

Travaux Pratiques de Matériaux de Construction

BOIS

Responsable : Jean Rego

Email : jean.rego@epfl.ch

Bureau : MXG 240

TP Bois

Études des propriétés hygroscopiques et mécaniques du bois.

Résumé

Le but de ce TP est d'étudier la résistance et la déformabilité du bois en fonction de son humidité, de la direction de coupe (tangentielle, radiale et longitudinale) et de l'essence (chêne/hêtre et pin/épicéa).

On commencera donc par étudier les propriétés hygroscopiques du bois c'est-à-dire comment son humidité et sa porosité évoluent en fonction de 6 niveaux d'humidité différentes.

Ensuite les résistances en compression, flexion et traction seront mesurées sur une essence de feuillu et une essence de résineux pour trois niveaux d'humidité relative différentes et en fonction de la direction de la coupe.

Organisation de la séance

Le TP est divisé en 5 parties. La partie consacrée au retrait/gonflement du bois est effectuée en commun, sa durée s'étale sur l'ensemble de la séance. Les autres parties sont exécutées selon l'ordre de roulement indiqué dans la table 1 et en autonomie : les assistants ne sont pas là que pour aider, pas pour effectuer le travail à votre place.

Chaque demi-groupe doit rendre les réponses **au questionnaire à la fin du la séance**.

	Groupe 1A	Groupe 1B	Groupe 2A	Groupe 2B
Retrait/Gonflement	1	1	1	1
Densité/Humidité	2	3	4	5
Compression	3	4	5	2
Traction	4	5	2	3
Flexion	5	2	3	4

Table 1

Propriétés hygroscopiques

Le bois est un matériau poreux qui contient de l'eau. L'eau se présente sous deux formes distinctes : l'eau *capillaire* et l'eau *liée*.

L'eau capillaire (également appelée eau libre) a des propriétés thermodynamiques quasi-identiques à celles de l'eau liquide. Son influence sur les propriétés mécaniques (retrait/gonflement, résistance ...) du bois est quasi-négligeable. Son principal impact concerne la masse volumique du bois.

L'eau liée (également appelée eau hygroscopique) se trouve au niveau des parois cellulaires. Ces molécules d'eau sont liées à la matrice solide. Macroscopiquement, cela se traduit par une pression de vapeur d'équilibre inférieure à la pression de vapeur saturante et par des variations dimensionnelles (retrait/gonflement) en fonction de la teneur en eau.

Concrètement, dans le domaine hygroscopique, si un échantillon de bois est conservé dans une ambiance où la température et l'humidité relative sont maintenues constantes, l'humidité du bois va se stabiliser et converger vers une valeur appelée humidité d'équilibre. Il y a donc équilibre entre l'humidité H et l'humidité relative HR de l'air dans lequel il est conservé. Ces valeurs ne sont jamais égales sauf à 0% évidemment. Noter qu'en pratique les textes confondent souvent les termes humidité (du bois) avec humidité (relative) car le contexte est censé être clair.

1. Humidité et masse volumique

1.1 Définitions

Humidité

L'humidité H , encore appelée la teneur en eau du bois, est définie comme le rapport entre la masse de l'eau, m_{eau} , que contient un échantillon de bois et la masse de cet échantillon à l'état sec, $m_{anhydre}$:

$$H [\%] = \frac{m_{eau}}{m_{anhydre}} \times 100 \quad (1)$$

L'humidité H d'un bois humide se reformule donc selon la relation suivante où m_{humide} est la masse du bois humide :

$$H [\%] = \frac{m_{humide} - m_{anhydre}}{m_{anhydre}} \times 100 \quad (2)$$

Cette valeur peut éventuellement être supérieure à 100%.

Massé volumique

Contrairement aux autres matériaux la masse et le volume du bois varient significativement en fonction de sa teneur en eau et donc de l'humidité (relative). La masse volumique d'une essence de bois n'est donc définie que si l'on précise l'humidité à laquelle elle a été mesurée. Généralement, on définit la masse volumique à l'humidité H , ρ_H , la masse volumique anhydre, $\rightarrow 0$ et la masse volumique basale, $\rightarrow b$:

$$\rho_H = \frac{m_{Humide}}{V_{humide}} \times 100 \quad (3)$$

Où m_{humide} et V_{humide} sont respectivement la masse et le volume à l'humidité H .

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad (4)$$

Où m_0 et V_0 sont respectivement la masse et le volume à l'état anhydre (HR = 0 [%]).

$$\rho_b = \frac{m_0}{V_{sat}} \quad (5)$$

Où V_{sat} est le volume à l'état saturé.

