

Influence de l'humidité sur les propriétés mécaniques du béton cellulaire autoclavé

66

par Yves Houst, Fermin Alou et Folker H. Wittmann, Lausanne

1. Introduction

Les propriétés mécaniques des matériaux poreux dépendent de leur teneur en eau. L'interaction de l'eau adsorbée et capillaire avec le squelette solide d'un matériau poreux est relativement complexe. Dans cette contribution, un modèle de matériau, développé pour la pâte de ciment durci, est utilisé pour interpréter les résultats expérimentaux.

Il y a au moins deux raisons majeures pour étudier en détail l'interaction du béton cellulaire et de l'eau. Premièrement, de sérieux problèmes tels que la

fissuration due au retrait et les dommages causés par le gel peuvent survenir fréquemment si l'on néglige l'importance de la teneur en eau du matériau. Deuxièmement, on a besoin de données réalistes sur les matériaux pour l'analyse des structures. Ce dernier argument est devenu plus urgent encore depuis l'introduction des puissantes méthodes de calcul numérique.

Un des buts de cet article est de mettre en relation les variations hygriques¹ de longueur, les déformations élastiques et différées, et la résistance à la compression du béton cellulaire avec la structure des matériaux. De cette façon, il est possible de démontrer qu'il y a une base commune pour expliquer l'influence de l'humidité sur les propriétés mécaniques des différents matériaux de structure à base de ciment.

¹ Hygrique: mot couramment employé dans la littérature spécialisée et signifiant «lié à la dessiccation ou à l'humidification».

² Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

2. Modèle du matériau

Récemment, un modèle a été développé pour décrire l'influence de l'humidité sur les propriétés des matériaux microporeux [1, 2]². Selon ce modèle, à l'état sec, toutes les particules sont comprimées par l'énergie superficielle. La pression hydrostatique P est donnée en fonction du rayon moyen des particules r par l'équation suivante:

$$P = \frac{2\gamma}{r} \quad (1)$$

où γ représente l'énergie superficielle des produits d'hydratation du béton cellulaire. Il est évident que la pression P n'est notable que pour les particules qui ont un rayon r suffisamment petit.

Quand l'eau est adsorbée à la surface, l'énergie superficielle diminue. La variation d'énergie superficielle $\Delta\gamma$ peut être exprimée en fonction de l'épaisseur du film d'eau adsorbée Γ et de la pression de vapeur correspondante p :

$$\begin{aligned} \Delta\gamma &= \gamma_0 - \gamma \\ &= RT \int_0^p \Gamma d(\ln p) \end{aligned} \quad (2)$$

Cette variation d'énergie superficielle $\Delta\gamma$ correspond directement à une variation de pression hydrostatique ΔP :

$$\Delta P = \frac{2}{r} \Delta\gamma \quad (3)$$

Si nous admettons pour simplifier que toutes les particules ont la même taille, le changement hygrique de volume $\Delta V/V$ est proportionnel à $\Delta\gamma$. On exprime plus fréquemment le changement hygrique de longueur en fonction de $\Delta\gamma$:

$$\Delta l/l = \lambda \Delta\gamma \quad (4)$$

Dans l'équation (4), λ est un paramètre qui caractérise le système poreux. En introduisant des hypothèses simplificatrices, λ peut être exprimé en fonction de la surface interne S , de la masse spécifique du matériau ρ et du module d'élasticité E des particules:

$$\lambda = \frac{S\rho}{3E} \quad (5)$$

En général, on détermine λ expérimentalement.

La propagation des fissures dans un matériau poreux tel le béton cellulaire peut être approximativement décrite par le critère de Griffith:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}} \quad (6)$$

où c est la longueur caractéristique de fissure.

