

Chapitre 3.

Méthode expérimentale

Le dispositif expérimental a consisté à coupler des essais de retrait et de compression tangentielle à des expériences de sorption d'humidité. Ce type de dispositif a été élaboré par Goulet (1968) et a été utilisé par la suite par plusieurs chercheurs.

3.1. Traitements préalables des éprouvettes

Les groupes jumelés d'éprouvettes ont subi une deuxième désorption sous neuf conditions d'équilibre (tableau 4). Préalablement, les éprouvettes ont été humidifiées jusqu'à la saturation intégrale. Elles avaient une teneur en humidité initiale de 12% en moyenne et la saturation a été réalisée en trois étapes afin de diminuer la formation de contraintes internes causées par une adsorption trop rapide (Naderi et Hernández 1997; Almeida et Hernández 2006c). Ainsi, les éprouvettes ont subi une adsorption au-dessus d'une solution saturée de KCl durant 30 jours suivie d'une adsorption au-dessus de l'eau distillée durant 60 jours. Ces deux étapes ont été faites dans des dessiccateurs placés dans une chambre dont la température était contrôlée, soit à $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Les dessiccateurs comportaient vingt échantillons chacun et certains ont servi pour le contrôle de la masse de ces derniers. Ce contrôle était fait pour chaque espèce à l'aide d'une balance à plateau de 0,001 g de précision.

Les échantillons ont ensuite été immergés dans l'eau distillée durant vingt-quatre heures, et un cycle de vide sous l'eau d'une durée de 24 heures a été conduit, suivi d'un autre cycle d'environ 24 heures à pression atmosphérique.

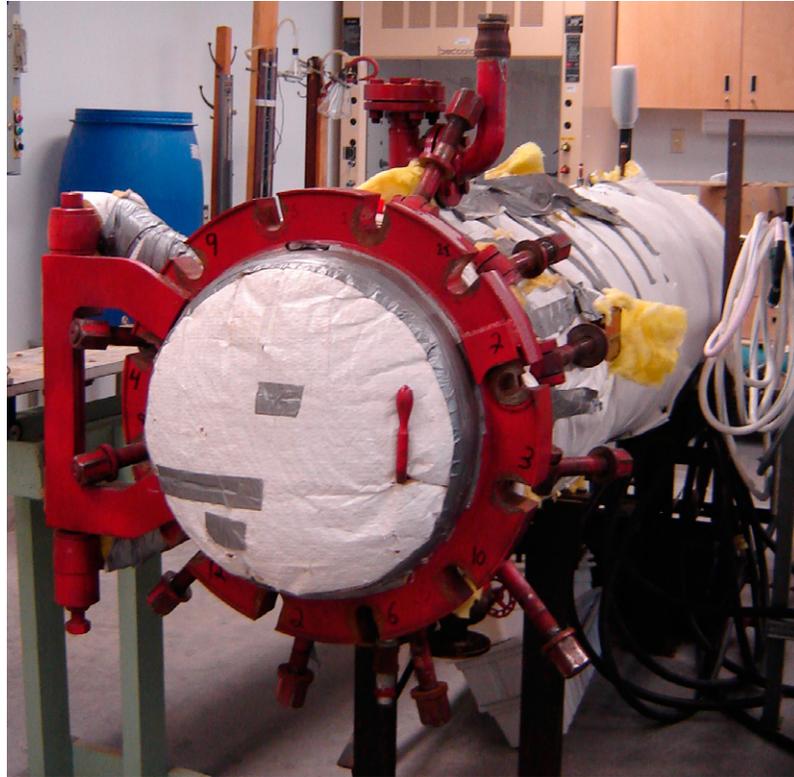


Figure 16. Cylindre utilisé pour la saturation des éprouvettes de bouleau jaune destinés aux essais sur les solutions salines saturées.