Essence	HR [%]	$m_{anhydre}$ [g]	m_{humide} [g]	H [%]	Volume [cm ³]	ρ_H [g/cm ³]	Porosité [%]
Résineux	0						
	11						
	33						
	53						
	75						
	98						
Feuillu	0						
	11						
	33						
	53						
	75						
	98						

Table 2

Porosité à l'état sec

À l'état anhydre, la porosité est définie comme le rapport entre le volume des vides contenus dans le bois, V_{pores} et le volume total du bois, $V_{anhydre}$:

$$p = \frac{V_{pores}}{V_{anhydre}} \quad (6)$$

Notons que la masse volumique, ρ_s , de la matière constitutive du bois est quasiment constante quelle que soit l'essence de bois considéré. Dès lors, il est possible d'estimer la porosité, p , du bois à partir de l'équation suivante :

$$p[\%] = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_s} \times 100 \quad (7)$$

Où ρ_s est la masse volumique des parois cellulaires (1500 kg.m^{-3})

1.2 Travail demandé

Dans cette partie l'humidité et la porosité d'un feuillu (chêne ou hêtre) et d'un résineux (épicéa ou pin) sont étudiées en fonction de l'humidité relative.

Pour une même essence, 6 échantillons ont été préalablement séchés, leur masse à l'état anhydre a été mesurée et inscrite à leur surface. A l'issue de cette phase de séchage, ces échantillons ont été conservées à des températures et à des humidités relatives différentes. À la date du TP, ils ont atteint leur équilibre hygroscopique. Une balance et un pied à coulisse (figure 7) sont mis à votre disposition pour effectuer les mesures. Mettez des gants pour manipuler puis aider vous des formules de la partie définition ci-dessus pour :

- Calculer l'humidité (ou la teneur en eau), H , des différents échantillons. Lors des pesées, veiller à laisser les échantillons un minimum de temps en milieu extérieur (1 et 2).
- Calculer la masse volumique à l'humidité des différents échantillons (3 à 5).
- Calculer la porosité moyenne de chaque essence (6 et 7).
- Tracer l'isotherme de sorption (Humidité d'équilibre en ordonnées en fonction de l'humidité relative en abscisse) de chaque essence sur le papier millimétrique en figure 10.

2 Humidité et retrait/gonflement du bois

2.1 Définitions

Lorsqu'une éprouvette de bois se trouve dans le domaine hygroscopique, les variations d'humidité engendrent des variations dimensionnelles à travers le phénomène de retrait/gonflement. Ces variations dimensionnelles sont mesurées à l'aide d'un bâti de retrait tel que représenté sur la figure 1.



Figure 1 – Bâti de retrait (à gauche) et zoom associé.

Retrait volumique et retrait linéique

Le retrait volumique total R_v est défini à partir des mesures de dimensions relevées à l'état saturé et à l'état anhydre. Il est défini par l'équation suivante :

$$R_v [\%] = \frac{V^s - V^0}{V^s} \times 100 \quad (8)$$

Où V^s et V^0 sont respectivement le volume saturé et anhydre de l'échantillon de bois.

Le retrait linéique doit être indiqué par la direction matérielle. Les indices r , t , l réfèrent respectivement à la direction radial, tangentielle et longitudinal :

$$L_r [\%] = \frac{L_r^s - L_r^0}{L_r^s} \times 100 \quad L_t [\%] = \frac{L_t^s - L_t^0}{L_t^s} \times 100 \quad L_l [\%] = \frac{L_l^s - L_l^0}{L_l^s} \times 100 \quad (9)$$

Gonflement volumique et gonflement linéique

Le gonflement est défini de manière symétrique au retrait. Cependant dans le cas du gonflement, les dimensions anhydres sont définies comme longueurs de référence (et apparaissent donc au dénominateur des formules associées). Ainsi, les gonflements volumiques et linéiques sont définis par les équations suivantes :

$$G_v [\%] = \frac{V^s - V^0}{V^0} \times 100 \quad (10)$$

$$L_r [\%] = \frac{L_r^s - L_r^0}{L_r^0} \times 100 \quad L_t [\%] = \frac{L_t^s - L_t^0}{L_t^0} \times 100 \quad L_l [\%] = \frac{L_l^s - L_l^0}{L_l^0} \times 100 \quad (11)$$

2.2 Travail demandé

Dans cette partie, 6 échantillons de bois, d'une même essence, sont étudiés :

2 sont destinées à l'étude du retrait radial, 2 au retrait tangentiel et 2 au retrait longitudinal.