Si l'énergie superficielle varie, la résistance finale du matériau varie également. Nous pouvons donc écrire l'équation (6) sous la forme suivante:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^2 = \frac{\gamma}{\gamma_0} \quad (7)$$

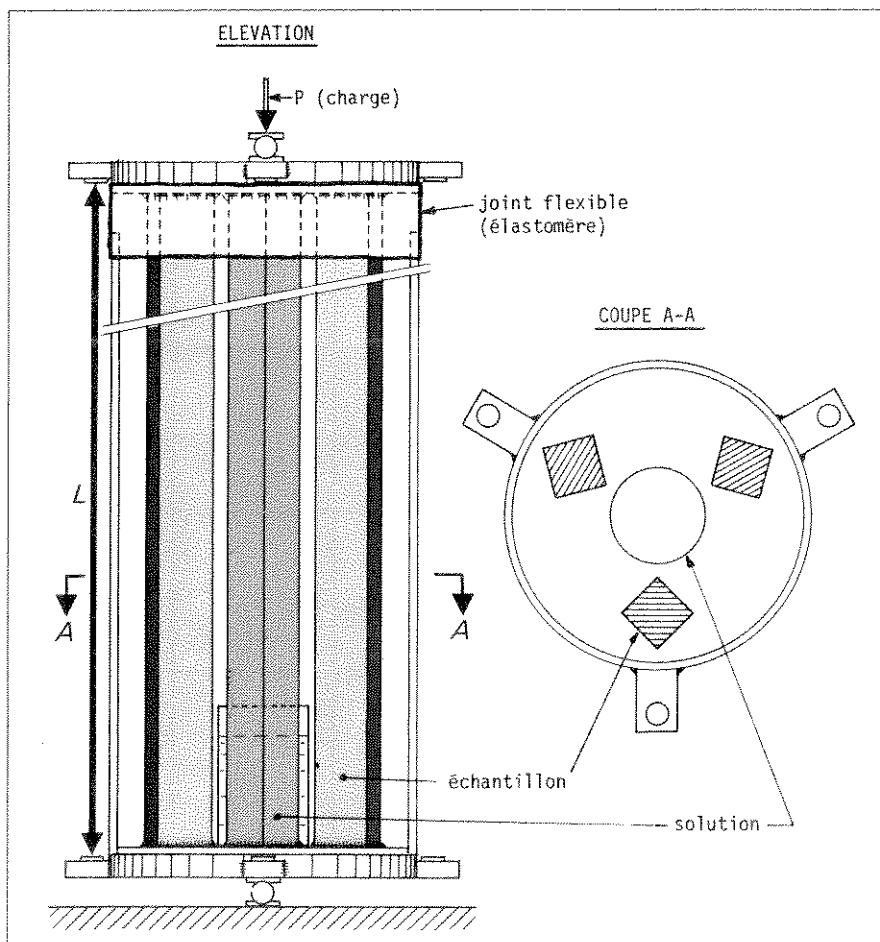


Fig. 1. — Montage expérimental pour les mesures de fluage.