Les espèces ont suivi par la suite un cheminement différent afin d'atteindre la saturation intégrale. Le bouleau jaune s'est avéré être une espèce moins perméable que le hêtre. On a donc dû utiliser plusieurs cycles à des pressions plus élevées, lesquels ont été faits dans un cylindre d'une capacité de 600 kPa de pression (figure 16). La pression était augmentée par des paliers de 100 kPa d'une durée d'une heure et demie chacun jusqu'à atteindre 300 kPa. Ensuite celle-ci était amenée à 400 kPa et maintenue durant trois heures et demie, où le cycle terminait. Pour le hêtre, les échantillons ont été saturés avec trois cycles de 100 kPa de pression d'une durée d'une heure chacun. La pression était ramenée à la pression atmosphérique durant 2 heures entre les cycles de pression.

Les groupes d'échantillons destinés à la méthode des solutions salines saturées ont été saturés à deux moments différents, soit ceux testés à 25°C en premier lieu et ceux testés à

50°C en deuxième lieu. Les autres groupes destinés à la désorption par la méthode de la membrane poreuse et ceux de la saturation intégrale ont été saturés ensemble un peu plus tard. Dans ce cas, le cylindre utilisé fut différent du premier à cause de la disponibilité de l'équipement (figure 17). Ce changement de cylindre n'a pas affecté la valeur moyenne de saturation intégrale entre les différents groupes essayés.

Après la saturation intégrale des échantillons, la masse était prise à l'aide d'une balance de 0,001 g de précision. Ensuite, les dimensions radiale (d_{RS}), tangentielle (d_{TS}) et longitudinale (d_{LS}) étaient mesurées à l'aide des micromètres Mitutoyo de 0,001 mm de précision.

3.2. Essais de sorption

3.2.1. Caractéristiques générales

Nos expériences se sont concentrées sur la désorption à des humidités relatives élevées et à deux niveaux de température. Plus spécifiquement il s'est agi d'une deuxième désorption réalisée suite à une désorption partielle (jusqu'à environ 60% HR) suivie d'une saturation intégrale du bois.

La sorption a fait donc appel à deux techniques complémentaires utilisées dans des travaux antérieurs (Cloutier et Fortin 1991; Hernández et Bizoñ 1994; Almeida et Hernández 2006a, 2006b; Hernández et Pontin 2006): une sorption conventionnelle avec des solutions salines saturées et une sorption réalisée au moyen d'une membrane poreuse sous pression. La technique de solutions salines saturées a été utilisée pour cinq conditions d'équilibre (de 50% à 96% HR). De plus, quatre autres conditions ont été réalisées par la technique de la membrane poreuse sous pression. Le tableau 4 précise les humidités relatives utilisées pour les deux techniques mentionnées. Ces humidités



Figure 17. Cylindre utilisé pour la saturation des échantillons destinés aux essais sur la membrane poreuse.

relatives ont permis de représenter convenablement la gamme des humidités situées à proximité de la saturation des membranes.

3.2.2. Méthode des solutions salines saturées

3.2.2.1. Bassins à température constante

Entre 50% et 96% (HR), la sorption a été réalisée dans une chambre dont la température était d'environ 24°C. Le matériel a été disposé dans quatre bassins à température constante

comportant chacun dix cellules de sorption (figure 18). Ces bassins, sont de grandes cuves en tôle, remplis d'eau, et comportant des ouvertures circulaires à leur partie supérieure. Dans ces ouvertures sont logés des vases de pyrex qui constituent les cellules de sorption. L'ensemble est isolé de tous côtés par un panneau de polystyrène expansé de 25 mm d'épaisseur qui est enfermé à son tour, sauf au-dessus, par une enceinte en bois. D'autres couches de polystyrène expansé sont moulées aux couvercles de vases de pyrex et assurent l'isolation du dessus du bassin. Pour les bassins à 25°C, lorsque la température s'abaisse, le thermomètre à contact logé au milieu du bassin actionne les agitateurs disposés aux extrémités; l'agitation produit un léger échauffement de l'eau qui maintient la température constante à $\pm 0,01^\circ\text{C}$ durant des périodes prolongées. Cela assure ainsi le maintien de l'humidité relative dans les cellules de sorption. Deux thermomètres différentiels placés près des extrémités ont servi à contrôler la température de l'eau et son uniformité au millième de degré près. Pour les bassins à 50°C, six éléments de 300 W chaque et trois thermocouples type T avec une précision de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, ont été placés par bassin. Un contrôleur de type PID (Proportional Integral Differential) avec une précision de $0,4^\circ\text{C}$ régula la température désirée. Une pompe assurait la circulation de l'eau à l'intérieur du bassin.