Trois éprouvettes ont été conservées à $HR = 100\%$ et trois éprouvettes à $HR = 0\%$. À l'aide des bâts de retrait, mesurez l'évolution du retrait et du gonflement.

- Mesurer la longueur initiale, l_0 en plaçant les éprouvettes sur les bâts de retrait entre les pointes (cf figure 1).
- Vérifier qu'il y ait assez de marge pour le senseur
- Relever la valeur affichée par les comparateurs notée d_i .
- Intervenir les ambiances de conservations des éprouvettes.
- Relever la valeur affichée par les comparateurs à la fin de la séance de TP notée d_f .
- Calculer le retrait et le gonflement radial, tangentiel, longitudinal.

	Direction		
	Longitudinale	Radiale	Tangentielle
$d_i (\mu m)$			
$d_f (\mu m)$			
Gonflement (%)			
	Longitudinale	Radiale	Tangentielle
$d_i (\mu m)$			
$d_f (\mu m)$			
Retrait (%)			

Tableau 3

Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du bois sont affectées de façon très significative par l'humidité relative ainsi que la direction de la coupe (longitudinale, radiale ou tangentielle).

De manière générale les facteurs influençant la résistance sont les suivants :

- L'essence du bois
- La texture
- La teneur en eau
- La densité
- L'orientation des fibres par rapport à la direction de l'effort.

Les valeurs de la résistance sont en général déterminées au moyen d'échantillons de faibles dimensions, façonnées avec soin et sans défaut. Les valeurs obtenues sont donc optimales. Les charges de rupture effectives sont souvent inférieures à celles déterminées en laboratoire. Cela est dû principalement aux défauts ou irrégularités de croissance. La forme et la grandeur des échantillons jouent également un rôle important. Plus la section est grande, plus la probabilité de rencontrer un défaut augmente et plus la résistance a de chance de diminuer.

3 Résistance en compression

Buts et tâches de cette partie

Les buts de cette partie sont d'étudier la résistance à la compression de deux essences en fonction de l'humidité relative, d'acquérir le savoir-faire pour réaliser un essai de compression et de savoir interpréter un faciès de rupture. Les tâches à exécuter sont donc :

- De réaliser 6 essais de compression sur éprouvettes coupées en tangentialles : trois humidités relatives données (0%, 75% et 100%) sur deux essences (un résineux et un feuillu). Reportez les valeurs obtenues dans le tableau 3.
- Un essai de compression sur un cube coupé en radial mais à la même vitesse que pour les 6 premières éprouvettes
- Un essai de compression sur une éprouvette de hêtre saturée mais à une vitesse de 1 tour en 10 minutes
- D'observer le faciès de rupture dans chaque cas et de commenter.

Questions que vous devrez discuter

- Quelle essence est la plus résistante ? Pourquoi ? Pouvait-on s'y attendre ?
- Comment évolue la résistance avec l'humidité relative ? Pourquoi ?
- Idem selon la direction tangentielle ou longitudinale
- Doit-on s'attendre à ce que la vitesse de chargement influe sur la résistance maximale de rupture ?
- Pourquoi ? Justifier votre réponse en faisant appel à vos connaissances sur la microstructure du bois.
- Quelles sont les différents faciès de rupture envisageables ? A quoi pourrait-on s'attendre ici ? Quel faciès obtient-on et pourquoi ?

Présentation de la machine d'essai de compression

La machine de compression est présentée sur la figure 2

Protocole expérimental

Lisez intégralement le protocole puis reprenez le pas à pas pour chaque essai.

- Marquer les échantillons de leurs nom et humidité relative d'équilibre
- Repérez l'emplacement de la machine de compression grâce à la figure 2.
- Déterminer puis placer le bon cadran (connaissant l'ordre de grandeur de la résistance mécanique du bois, vu la section des échantillons et vu le choix de cadran possible vous pouvez déterminer l'ordre de grandeur de la force en kN à laquelle on s'attend (utiliser Wikipédia si nécessaire)). Pour changer le cadran dévissez les vis de fixation de l'appareil de mesure de la vitesse de rotation.
- Placer l'appareil de mesure de la vitesse de rotation, allumer le avec l'interrupteur.
- Centrer sur zéro l'aiguille noire avec le bouton de réglage normal puis la rouge à la main
- S'assurer que la bonne machine a été sélectionnée avec la manivelle intermédiaire
- Ouvrir la fenêtre et s'assurer que le vérin est bien en bas pour ne pas avoir à interrompre l'essai

