



# **Hystérèse et effets de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois aux températures de 5°, 21°, 35°, 50° C**

B. Djolani

## **► To cite this version:**

B. Djolani. Hystérèse et effets de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois aux températures de 5°, 21°, 35°, 50° C. *Annales des sciences forestières*, 1972, 29 (4), pp.465-474. <10.1051/forest/19720404>. <hal-00882065>

**HAL Id: hal-00882065**

**<https://hal.science/hal-00882065v1>**

Submitted on 11 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

## HYSTÉRÈSE ET EFFETS DE SECOND ORDRE DE LA SORPTION D'HUMIDITÉ DANS LE BOIS AUX TEMPÉRATURES DE 5°, 21°, 35°, 50° C \*

---

B. DJOLANI

*Faculté forestière de Karadj  
(Iran)*

---

### RÉSUMÉ

Pour un même degré hygrométrique de l'air, le bois se stabilise à un taux d'humidité plus élevé en phase de désorption (humidité d'origine supérieure à celle correspondant à l'état d'équilibre) qu'en phase d'adsorption (humidité d'origine inférieure); on obtient ainsi, pour une température donnée, une boucle d'hystérèse qui traduit un effet de premier ordre de la sorption d'humidité.

Le rapport d'hystérèse (quotient du taux d'humidité à la désorption par le taux d'humidité à l'adsorption) est à peu près constant dans la gamme de 10 % à 90 % de degré hygrométrique de l'air, et diminue de façon presque linéaire entre 5° et 35° C (figure 1).

La résistance mécanique du bois, pour une même teneur en humidité, est plus faible en désorption qu'en adsorption (effet de second ordre), mais la largeur de la boucle (figure 2) est indépendante de la température.

De même (figure 3), le volume du bois, toujours pour un même taux d'humidité, est plus grand en désorption qu'en adsorption, et l'écart est là aussi indépendant de la température.

Ainsi, les effets de second ordre de la sorption paraissent indépendants de l'hystérèse de la sorption d'humidité du bois.

Les différences de résistance observées entre l'adsorption et la désorption pour un même taux d'humidité pourraient être liées aux différences de volume.

Quant à l'hystérèse de la sorption, il s'agirait d'un phénomène stable dû à une résistance des pores submicroscopiques du bois à la diffusion des molécules de vapeur d'eau.

---

\* Résumé d'une thèse de Docteur-ès-Sciences (Sciences du Bois) présentée par l'auteur en 1969 devant l'Université Laval (Québec, Canada).

Membres du jury : Yvon Laflamme (Québec) — Joseph Risi (Québec) — André Villière (Paris) — Président du jury et Directeur de thèse : Marcel Goulet (Québec).

## I. — INTRODUCTION

Les propriétés mécaniques du bois varient considérablement en fonction de l'humidité du matériau. On admet dans la pratique qu'à un équilibre hygroscopique donné correspond pour le bois une seule valeur de ces propriétés.

En réalité, on sait très bien que la teneur en humidité du bois n'est pas une fonction simple du degré hygrométrique et de la température du milieu ambiant; elle varie en fait entre deux valeurs limites qui dépendent de la façon dont l'équilibre hygroscopique est atteint, soit par adsorption depuis l'état anhydre, soit par désorption depuis l'état saturé. Ce phénomène est connu sous le nom d'« hystérèse de la sorption d'humidité ».

On est ainsi amené à s'interroger sur l'influence de l'hystérèse de la sorption sur les propriétés mécaniques du bois. L'objet de notre recherche était précisément de déterminer la nature exacte de ces phénomènes connus sous le nom d'« effet de second ordre de la sorption d'humidité » (GOULET, 1967), et d'étudier les relations susceptibles d'exister entre ces effets et l'hystérèse de la sorption du bois.