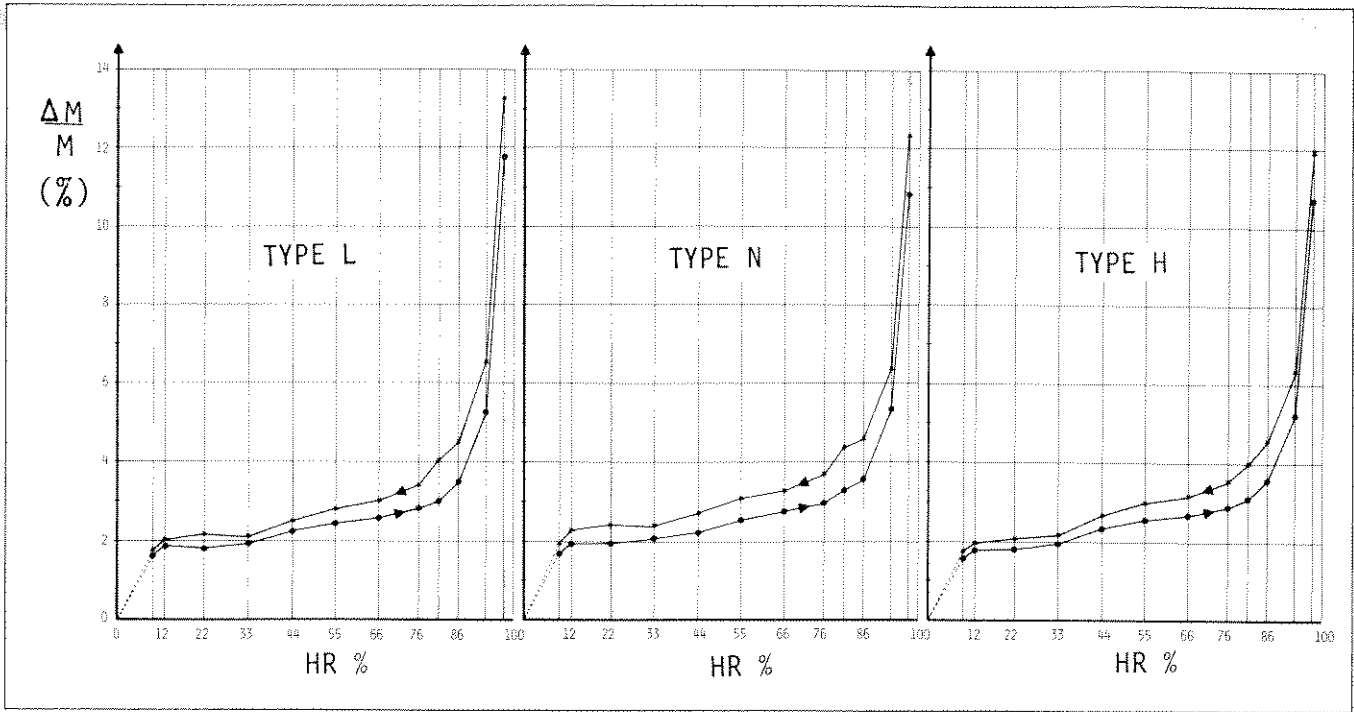


Fig. 2. — Isothermes de sorption pour trois types différents de béton cellulaire. Les courbes d'adsorption et de désorption sont indiquées par une flèche. Sur l'axe vertical, la variation de masse $\frac{\Delta M}{M}$ (%) est indiquée.