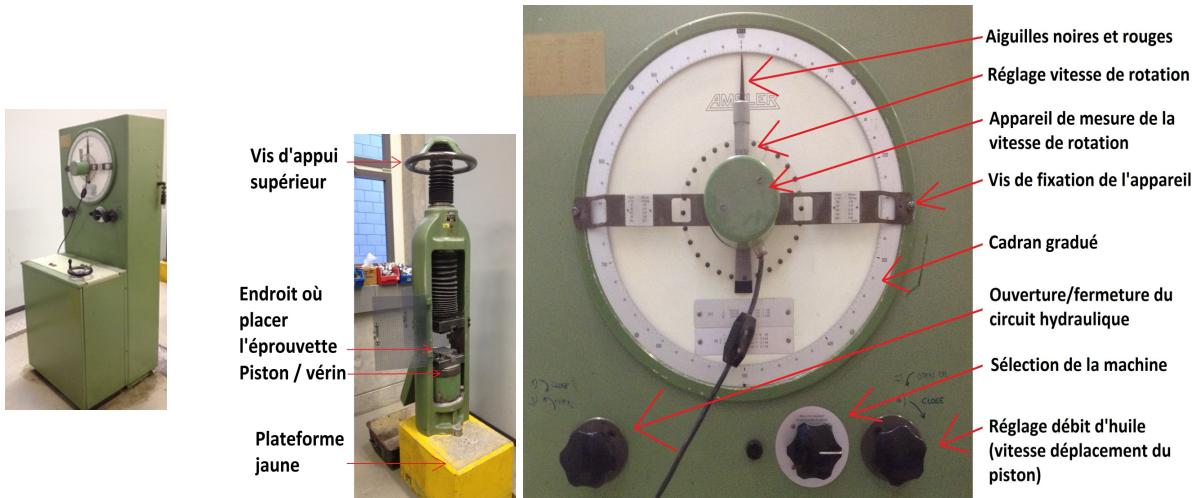


Figure 2 – Machine de compression. A gauche partie commandes, au centre partie presse et à droite zoom sur le cadran

- Placer l'éprouvette sur le piston
- Avec la vis d'appui supérieur établir le contact sans forcer (n'hésitez pas à monter sur la plateforme jaune)
- Lancer l'appareil de mesure des tours minutes sur la vitesse de rotation voulue de 2 tour /min (à l'aide la vis micrométrique de réglage)
- Appeler un assistant
- Appuyer sur le bouton pompe vert sur le côté de la machine en ayant pris soin de laisser ouvert le circuit (manivelle de gauche) et fermé le débit (manivelle de droite)
- Fermer le circuit hydraulique
- Ouvrir le débit lentement (commencer avec un demi-tour puis adapter en fonction) puis suivez l'évolution de la contrainte mécanique de façon à caler le débit sur la vitesse de rotation du disque indicateur. Toujours garder une main sur la manivelle de gauche pour ouvrir le circuit en cas de problème (si la contrainte s'accroît brusquement).
- Garder une main sur chaque manivelle pendant l'essai
- Lorsque la rupture a lieu, l'aiguille rouge marque la force à laquelle elle a eu lieu, tandis que la noire remonte plus ou moins. Observez la façon dont l'aiguille noire remonte (lien avec le caractère fragile/ductile de la fracture)
- Poursuivre la déformation pour bien voir le faciès de déformation (observer-le en train de se former pendant l'essai)

	Humidité 0%	Humidité 75%	Humidité 100%
Résineux			
Feuillu			

Table 4 – Tableau à remplir pour les 6 valeurs de compression obtenues.

4 Résistance à la traction

Cet essai a pour but de déterminer la contrainte de rupture sous une charge de traction progressivement croissante, exercée parallèlement au fil du bois. À titre indicatif, les résistances caractéristiques en traction de l'épicéa et du hêtre sont indiquées dans le Tab. 4 (12%<H<15%)¹.

Essence	Résistance à la traction [MPa] selon le fil
Sapin	85
Hêtre	100

La machine de traction ainsi que les éprouvettes utilisées dans le cadre de ce TP sont représentées sur la figure 3.