Les résultats de nos travaux nous ont ainsi amené à proposer une nouvelle interprétation de l'hystérèse de la sorption : celle-ci serait à notre avis un phénomène stable dû à une résistance des pores sub-microscopiques du bois à la diffusion des molécules de vapeur d'eau.

Ainsi, les effets de second ordre de la sorption nous paraissent indépendants de l'hystérèse de la sorption d'humidité du bois. Les différences de résistance du matériau observées à l'adsorption et à la désorption pourraient être liées aux différences de gonflement en volume de la matière lignocellulosique également observées et s'expliquer par un seul mécanisme, par exemple, un fluage du bois.

## II. — LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Le département d'exploitation et d'utilisation des bois de la faculté forestière de l'Université Laval a mis au point ces dernières années, sous la direction du Professeur GOULET, une méthode expérimentale d'étude de l'hystérèse de la sorption que nous avons reprise dans nos expériences en l'adaptant cependant à l'objet de notre recherche.

### 1. — *Le matériel d'expérimentation*

Les expériences ont été réalisées sur des éprouvettes de compression radiale de bois d'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh) ayant la forme d'un parallélepède rectangle de section droite de 225 mm<sup>2</sup> et de longueur radiale 45 mm.

Les caractéristiques principales de ces éprouvettes sont résumées dans le tableau 1 :

Tout le matériel a été conditionné puis conservé jusqu'aux essais dans une chambre climatisée à 20° C et 70 % d'humidité de l'air ambiant.

D'autres éprouvettes ont servi à vérifier les progrès de la sorption durant les quatre expériences pour déterminer la période nécessaire pour atteindre l'équilibre hygroscopique du bois à 5° C, 21° C, 35° C et 50° C. Dix groupes de trente échantillons chacun ont ainsi été constitués parmi les éprouvettes de bonne orientation préparées pour les expériences principales.

### 2. — *Principe de la méthode*

Il consistait à associer l'essai mécanique de compression radiale à une expérience de sorption d'humidité du bois, ceci à quatre températures différentes : 5°, 21°, 35° et 50° Celsius.

Le matériel d'essai a d'abord été séché dans une étuve à ventilation mécanique de manière à stabiliser le bois, sans modifier sa résistance mécanique ou son hygroscopicité.

Les essais de sorption furent réalisés simultanément sur toutes les éprouvettes d'une même série d'expériences à l'aide de bassins à températures constantes contenant plusieurs cellules de sorption. Les essais mécaniques furent effectués au terme des essais de sorption à l'aide de la machine à essais universelle RIEHLE en prenant toutes les précautions nécessaires pour maintenir les éprouvettes à température constante.

TABLEAU 1 — TABLE 1

*Caractéristiques des éprouvettes en bois d'érable à sucre*  
*Typical features of the sugar maple wood samples*

Número de la série d'expérience Number of the experience	Température de l'essai Temperature during the test	Nombre de groupe d'éprouvettes Number of sample groups	Nombre d'éprouvettes par groupe Number of samples per group	Densité du matériau g/cm <sup>3</sup> Specific gravity	Largeur des cernes mm Ringwidth	Proportion de bois d'aubier Percentage of sapwood
1	5° C	12	30	0,68	1,93	99 p. cent
2	21° C	12	30	0,69	1,93	99 p. cent
3	35° C	12	30	0,68	1,93	99 p. cent
4	50° C	12	30	0,68	1,93	99 p. cent
5	réserve	12	30	0,68	1,93	99 p. cent

### 3. — Techniques d'expérimentation

L'exécution de ces essais nous a permis de vérifier la validité de la nouvelle technique de sorption mise au point par le Département d'Exploitation et d'Utilisation des bois de la faculté. Un certain nombre de problèmes pratiques ont été résolus dont nous donnons ici une liste exhaustive :

- Protection des éprouvettes pour ralentir les échanges d'humidité avec l'air ambiant.
- Dessiccation des éprouvettes avant expérience et conditionnement du matériel.
- Conception et réalisation de bassins à sorption à température et humidité constantes.
- Méthode de détermination précise des degrés hygrométriques de l'air dans les cellules de sorption.
- Méthode de détermination des durées de conditionnement des éprouvettes.
- Méthode de réalisation des essais de compression en fin de sorption.