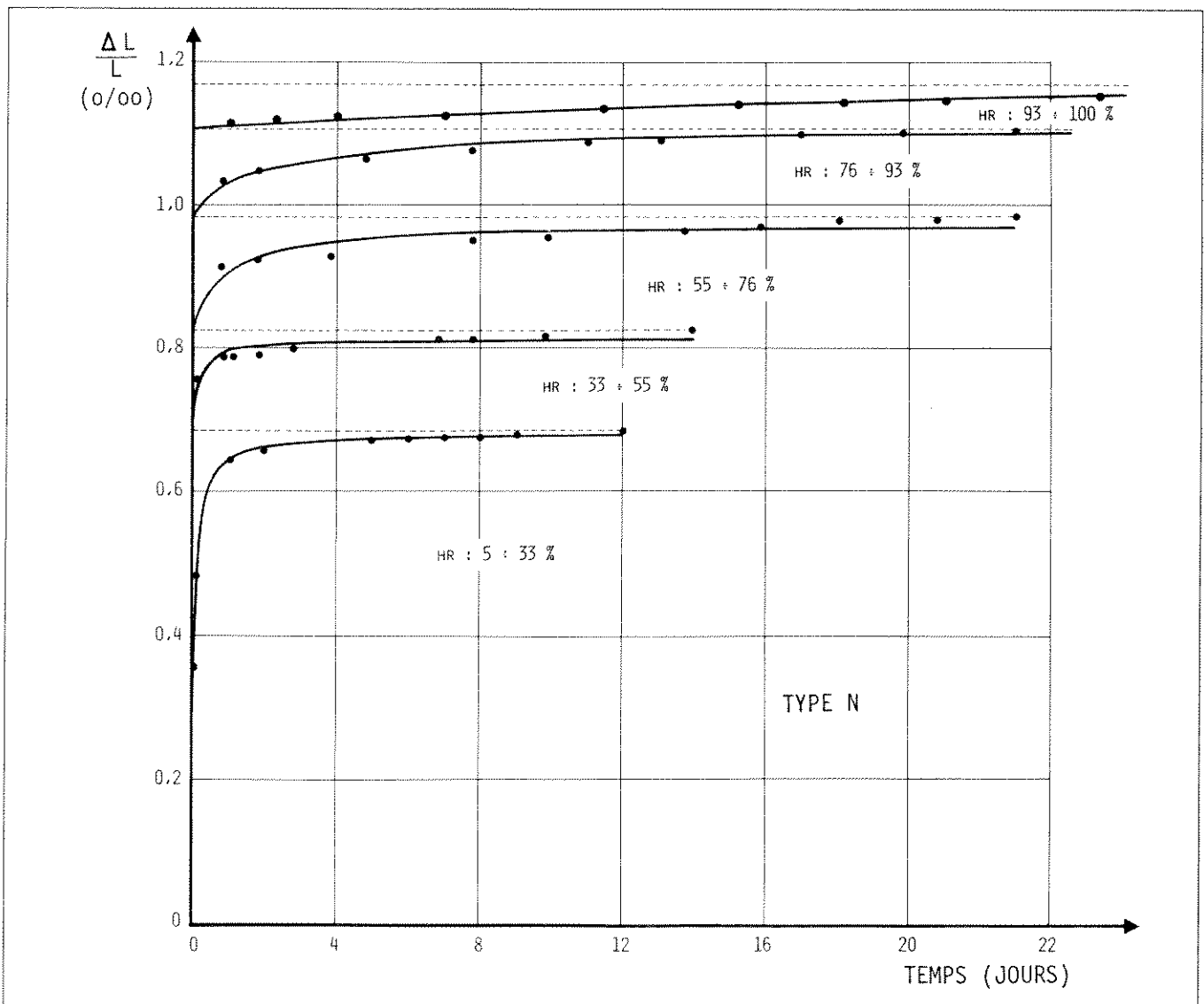


Fig. 3. — Gonflement du béton cellulaire en fonction du temps. Les courbes en trait continu ont été calculées selon l'équation (10). Lorsqu'on a changé l'humidité, la dernière valeur du précédent intervalle d'humidité (en traitillé) a servi de nouveau zéro pour $\Delta L/L$.

Dans cette équation, l'indice 0 se réfère à l'état sec. L'équation (7) peut être écrite à nouveau sous la forme suivante:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^2 = 1 - \frac{\Delta l}{\gamma_0} \quad (8)$$

Si nous introduisons l'équation (4) dans l'équation (8), nous obtenons une relation entre le carré du rapport des résistances et le changement hygrique de longueur:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^2 = 1 - \frac{1}{\lambda \gamma_0} \frac{\Delta l}{l} \quad (9)$$

Ces relations sont valables dans les régions de faible humidité ($0\% \leq HR \leq 40\%$) où l'énergie superficielle est nettement modifiée par les films d'eau adsorbés. Au-dessus de 50% HR, un autre phénomène devient dominant, c'est la pression disjonctive. A teneur en eau élevée, les films d'eau peuvent pénétrer entre les surfaces solides des particules voisines et créer ainsi une expansion supplémentaire qui en même temps affaiblit la structure. Comme conséquence, on peut attendre, à humidité élevée, une nouvelle réduction des résistances et une augmentation du fluage.

Les résultats expérimentaux donnés dans cette contribution seront interprétés sur la base de ce modèle de matériau. On montrera que ce modèle (le modèle de Munich) est apte à décrire de façon adéquate le comportement des matériaux microporeux.

3. Partie expérimentale

3.1 Matériaux utilisés

Trois types de béton cellulaire provenant du même fabricant ont été utilisés. La densité, la résistance à la compression et le module d'élasticité sont donnés dans le tableau I.

Les densités qui ont été déterminées après séchage à 105 °C sont respectivement 307, 386 et 501 kg/m³ pour les types L, N, H. Les éprouvettes ont été obtenues par sciage de parpaings; leur plus grande dimension est celle du gonflement qui se produit lors de la fabrication.

3.2 Sorption, retrait et gonflement

Les isothermes de sorption ont été déterminées sur 25 à 30 g de fragments (environ 20/20/5 mm) progressivement séchés jusqu'à 80 °C. Les échantillons ont été placés sous vide dans 12 dessiccateurs à humidité relative contrôlée entre 9 et 97,4% en utilisant des solutions saturées de sels. L'augmentation de masse, qui est stable après 7 jours, a été mesurée avec une précision de 2 mg. Ces mesures permettent d'obtenir l'isotherme d'adsorption.