3.2.2.2. Cellules de sorption

Les cellules de sorption sont constituées d'un vase à couvercle rodé, en pyrex, servant généralement comme dessiccateur à vide. Au fond de chaque cellule sont placées des solutions salines saturées, lesquelles règlent l'humidité relative de l'air. Ainsi, lorsqu'un soluté est ajouté à l'eau, l'humidité relative de l'air au-dessus de la solution est réduite en fonction de la fraction molaire du soluté comme le stipule la loi de Raoult (Siau 1995).

Pour une solution saturée, l'humidité relative de l'air demeurera constante si la température est maintenue constante. Pour les essais à 25°C, les vingt éprouvettes de chaque groupe ont été réparties en deux dessiccateurs de dix éprouvettes chacun, lesquelles furent déposées en une rangée au-dessus de la solution saline. Par contre, pour



Figure 18. Bassin de sorption à température constante à 25°C (une couche isolante *thermofoil* couvrait ce système).

les essais à 50°C les vingt éprouvettes de chaque groupe ont été déposées dans un seul dessiccateur en deux rangées séparées l'une de l'autre par un treillis métallique enduit de vinyle. L'ensemble était tenu à environ cinq centimètres du fond du dessiccateur par une plaque de porcelaine perforée. À cause de la grande solubilité de la solution de $ZnSO_4$ à 50°C, ce groupe a été reparti en deux dessiccateurs de dix éprouvettes chacun. Un même volume de solution saline a été utilisé pour chaque cellule de sorption soit environ 800 ml. Dans les cas particuliers où l'on a procédé au contrôle des masses en cours d'essais, dix des vingt échantillons étaient placés dans une cage en plexiglas. Les échantillons étaient appuyés sur la face tangentielle et leur position finale dans les cellules a été notée afin d'évaluer l'influence éventuelle de celle-ci sur l'équilibre atteint.

Les sels ont été choisis pour obtenir les conditions d'équilibre désirées. Il s'est agi des solutions aqueuses saturées de bromure de sodium (NaBr), de chlorure de sodium (NaCl),

de chlorure de potassium (KCl), de sulfate de zinc (ZnSO₄) et de sulfate de potassium (K₂SO₄). L'utilisation et les caractéristiques de ces sels ont été précisées entre autres par Greenspan (1977), Rockland (1960) et Almeida (2006).

Par ailleurs, les conditions de sorption ont été effectuées généralement dans une seule étape. Le matériel d'essai a été disposé dans dix cellules de sorption réparties dans quatre bassins.

3.2.2.3. Durée de conditionnement

La sorption a été contrôlée directement dans une des cellules par la mesure de la masse de dix échantillons. Les échantillons étaient disposés sur un support en méthacrylate de méthyle ou d'aluminium, qu'un fil reliait à une balance de 0,001 g de précision. Cela a permis d'obtenir des pesées précises en peu de temps sans modifier les conditions de la sorption. Ce type de contrôle a été utilisé avec succès par plusieurs chercheurs (Bizoñ 1995, Arévalo 2002).

Les pesées ont été effectuées à des intervalles réguliers, ce qui a permis de suivre le conditionnement durant la sorption. En général l'équilibre de la teneur en humidité a été considéré comme atteint lorsque le changement d'humidité était d'au plus 0,007% (H) par jour lorsque calculé sur un intervalle d'au moins une semaine. À ce moment, les éprouvettes ont été retirées des dessiccateurs pour prendre immédiatement leur masse et leurs dimensions et effectuer par la suite les essais de compression tangentielle.

Le temps de conditionnement pour la méthode des solutions salines a varié entre 113 jours (bouleau jaune à 58% HR) et 531 jours (bouleau jaune à 96% HR) à 25°C, et entre 97 jours (bouleau jaune à 51% HR) et 109 jours (hêtre à 96% HR) à 50°C.