Le lecteur intéressé par ces travaux aurait avantage à se reporter à ce sujet aux publications du Département d'Exploitation et d'Utilisation du Bois de la Faculté de Foresterie de l'Université Laval (notes de recherches numéros 2, 3, 4 et 8).

### III. — LES RÉSULTATS OBTENUS

Le tableau 2 présente ces résultats; les mesures de sorption y sont groupées dans les colonnes du milieu, et les mesures de compression apparaissent dans les deux colonnes de droite, sous la forme du coefficient  $S_{33}$  qui, par convention, est égal à l'inverse du module de

YOUNG en direction radiale, c'est-à-dire que l'on a :

$$S_{33} = \frac{\Delta L}{L} \times \frac{S}{P}$$

où L = dimension initiale de l'éprouvette en direction radiale,

P = charge appliquée en direction radiale,

ΔL = changement de longueur en direction radiale sous la charge P,

S = section droite de l'éprouvette.

TABLEAU 2 — TABLE 2

*Teneur en humidité et coefficient de déformation en compression radiale  
au terme d'essais de sorption d'humidité à 5°, 21°, 35° et 50° C. Bois d'érable à sucre.*

*Moisture content and strain coefficient under radial compression  
stress after sorption tests at 5°, 21°, 35° and 50° C. Sugar maple wood.*

Tempé- rature des essais degré Celsius  Tempe- rature during the tests (°C)	Composition de la cellule de sorption  Composition of the sorption cell	Degré hygrométrique de l'air p. cent  Relative humidity of air	h		S <sub>33</sub>	
			adsorption p. cent  Adsorption	désorption p. cent  Desorption	adsorption 10 <sup>-4</sup> cm <sup>2</sup>  Adsorption	désorption da N  Desorption
5°	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	—	0,8	—	0,59
	MgCl <sub>2</sub>	33,6	6,5	9,6	0,58	0,68
	Na Br	62,8	12,1	16,6	0,64	0,85
	NaCl	74,4	15,4	21,4	0,72	0,98
	KCl	86,3	20,1	31,1	0,89	1,25
	ZnSO <sub>4</sub>	90,3	23,1	42,3	1,00	1,47
	H <sub>2</sub> O	100	31,8	—	1,41	—
21°	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	—	0,3	—	0,58
	MgCl <sub>2</sub>	33,0	5,7	8,2	0,60	0,71
	Na Br	58,2	9,9	13,0	0,64	0,79
	NaCl	75,4	13,6	17,9	0,72	0,98
	KCl	84,8	17,3	25,1	0,83	1,22
	ZnSO <sub>4</sub>	88,5	18,7	30,7	0,95	1,47
	H <sub>2</sub> O	100	31,1	—	1,60	—
35°	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	—	0,2	—	0,60
	MgCl <sub>2</sub>	32,5	5,0	7,3	0,63	0,76
	Na Br	54,0	8,0	15,4	0,67	1,10
	NaCl	75,9	12,2	16,7	0,76	1,10
	KCl	83,3	14,5	28,4	0,86	1,63
	ZnSO <sub>4</sub>	84,4	15,0	32,9	0,88	1,74
	H <sub>2</sub> O	100	30,5	—	1,66	—
50°	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	—	0,1	—	0,61
	Li Cl	10,4	1,8	2,8	0,63	0,69
	MgCl <sub>2</sub>	31,4	4,0	5,2	0,63	0,74
	Na Br	50,0	6,1	7,6	0,67	0,81
	NaCl	76,4	10,3	12,9	0,82	1,10
	KCl	81,4	11,9	15,2	0,89	1,19
	H <sub>2</sub> O	100	35,8	—	2,02	—

Nous avons interprété ces résultats au niveau des trois points suivants : l'hystérèse de la sorption d'humidité, les effets de second ordre de la sorption et les relations possibles entre ces deux phénomènes.