Les mêmes échantillons ont été équilibrés dans une atmosphère à 100% d'humidité relative et placés à nouveau dans des dessiccateurs pour observer la diminution de masse, qui est stable après 28 jours. On obtient alors l'isotherme de désorption.

TABEAU I: Principales caractéristiques des matériaux utilisés (données du fabricant).

Type	L	N	H
Densité apparente (kg/m ³)	415	520	630
Résistance à la compression (N/mm ²)	≥ 2	≥ 3	≥ 5
Module d'élasticité (N/mm ²)	1200	1500	1750

La température a été maintenue à 20 ± 1 °C durant ces mesures. La masse des échantillons séchés à 105 °C a été déterminée après les mesures de sorption.

Les mesures de retrait et de gonflement ont été effectuées sur une paire de prismes 20/20/190 mm pour chaque type de matériau. Les échantillons placés sur un bâti ont été maintenus à 18 ± 1 °C. Les déformations ont été mesurées au moyen d'un comparateur (1 division = 1 μm) placé sur chaque éprouvette. Les mesures ont été effectuées sur deux séries, une pour le retrait et l'autre pour le gonflement. Pour le retrait, les échantillons ont été équilibrés sous vide à 100% HR avant les mesures, puis conservés à des humidités décroissantes par paliers.

Les humidités relatives ont été obtenues au moyen de solutions saturées de sels jusqu'à 33% HR, puis finalement le silicagel a été utilisé pour obtenir une atmosphère sèche, d'environ 5% HR.