3.2.3. Méthode de la membrane poreuse sous pression

Au-dessus de 96% (HR), la sorption a été réalisée selon la méthode de la membrane poreuse sous pression. Cette méthode a été initialement développée pour étudier la relation entre la teneur en humidité et la pression appliquée dans les sols. Celle-ci permet le contrôle très précis de hautes valeurs d'humidité relative de l'air. Il a été ainsi possible d'obtenir quatre points de mesure entre 96% et 100% d'humidité relative de l'air, intervalle visé spécialement par ce travail. Une description détaillée de cette méthode est présentée par Fortin (1979) ainsi que par Cloutier et Fortin (1991).

La méthode utilise le concept de potentiel hydrique, lequel est décrit en détail par Siau (1984,1995). Ce concept est dérivé de la thermodynamique classique et il est défini comme étant la différence entre l'énergie libre de Gibbs spécifique de l'eau à l'état sous étude et celle à l'état de référence. L'état de référence généralement utilisé est une nappe d'eau libre et pure à la pression atmosphérique, à une élévation donnée et à la température de l'eau à l'état sous étude (Fortin 1979, Cloutier et Fortin 1991). Ces derniers auteurs ont considéré le gradient de potentiel hydrique comme étant la force motrice du mouvement de l'humidité dans le bois. Ce concept peut aussi être appliqué à l'étude de l'effet des forces de capillarité sur le mouvement de l'eau liquide dans le bois (Siau 1995). Le potentiel hydrique est normalement exprimé en termes d'énergie par unité de masse, soit en Jkg^{-1} . La relation entre le potentiel hydrique, l'humidité relative de l'air et le rayon de courbure de l'interface entre l'eau et l'air à 25°C et 50°C est présentée au tableau 5. Selon Cloutier et Fortin (1991), le potentiel hydrique augmente avec la température et la teneur en humidité d'équilibre.

La figure 19 illustre l'appareil de sorption qui a été utilisé dans le cadre du présent travail. Les parties principales sont l'enceinte à pression ou extracteur, la membrane poreuse, une source d'air à haute pression et un système de régulation de la pression. La membrane utilisée est constituée d'une feuille d'acétate de cellulose ayant des pores dont le diamètre moyen est de 24 Å, ce qui lui permet de résister à des pressions d'air pouvant aller jusqu'à

Tableau 5. Relation entre le potentiel hydrique, l'humidité relative et le rayon capillaire à 25°C et 50°C.

| Potentiel hydrique | | Humidité relative | | r | | | |
|----------------------|---------|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 25°C | 50°C | 25°C | 50°C | 25°C | 50°C | | |
| (Jkg ⁻¹) | (kPa) | (%) | (%) | (μm) | (μm) | | |
| 0 | | 0 | 0 | 100 | 100 | ∞ | ∞ |
| -300 | -300 | -299 | -296 | 99,78 | 99,80 | 0,480 | 0,453 |
| -700 | -700 | -698 | -693 | 99,49 | 99,53 | 0,206 | 0,194 |
| -2000 | -2000 | -1994 | -1976 | 98,56 | 98,67 | 0,072 | 0,068 |
| -5000 | -5000 | -4985 | -4940 | 96,43 | 96,70 | 0,029 | 0,027 |
| -5619 | -6370 | -5602 | -6294 | 96 | 95,82 | 0,026 | 0,021 |
| -14502 | -31069 | -14460 | -30697 | 90 | 81,20 | - | - |
| -20760 | -32546 | -20699 | -32157 | 86 | 80,40 | - | - |
| -37775 | -44057 | -37664 | -43530 | 76 | 74,43 | - | - |
| -74979 | -100600 | -74758 | -99456 | 58 | 50,93 | - | - |

10000 kPa sans se désaturer. La méthode est alors conçue sur le principe que les pores dans la membrane sont suffisamment petits pour retenir une certaine quantité d'eau grâce aux forces capillaires, et cela même sous l'effet de la pression appliquée. La membrane demeure ainsi perméable à l'eau mais imperméable à l'air. Les échantillons de bois humide en contact avec la membrane poreuse perdent de l'eau jusqu'à ce qu'ils s'équilibrent avec le potentiel hydrique imposé grâce à la pression appliquée (Cloutier et Fortin 1991).