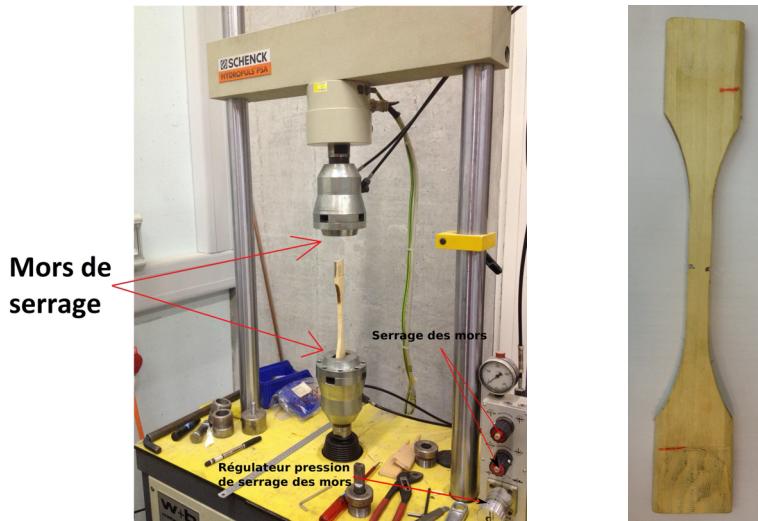


Figure 3 – Machine de traction (à gauche) et éprouvette en os type utilisée dans ce TP (droite)

¹ 1990 Sell et Kropf. Propriétés et caractéristiques des essences de bois
Laboratoire de Matériaux de Construction

Travail demandé

L'échantillon de bois (épicéa ou hêtre) testé a été conservé à une température de 20°C et à une humidité relative moyenne de 75%.

- Avec un pied à coulisse mesurer à mi-longueur de l'éprouvette, l'épaisseur a et la largeur b de la section.
- Allumer l'ordinateur de contrôle avec la clé si pas déjà en marche
- Lancer le logiciel Dion
- Sur la première fenêtre appuyer sur la touche "Entrée"
- Sur le deuxième fenêtre clicker "online" puis cliquer sur I/O EDC
- Régler la pression de serrage Ps des mors (Ps = 90 bars pour l'épicéa, Ps = 110 bars pour le hêtre).
- Mettre en place l'éprouvette sur le châssis de charge. Il faut que l'enfoncement de l'éprouvette soit identique de part et d'autre (mettre une marque au stylo puis mesurer). On veillera à ce que les mors prennent l'éprouvette de traction sur une longueur de 35 mm.
- Locker la partie basse de l'éprouvette
- Utiliser le click droit de la souris pour monter l'éprouvette à la bonne hauteur (faire très attention).
- Appeler l'assistant pour vérifier le tout
- L'assistant vous montrera comment piloter le déplacement du piston du vérin hydraulique. Le serrage des mors s'effectue à l'aide des molettes de serrage (cf. fig. 3).
- Augmenter la charge de traction à vitesse constante de chargement ($v=0.005$ mm/s). Pour cela, cliquer sur le bouton Servo1 (cf. fig. 4). Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur DEPLACEMENT. Aller dans le menu Paramètres puis régler la vitesse.
- Initialiser le déplacement du piston à zéro. Pour cela, aller dans le menu Zéro puis cliquer sur déplacement.
- Avant de procéder à l'essai, appeler l'assistant qui vérifiera que l'essai est correctement mis en place. Cliquer sur le bouton "start" pour commencer.
- Une fois la rupture atteinte cliquer sur stop/stand by
- Déterminer la force Pmax appliquée à la rupture.
- Calculer la contrainte de rupture en traction longitudinale σ_{trL} de l'éprouvette à l'humidité H.
- Fermer la fenêtre, faire un click droit pour redescendre le vérin.
- Enlever l'éprouvette puis observer le faciès de rupture.

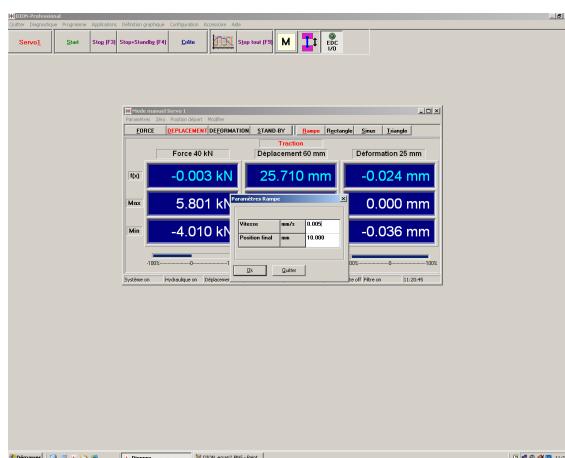


Figure 4 – Capture d'écran du logiciel permettant le contrôle de la machine

Essence	Résistance à la traction (MPa)

5 Résistance en flexion

Cet essai a pour but de mettre en évidence le comportement viscoélastique du bois et de déterminer le module d'élasticité et la contrainte à la rupture sous une charge de flexion. La machine d'essai de flexion trois points à utiliser ainsi que les ustensiles nécessaires à la mesure de la flèche sont représentés sur la figure 5.