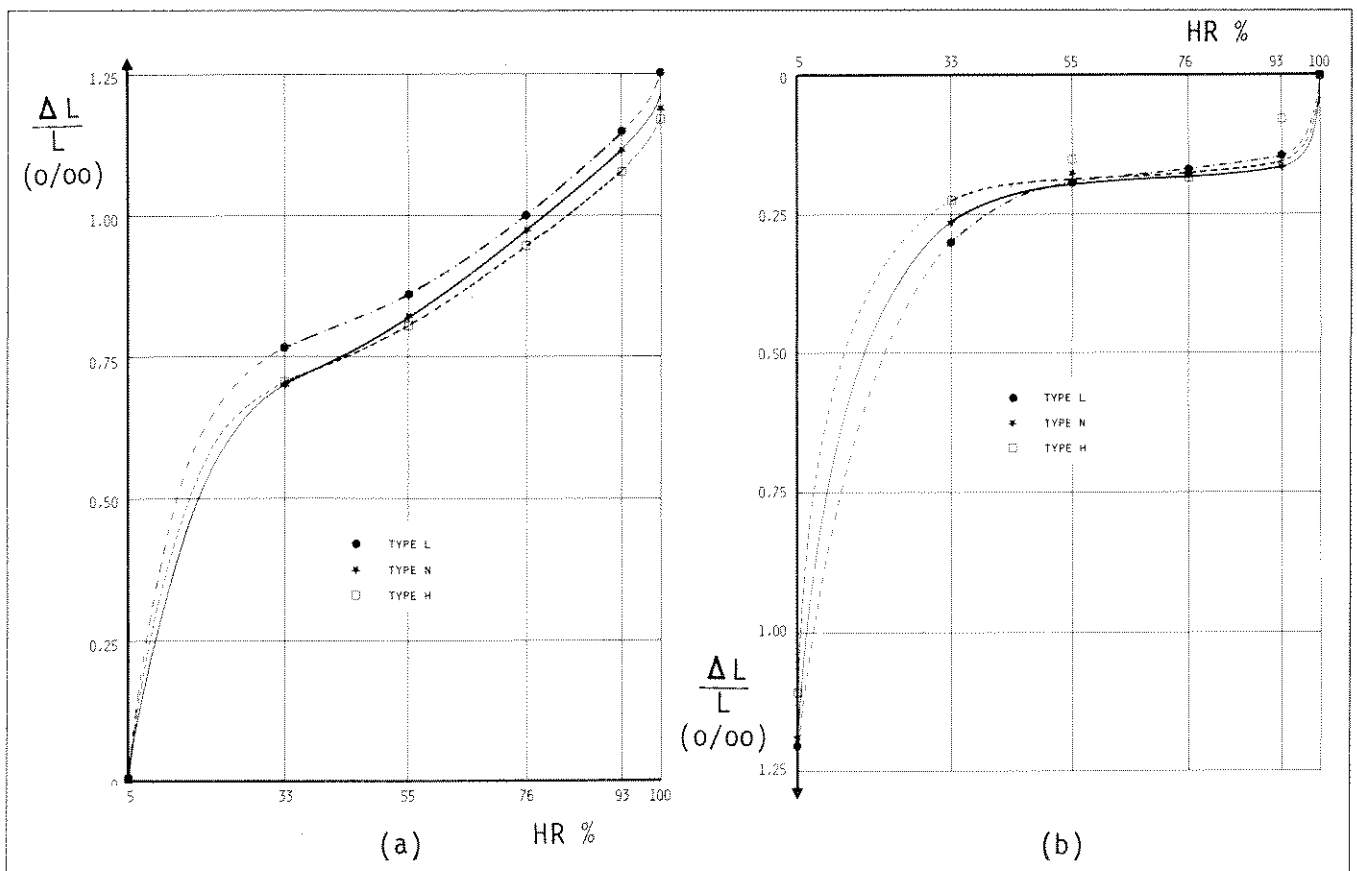


Fig. 4. — Gonflement (a) et retrait (b) en fonction de HR.

Pour les essais de gonflement, les échantillons ont tout d'abord été équilibrés sous vide à 5% HR (silicagel) après avoir été séchés à 35 °C. L'humidité a alors été augmentée par paliers d'environ 20%. Les humidités ont été obtenues au moyen des mêmes solutions saturées de sels déjà décrites pour les essais de retrait et la valeur finale avec de l'eau pure.

3.3 Fluage

Les mesures de fluage en compression ont été effectuées sur des éprouvettes 20/20/300 mm en équilibre avec différentes humidités relatives. Le niveau de contrainte appliquée est d'environ 50% de la contrainte de rupture, déterminée sur des échantillons 20/20/60 mm à 76% HR. La figure 1 montre la disposition des échantillons pour les essais de fluage.

3.4 Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression ont été effectués sur 12 prismes

TABLEAU II: Paramètres a et n de l'équation (11) en fonction de HR. Le fluage spécifique à $t = 1$ jour est également indiqué.

Type	σ N/mm ²		Humidité relative (%)					
			9	33	55	76	93	100
L	0,81	a (o/oo)	-	-	0,028	0,030	0,038	0,043
		n	-	-	0,15	0,14	0,20	0,20
		$\epsilon_{sp} = \frac{a}{\sigma}$	-	-	0,035	0,037	0,047	0,053
N	1,38	a (o/oo)	0,032	0,032	0,041	0,044	0,060	0,060
		n	0,27	0,26	0,25	0,26	0,28	0,29
		$\epsilon_{sp} = \frac{a}{\sigma}$	0,023	0,023	0,030	0,032	0,043	0,043
H	1,95	a (o/oo)	-	-	0,034	0,039	0,049	0,055
		n	-	-	0,19	0,20	0,24	0,26
		$\epsilon_{sp} = \frac{a}{\sigma}$	-	-	0,017	0,020	0,025	0,028

20/20/60 mm. Six séries ont été testées, chacune en équilibre avec une humidité relative bien définie. La vitesse de charge choisie est de 100 N/min.

4. Résultats et discussions

4.1 Isothermes de sorption

Les isothermes de sorption pour trois types différents de béton cellulaire sont données à la figure 2. On constate que la surface interne ne dépend pas notablement du type de béton cellulaire. La surface spécifique selon B.E.T., calculée à partir des isothermes de la figure 2, est d'environ 44 m²/g.

4.2 Variation hygrique de longueur

La figure 3 montre le gonflement du béton cellulaire (type N) pour les différentes humidités choisies. Les courbes continues ont été calculées en ajustant une fonction hyperbolique

$$\epsilon = \frac{at}{b+t} \quad (10)$$

aux résultats expérimentaux. La valeur a de l'équation (10) est équivalente à la valeur finale de ϵ ($t = \infty$). Le paramètre b indique le temps nécessaire pour obtenir la moitié du changement hygrique de longueur.