Les échantillons saturés sont placés dans l'enceinte hermétique sur la membrane poreuse saturée d'eau. L'air entourant les échantillons est maintenu saturé de vapeur d'eau afin de



Figure 19. Montage de l'appareil utilisé pour la technique de la membrane poreuse sous pression.

prévenir toute perte par évaporation. La membrane est recouverte d'une couche d'argile d'environ 2 mm d'épaisseur pour assurer un bon contact hydraulique entre les éprouvettes et la membrane. Une pression d'air connue est alors appliquée dans l'enceinte pendant que l'eau sous la membrane est maintenue à la pression atmosphérique. La teneur en humidité des échantillons est obtenue lorsque le volume d'eau extrait est en équilibre pendant 7 jours. Ce processus est répété pour différents gradients de pression de façon à obtenir une courbe de teneur en humidité d'équilibre en fonction du potentiel hydrique. Dans la présente étude, la méthode de la membrane sous pression a été utilisée dans la gamme de potentiel hydrique de -300 à -5000 Jkg^{-1} (tableau 4), et les expériences ont requis entre 14 et 41 jours de désorption selon l'humidité relative considérée, la température et l'espèce. Cette gamme a été complémentaire à celle obtenue avec la méthode des solutions salines.

Pour le contrôle de la température, le système de membrane poreuse a été mis dans une boîte isolée pourvue d'un système de serpentin par lequel circulait du polyéthylène glycol à l'aide d'un bassin thermostatique gradué à 25°C ou à 50°C. Ces dispositifs ont été montés dans une chambre ayant une température de 24°C ± 1°C. Vingt éprouvettes par groupe dont leur dimensions et masse avaient été prises préalablement ont été placées dans ces dispositifs.

3.3. Essais mécaniques

3.3.1. Essais de compression

3.3.1.1. Contrôle des conditions hygrothermiques durant les essais

Étant donné l'importance de la teneur en humidité des échantillons dans le cadre de ce travail, plusieurs précautions ont été prises afin d'assurer le contrôle des conditions hygrothermiques durant les essais mécaniques.

Aussitôt sorties des cellules de sorption ou de l'extracteur, les vingt éprouvettes ont été rapidement emballées en groupes de quatre dans des bandes de polyéthylène. Elles ont été ensuite placées dans une enceinte, qui se trouvait près de la machine à essai. Cette enceinte, faite de polystyrène pour éviter les pertes de chaleur, était composée d'un dessiccateur entouré d'un serpentin par lequel circulait du polyéthylène glycol à l'aide d'un bassin thermostatique réglé à 25°C ou 50°C, au dixième de degré près. Pour les essais au-dessous de 96% (HR), une solution saline correspondant aux conditions où venait de s'effectuer la sorption était versée dans le dessiccateur. Pour les essais au-dessus de 96% (HR), de l'eau a été placée dans le dessiccateur afin de conserver une humidité relative élevée.

Pour les essais à 25°C, les échantillons étaient entourés dans du coton hydrophile conditionné au dessus des mêmes conditions hygrométriques que le bois. Ce coton servait de régulateur hygrothermique à la surface des éprouvettes. Un tel système a été utilisé avec succès préalablement par Arévalo (2002), Pontin (2005) et Almeida (2006). Pour les essais à 50°C, les échantillons étaient enveloppés dans des bandes de polyéthylène en couvrant leurs six faces. Une cabine munie d'un système de chauffage maintenait la température à 50°C. Il faut remarquer que pendant les essais, le laboratoire d'essais mécaniques était conditionné à 25°C.