À ces fins, un essai de flexion 3 points est réalisé (cf figure 6). Le module d'élasticité en flexion, E , est calculé à partir de la formule suivante :

$$E = \frac{\Delta F}{\Delta f} \cdot \frac{L^3}{48 I} \quad (12)$$

Où F , f , L et I sont respectivement la force appliquée, la flèche à mi-longueur, la distance entre les deux appuis et l'inertie de l'éprouvette ($I = \frac{b \cdot h^3}{12}$).

La contrainte ultime en flexion, σ_f , est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\sigma_f = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (13)$$

où F_{max} est la force maximale à la rupture.

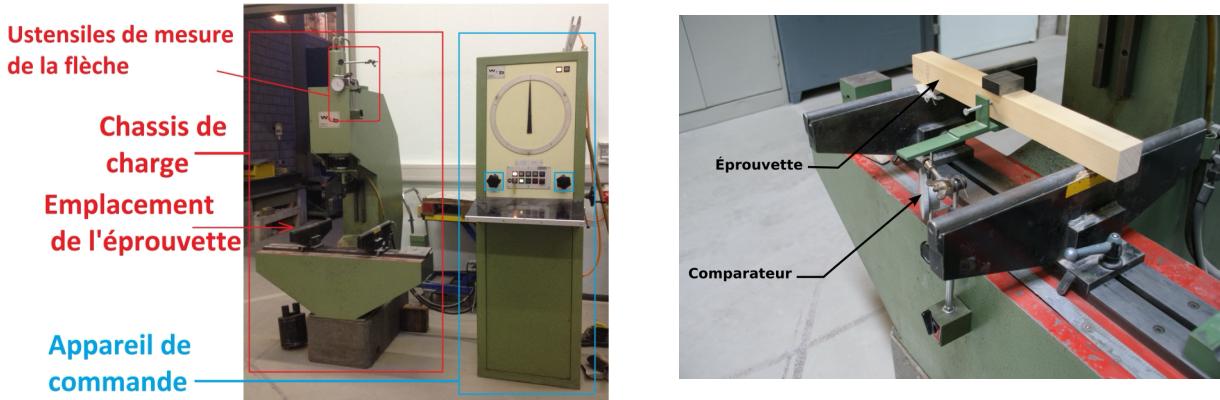


Figure 5 – A gauche : Appareil de mesure de la flexion 3 points

(chassis de charge et appareil de commande associé). A droite : ustensiles nécessaires pour mesurer la flèche de l'éprouvette représentée en haut.

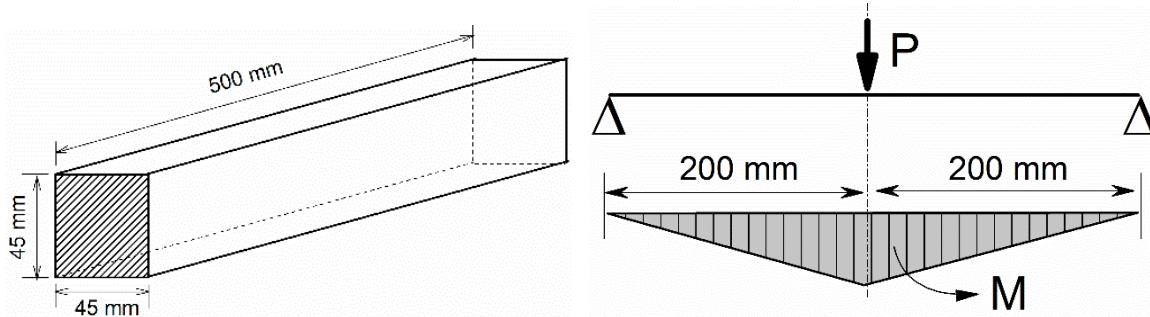


Figure 6 – Essai de flexion 3 points.

Travail demandé

L'échantillon de bois (épicéa ou hêtre) à tester a été conservé à une température de 20°C et à une humidité relative moyenne de 75%.