Les résultats des mesures de gonflement et de retrait pour les trois différents types de béton cellulaire sont représentés sur la figure 4.

Il y a une hystérèse marquée dans les isothermes de changement de longueur. Selon le modèle décrit précédemment, la variation de longueur est une fonction linéaire de la variation d'énergie superficielle (équation 4). La variation d'énergie superficielle en fonction de l'humidité relative a été calculée par Setzer et Wittmann [3]. Ces valeurs ont été utilisées pour évaluer nos résultats. Nous avons déjà souligné que la relation linéaire n'est valable qu'à basse humidité relative (HR < 50%). La figure 5 montre que l'équation (4) décrit de façon satisfaisante le gonflement du béton cellulaire. A humidité relative élevée, l'expansion additionnelle est due à l'ac-

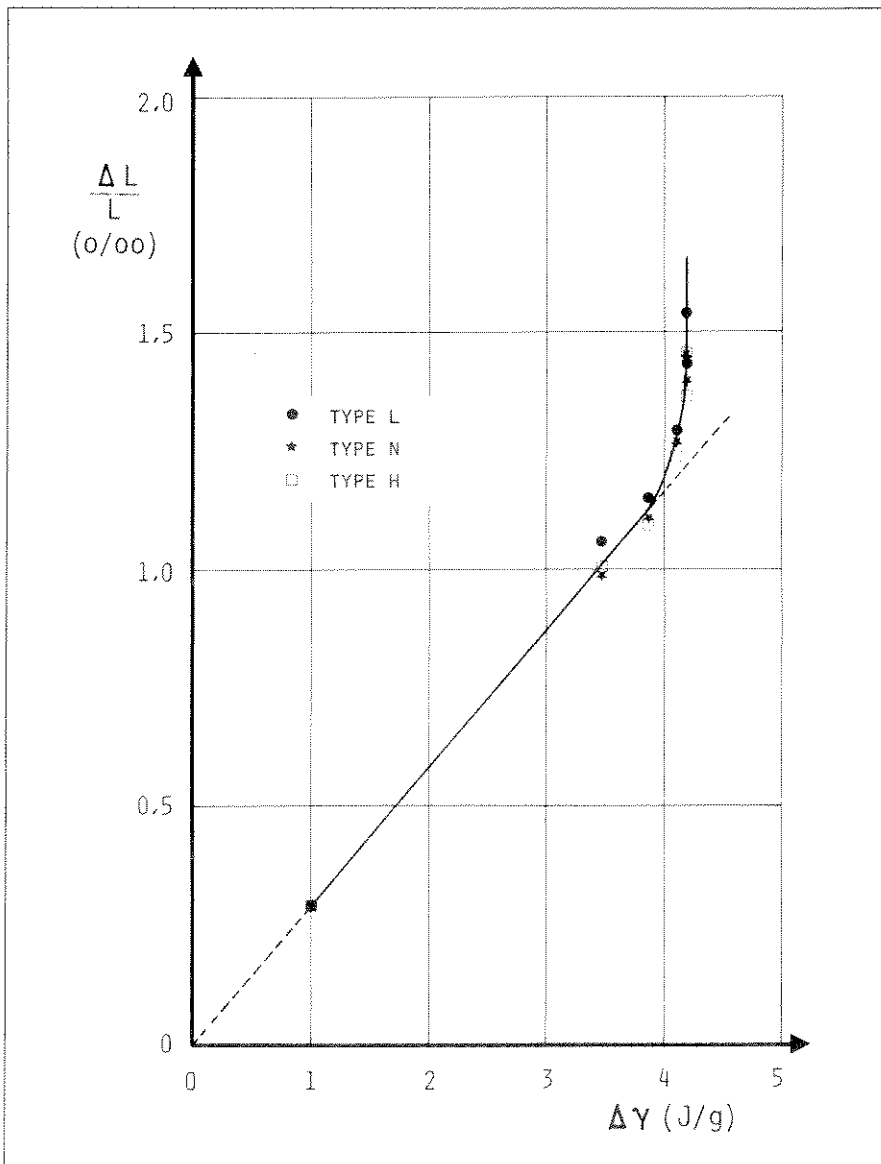


Fig. 5. — Gonflement hygrique en fonction de la variation de l'énergie superficielle. La droite a été calculée selon l'équation (4).