### 1. — Hystérèse de la sorption d'humidité

On observe tout d'abord que la boucle d'hystérèse obtenue par cette méthode nouvelle d'expérimentation est comparable à celle obtenue par la méthode classique d'essais de sorption.

Le calcul du rapport d'hystérèse à 5° C, 21° C, 35° C et 50° C indique que celui-ci varie d'une façon pratiquement linéaire dans la gamme de température étudiée.

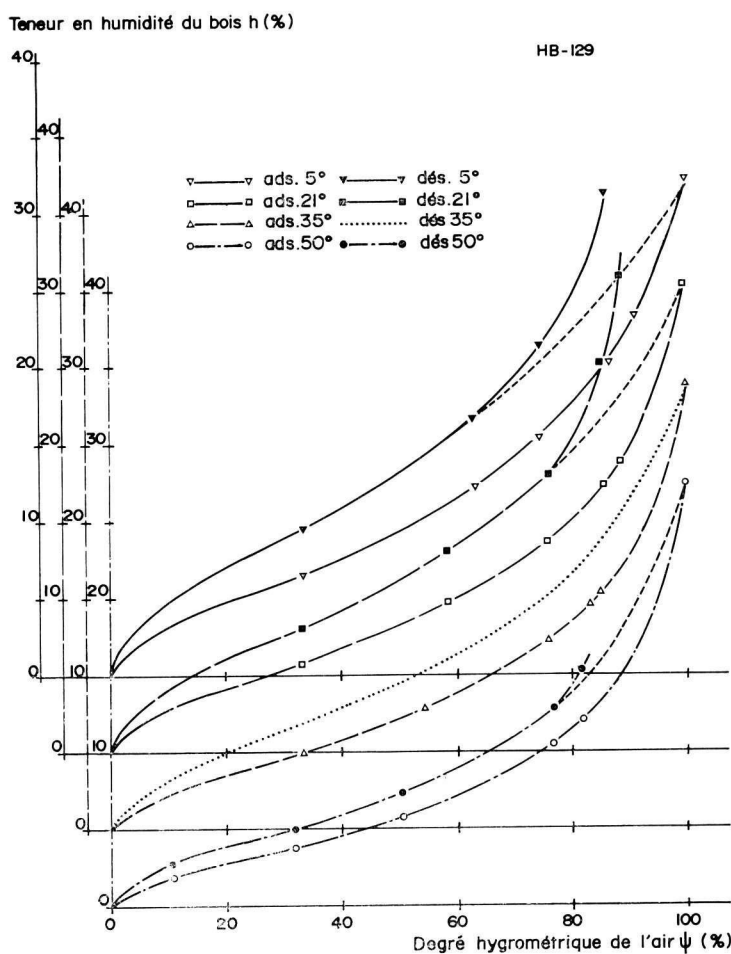


FIG. 1. — Isothermes de sorption du bois d'érable à sucre aux températures de 5°, 21°, 35° et 50° C.

FIG. 1. — Sorption isotherms of sugar maple wood at the temperatures of 5°, 21°, 35° and 50° C.

Teneur en humidité du bois : Wood moisture content.

Degré hygrométrique de l'air : Relative humidity of air.

La figure 1 représente les isothermes de sorption du bois d'érable à sucre établies pour ces températures. On observe en particulier que l'hygroscopicité du bois et son hystérèse diminuent sensiblement avec la température.

On peut cependant s'interroger sur l'existence de la boucle à 75° ou 80° C et la comparaison de nos résultats avec ceux obtenus par WEICHERT (1963) et STRICKLER (1968) nous entraîne à confirmer les résultats obtenus par ce dernier, à savoir l'existence d'une hystérèse de la sorption d'humidité à haute température.

