20 | 1.61 | 1.473114 | 1.54 | 1.406873 | 1.4 | 1.227122 |
| 40 | 1.66 | 1.495348 | 1.56 | 1.413671 | 1.43 | 1.261409 |
| 60 | 1.69 | 1.516731 | 1.57 | 1.420389 | 1.45 | 1.293073 |
| 120 | 1.745 | 1.576085 | 1.595 | 1.440071 | 1.485 | 1.374257 |
| 180 | 1.79 | 1.628874 | 1.61 | 1.459065 | 1.51 | 1.438197 |
| 300 | 1.835 | 1.717578 | 1.63 | 1.495085 | 1.532 | 1.528216 |
| 600 | 1.89 | 1.866479 | 1.668 | 1.57468 | 1.57 | 1.630711 |
| 1200 | 1.971 | 1.995442 | 1.74 | 1.697067 | 1.61 | 1.671184 |
| 2400 | 2.06 | 2.047741 | 1.838 | 1.84289 | 1.68 | 1.675242 |
| 3600 | 2.12 | 2.052755 | 1.915 | 1.914468 | 1.69 | 1.675276 |

**Tableau 3 : Déplacement expérimental et déplacement de modèle (éprouvette normalisé)
en 3Kg**

| Charge (Kg) | 3 (Kg) | |
|--------------------|--------------------|----------------------------|
| Bois | Olivier Sec | |
| Temps (s) | U(mm) | U_{mod}(mm) |
| 0 | 2.6 | 2.599999 |
| 10 | 2.62 | 2.623063 |
| 20 | 2.65 | 2.645064 |
| 40 | 2.675 | 2.68607 |
| 60 | 2.695 | 2.723385 |
| 120 | 2.75 | 2.816352 |
| 180 | 2.78 | 2.8864 |
| 300 | 2.83 | 2.978947 |
| 600 | 2.91 | 3.070973 |
| 1200 | 3 | 3.098749 |
| 2400 | 3.11 | 3.098749 |
| 3600 | 3.165 | 3.100489 |
| 5400 | 3.253 | 3.100489 |

Résumé

Actuellement, les secteurs industriel et mécanique des matériaux subissent un développement très prononcé alors que l'utilisation des éco-matériaux dans le domaine mécanique ne cesse de croître. Notre thème est axé sur l'étude de fluage en flexion du matériau bois en termes de comportement viscoélastique. D'abord, nous avons réalisé une machine sur laquelle des essais de fluage en flexion sont conduits. Ensuite, un modèle rhéologique viscoélastique est adopté. Les paramètres du modèle sont identifiés au moyen d'une méthode par analyse inverse. Enfin, une confrontation des résultats Test-Modèle a été effectuée. En conclusion, la comparaison montre une cohérence satisfaisante entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle.

Abstract

Currently, the industrial sectors and mechanics of materials are clearly evolving while the use of the pro-ecology materials continues to grow. Our theme is directed towards the fleece in flexion of wood material in terms of viscoelastic behavior. First of all, we have made a machine in which the fleece trials have been done. Then, a rheological viscoelastic model has been adopted. The model's parameters have been identified by reverse-analytical method. Finally, a confrontation of Test-Model results has been effected. In conclusion, the comparing shows a satisfied coherence between the experimental results and those of the model.

تلخيص

حاليا تشهد قطاعات الصناعة وميكانيكا المواد تطورا واضحا للغاية، بينما يستمر استعمال المواد الصديقة للبيئة في النمو، يركز موضوعنا على دراسة الزحف في انحناء مادة الخشب من حيث السلوك الفيسكو-إيلاستيكي. بداية، قمنا بصنع آلة لاجراء التجارب بوسطتها. وبعد ذلك، تم اعتماد نموذج ريولوجي فييسكو-إيلاستيكي. حددت خصائص النموذج بواسطة طريقة التحليل العكسي. وأخيرا، تم اجراء مقارنة بين نتائج التجارب و النموذج. وفي الخلاصة، يظهر الفرق ترابطا منطقيا بين نتائج التجارب و النتائج الخاصة بالنموذج.