- Mesurer les dimensions de l'éprouvette et tracer l'axe neutre
- Mettre en place l'éprouvette sur le châssis de charge, positionner le dispositif de mesure de la flèche (cf figure 5). Inutile de faire le zéro.
- Placer une petite plaque en métal entre le point d'appui central et l'éprouvette pour éviter une concentration de contrainte
- Pré-charger l'éprouvette à 1kN. Appeler un assistant pour cette partie
- Charger l'éprouvette à différents paliers selon les instructions du tableau 4. Mesurer la flèche pour chaque palier.
- Calculer le module d'élasticité de l'éprouvette.
- Enlever la mesure de dispositif de la flèche. Appeler un assistant. Charger l'éprouvette jusqu'à la rupture.
- Calculer la contrainte de rupture en flexion, (J_f de l'éprouvette à l'humidité H).

Essence	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la flexion (MPa)

6 Annexes

Palier	Effort [kN]	Temps de maintien (s)	Flèche (mm)
1	1	1	
3	2.5	1	
4	5	1	
4	7.5	1	
5	8/9.5 ²	1	
5	8/9.5 ²	120	
6	1	1	
7	1	120	

Table 5 – Paliers de chargement



Figure 7 – Vernier ou plus communément : "pied à coulisse".



Figure 8 – Dessicateurs.

² 1. 8kN pour l'épicéa et 9.5kN pour le hêtre
Laboratoire de Matériaux de Construction

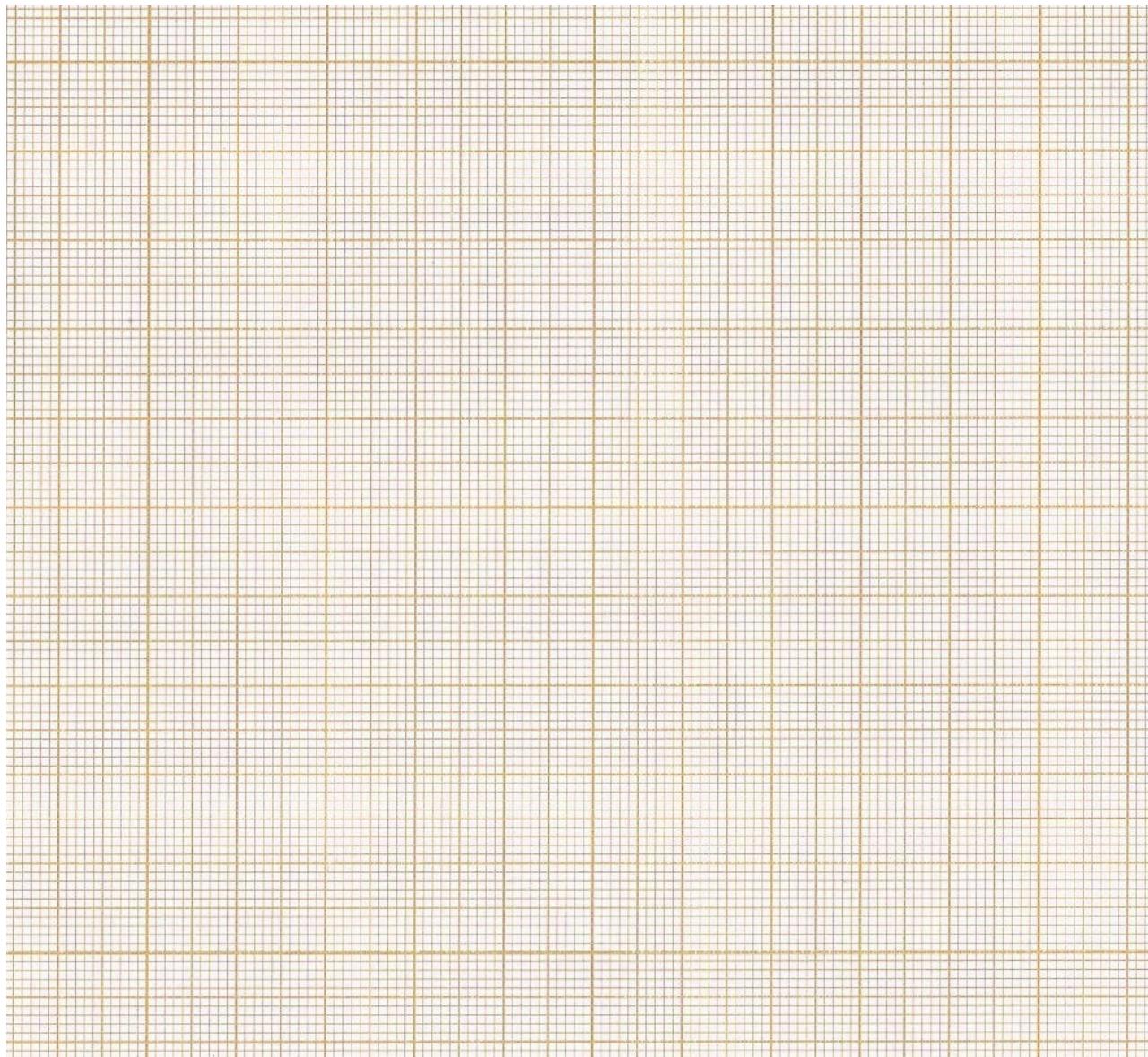


Figure 9 – Papier millimétrique à utiliser pour tracer les courbes de sorption.