## 2. — *Phénomènes de second ordre de la sorption d'humidité*

La figure 2 présente les résultats obtenus dans les mesures du coefficient radial de déformation du bois d'érable à sucre dans la gamme de températures étudiée. L'élévation de température diminue la résistance du bois en fonction de sa teneur en humidité (effets du premier ordre) mais sans changer la largeur absolue des boucles concernées (effets de second ordre). La partie des courbes située au-dessous du seuil de 15 p. cent de teneur en humidité du bois est significative pour les effets de second ordre car elle regroupe presque tous les points de mesure. On observe, en particulier, que ces effets ont sensiblement la même importance quelle que soit la valeur de la température entre 0° C et 50° C.

Des mesures de gonflement en volume du bois d'érable à sucre en fonction de la teneur en humidité ont également été exécutées pour chaque série d'expériences (figure 3).

Des variations importantes du volume du bois ont ainsi pu être mises en évidence entre des mesures à l'adsorption et à la désorption. Nous en concluons que la cohésion entre les constituants du bois est plus grande dans le premier cas que dans le second.

## 3. — *Relations entre les phénomènes d'hystérèse et les effets de second ordre de la sorption d'humidité*

Dans des conditions isothermes, nos résultats confirment l'hypothèse de MALMQUIST (1958, 1959) selon laquelle l'hystérèse de la sorption d'humidité et l'écart du coefficient radial de déformation seraient liés à la différence de cohésion, à l'adsorption et à la désorption, de la matière lignocellulosique.

Mais dans des conditions de températures différentes, cette explication n'est plus satisfaisante car une élévation de température maintient l'hystérèse sans faire varier pour autant les effets de second ordre.

De ces observations, nous avons conclu que des mécanismes différents doivent être à l'origine de l'hystérèse de la sorption d'humidité et de ses effets de second ordre.

Notre thèse consiste à expliquer l'origine de l'hystérèse de la sorption d'humidité du bois par une résistance des pores sub-microscopiques du bois à la diffusion des molécules de vapeur d'eau.

La figure 4 illustre ce propos.

Une augmentation de la pression partielle de vapeur d'eau de  $P_{v2}$  à  $P_{v3}$  permet d'injecter dans les interstices du bois une quantité d'eau qui ne peut être complètement restituée par une diminution égale de la pression ( $P_{v3}$  à  $P_{v2}$ ).