3.3.1.2. Essais de compression tangentielle

Les essais de compression tangentielle ont été réalisés sur une machine MTS Q TEST/5 ELITE CONTROLLER, qui a une capacité maximale de 5 kN. Cette machine est équipée d'une base, de deux colonnes verticales, d'une plaque supérieure fixée à la traverse mobile par en dessous et d'un mécanisme de contrôle. Une pièce de faible diamètre est vissée à la plaque supérieure pour faciliter le positionnement et centrage de l'échantillon tandis qu'un joint hémisphérique de grand rayon rend cette plaque facilement orientable pour tenir compte du manque de parallélisme des faces mises en contact. Les précautions prises à cet égard ont consisté à mouvoir la plaque orientable selon deux directions perpendiculaires l'une à l'autre à mesure que la charge initiale était appliquée. Une base inférieure de même diamètre que la supérieure, sert aussi à positionner et à centrer l'éprouvette.

Le logiciel Test Works 4 a servi à la manipulation de la machine et à la prise des données. Ce logiciel a créé un fichier de données brutes de charge et de déformation.

Tableau 6. Vitesses de déplacement de la traverse mobile de la machine à essai mécanique en fonction de la teneur en humidité moyenne de l'éprouvette.

| Humidité relative | | Vitesse de la traverse | | | |
|-------------------|-------|------------------------|------|--------------------------|------|
| | | Bouleau jaune | | Hêtre à grandes feuilles | |
| 25°C | 50°C | 25°C | 50°C | 25°C | 50°C |
| (%) | | (mm/min) | | (mm/min) | |
| 58 | 50,93 | 0,86 | 1,08 | 0,87 | 1,10 |
| 76 | 74,43 | 0,86 | 1,12 | 0,87 | 1,14 |
| 86 | 80,40 | 0,88 | 1,10 | 0,89 | 1,12 |
| 90 | 81,20 | 0,88 | 1,11 | 0,89 | 1,13 |
| 96 | 95,82 | 0,84 | 1,09 | 0,89 | 1,12 |
| 96,43 | 96,70 | 0,84 | 0,84 | 0,89 | 0,90 |
| 98,56 | 98,67 | 0,84 | 0,84 | 0,88 | 0,90 |
| 99,49 | 99,53 | 0,84 | 0,84 | 0,89 | 0,90 |
| 99,78 | 99,80 | 0,84 | 0,84 | 0,88 | 0,90 |
| 100 | 100 | 0,85 | 0,84 | 0,89 | 0,92 |

Il a été décidé d'utiliser un taux de déformation assez constant pour toutes les conditions d'humidité, afin de limiter les effets de ce paramètre sur la déformabilité du bois (Sliker 1978). Des essais préliminaires faits sur des échantillons représentatifs de la masse volumique basale moyenne ont conduit au choix des vitesses de déplacement de la traverse mobile qui sont précisées au tableau 6. Ces vitesses ont donné des taux de déformation élastique de l'ordre de 1% à la minute dans la partie médiane (40 mm) de l'éprouvette.