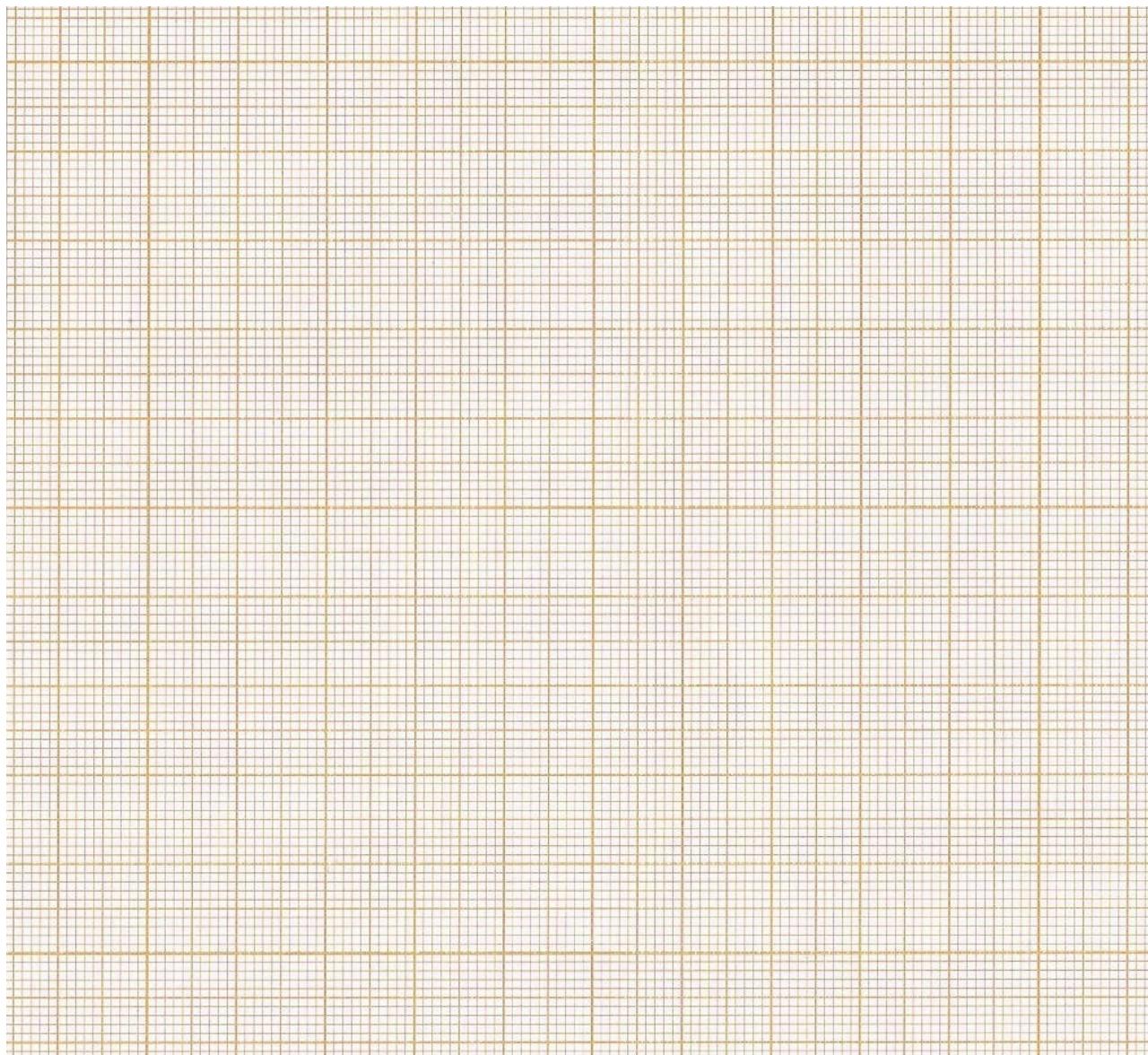


Figure 10 – Papier millimétrique à utiliser pour tracer la courbe effort/flèche.