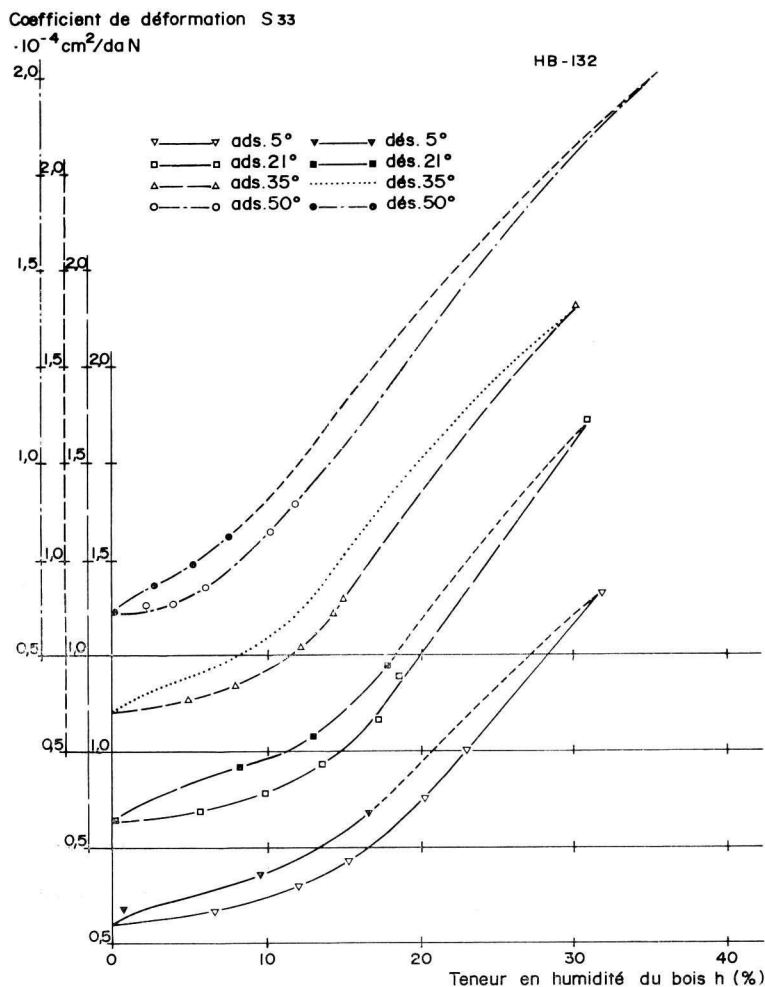


FIG. 2. — Coefficient de déformation en compression radiale du bois d'érable à sucre en fonction de sa teneur en humidité aux températures de 5°, 21°, 35° et 50° C.

FIG. 2. — Strain coefficient of sugar maple wood under radial compression stress in relation with its moisture content at the temperatures of 5°, 21°, 35° and 50° C.  
 Teneur en humidité du bois: Wood moisture content.  
 Coefficient de déformation: Strain coefficient.

En effet, la masse d'eau restante est retenue par les pores lorsque leur diamètre moyen est de l'ordre de grandeur du libre parcours moyen des molécules de vapeur d'eau. Pour ramener le bois à sa teneur en humidité de départ, il est nécessaire de diminuer la pression de vapeur d'eau jusqu'à une valeur  $P_{v1}$  inférieure à la pression initiale  $P_{v2}$ . Une nouvelle augmentation de la pression ( $P_{v1}$  à  $P_{v2}$ ) ne change pas le nombre de molécules d'eau dans les interstices car l'accroissement de pression est équilibré par la résistance des parois à la diffusion de la vapeur d'eau. Cet intervalle ( $\Delta P$ ) définit la gamme de pressions pour laquelle la teneur en humidité du bois demeure inchangée.



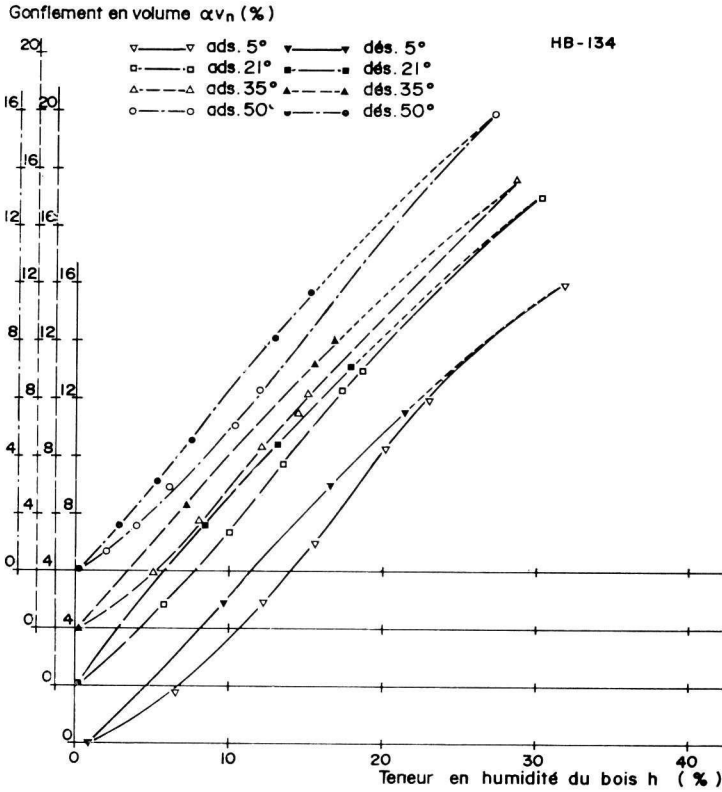


FIG. 3. — Gonflement en volume du bois d'érable à sucre en fonction de sa teneur en humidité aux températures de 5°, 21°, 35° et 50° C.