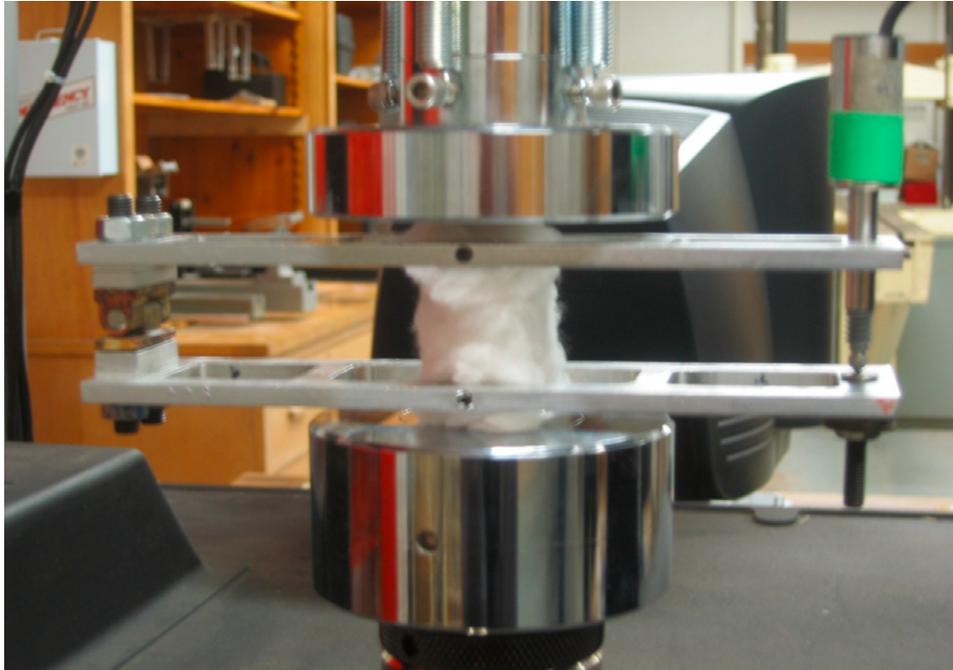


Figure 20. Dispositif de mesure des déformations en compression tangentielle

3.3.2. Mesure des déformations

Le dispositif montré à la figure 20 a servi à mesurer les déformations de compression simple en direction tangentielle. Un gabarit a été utilisé pour fixer l'extensomètre de façon à ce que les pointes de contact soient montées de manière uniforme sur les éprouvettes. Ces pointes ont été enfoncées à l'aide des écrous papillon sur la face transversale du bois.

Pour tenir compte de l'hypothèse de Barré de Saint-Venant sur le caractère local de la triple contrainte près des points d'application des charges, l'extensomètre a été monté dans la partie médiane des barreaux. Cet appareil comporte un système de leviers articulé à une extrémité alors que l'autre porte un capteur linéaire Sangamo DG 1.0. Les pointes fixées au barreau d'essai se trouvant à la mi-longueur des leviers, l'extensomètre amplifie les déformations par un facteur deux. D'autre part, la déformation totale a été mesurée directement via le déplacement de la machine.

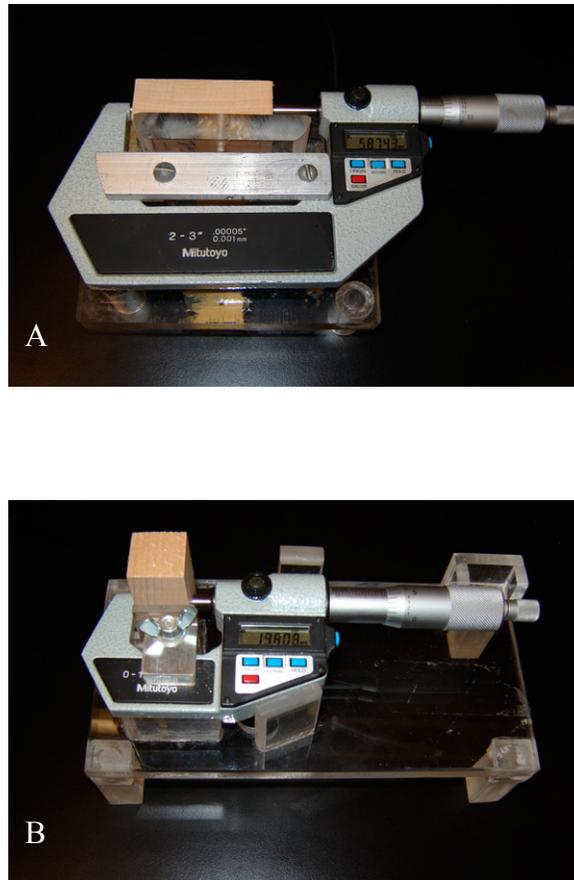


Figure 21. Dispositifs pour la mesure des déformations des éprouvettes : (A) direction tangentielle; (B) directions radiale et longitudinale.

3.4. Mesure des dimensions du bois

Les dispositifs utilisés pour mesurer les dimensions suivant les directions principales du bois sont illustrées à la figure 21. Ces mesures ont été faites à 0,001 mm près à l'aide de micromètres Mitutoyo. Des gabarits en méthacrylate de méthyle ont permis d'établir les dimensions à partir des centres géométriques des surfaces des échantillons, améliorant ainsi la reproductibilité des mesures.