FIG. 3. — Volume swelling of the sugar maple wood in relation to its moisture content at the temperatures of 5°, 21°, 35° and 50° C.

Teneur en humidité du bois : Wood moisture content.  
Gonflement en volume : Volume swelling.

La boucle d'hystérèse délimite donc, pour chaque teneur en humidité du bois, l'intervalle de pression  $\Delta p$  à l'intérieur duquel la sorption de la vapeur d'eau ne peut plus s'effectuer. La gamme de pression ( $\Delta p$ ) diminue dès que l'on s'écarte de part et d'autre de la valeur maximale, ce qui pourrait être relié à l'augmentation du diamètre des pores du bois de l'état anhydre à l'état saturé, indiquée par BARKAS (1949). La valeur de  $\Delta P$  est fonction du diamètre des pores, de la teneur en humidité et de la température. Sa détermination à partir des boucles d'hystérèse de la figure 1 n'offre pas de difficultés.

Nous avons donc été amené à proposer de considérer l'hystérèse de la sorption comme un phénomène stable. Ceci nous permet d'expliquer plusieurs résultats expérimentaux bien connus, en particulier les effets d'oscillations du degré hygrométrique et de la température de l'air sur l'hystérèse de la sorption d'humidité du bois.

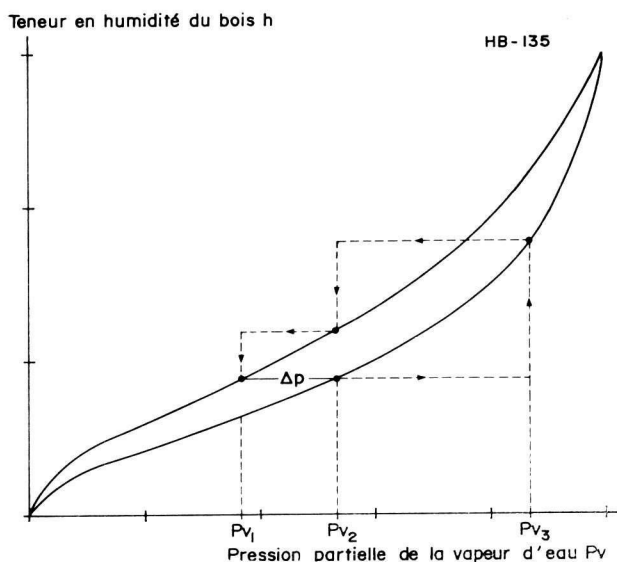


FIG. 4. — Effet de la pression de vapeur d'eau sur la teneur en humidité du bois.  
Pression de la vapeur d'eau. — Teneur en humidité du bois.

FIG. 4. — Influence of the steam pressure on the wood moisture content.  
Steam pressure. — Wood moisture content.

#### IV. — CONCLUSION

Le champ de nos investigations recouvrait un sujet de recherche fondamentale, à savoir la compréhension de l'hygroscopicité du bois et des phénomènes qui accompagnent sa sorption d'humidité. Les conséquences pratiques de cette recherche devraient permettre d'aboutir à une meilleure maîtrise du comportement hygrothermique des matériaux ligno-cellulosiques comme le bois. Mais il importe auparavant de poursuivre des travaux de recherche, en particulier pour ce qui concerne l'application à d'autres conditions expérimentales, de notre hypothèse d'interprétation de l'hystérèse de la sorption d'humidité du bois comme un phénomène stable.

*Reçu pour publication en octobre 1972.*

#### SUMMARY

##### HYSTERESIS AND SECOND ORDER EFFECTS OF THE MOISTURE SORPTION IN THE WOOD AT THE TEMPERATURES OF 5°, 21°, 35° AND 50° C

At a given air hygrometry, the wood moisture content is higher in desorption than in adsorption; for different hygrometries one gets an hysteresis curve which makes clear a first order effect of the moisture sorption.

The hysteresis ratio (i. e. the moisture content at the desorption divided by that at the adsorption) is approximatively constant from 10 p. cent to 90 p. cent of air hygrometry and decreases almost linearly between 5° and 35° C (fig. 1).

At a given moisture content the mechanical strength is lower (fig. 2) and the wood volume is higher (fig. 3) in desorption than in adsorption but for both phenomena the differences are independent of the temperature.

These second order effects of the sorption are not governed by the same mechanism as the first order effect which is probably related to the resistance of the submicroscopic pores of the wood to the steam diffusion.

## ZUSAMMENFASSUNG

### HYSTERESE UND EFFEKTE ZWEITER ORDNUNG BEI DER FEUCHTESORPTION DES HOLZES ZU VERSCHIEDENEN TEMPERATUREN

Die Hysterese der Feuchtesorption, ein Effekt erster Ordnung, verändert sich mit der Temperatur.

Die Unterschiede der mechanischen Widerstandsfestigkeit und des Volumens, welche, bei gleichem Feuchteprozent zwischen Sorptions — und Desorptionszustand bestehen, sind jedoch temperaturunabhängig.

Diese Effekte zweiter Ordnung unterliegen daher einem anderen Mechanismus.

Das stabile Hysteresephänomen kann auf den Widerstand der submikroskopischen Holzporen bezüglich der Diffusion der Wasserdampf moleküle zurückgeführt werden.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARKAS, W.-W., 1949. — *The swelling of wood under stress*. H.M. Stationery Office, Londres.
- GOULET M., 1967. — Phénomènes de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois au terme d'un conditionnement de trois mois à température normale. Première partie : Hypothèse de travail et expériences préliminaires. *Note de Recherches n° 2, Département d'Exploitation et Utilisation des Bois*. Université Laval, Québec.
- GOULET M., 1968. — Phénomènes de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois au terme d'un conditionnement de trois mois à température normale. Seconde partie : Essais du bois d'érable à sucre en compression radiale. *Note de Recherches n° 3, Département d'Exploitation et Utilisation des Bois*. Université Laval, Québec.
- GOULET M., 1970. — Phénomènes de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois au terme d'un conditionnement de trois mois à température normale. Troisième partie : Essais du bois d'érable à sucre en compression tangentielle et longitudinale. *Note de Recherches, Département d'Exploitation et Utilisation des Bois*. Université Laval, Québec (en préparation).
- GOULET M., et B. DJOLANI, 1968. — Mesures du degré hygrométrique de l'air en contact avec du bois soumis à des changements de température de l'ordre de 15° C. *Note de Recherches n° 4, Département d'Exploitation et Utilisation des Bois*. Université Laval, Québec.
- MALMQUIST L., 1958. — *Sorption as deformation of space*. Kylteknisk Tidskrift (4) : 49-57.
- MALMQUIST L., 1959. — Die Wasserdampfsorption des Holzes vom Standpunkt einer neuen Sorptions-theorie. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 17 (5), 171-178.
- STRICKLER M.D., 1968. — High temperature moisture relations of Grand Fir. *Forest Products Journal*, 18 (4), 69-75.
- WEICHERT L., 1963. — Untersuchungen über das Sorptions — und Quellungsverhalten von Fichte, Buche und Buchen — Pressvollholz bei Temperaturen zwischen 20° und 100° C. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 21 (8), 290-300.