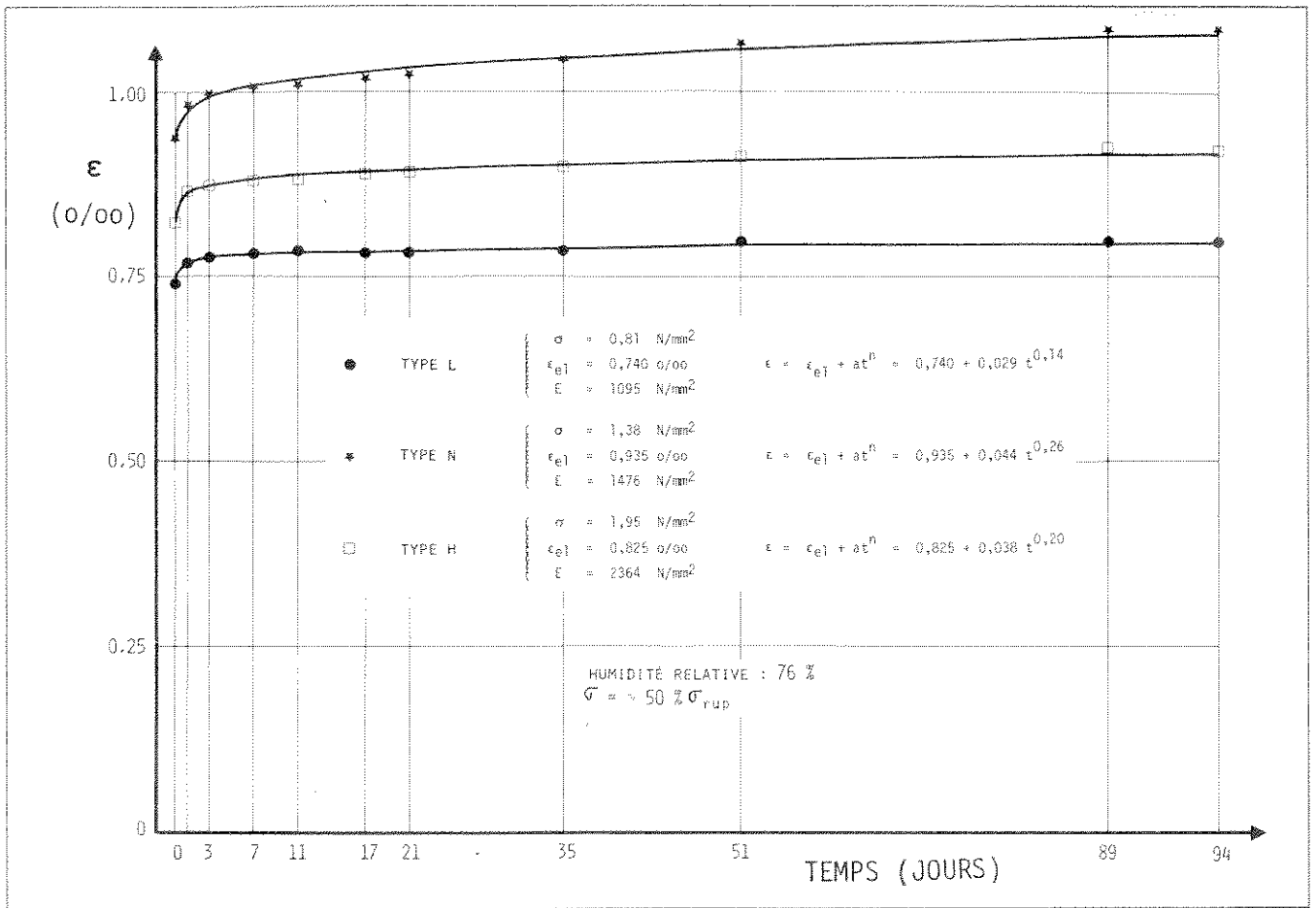


Fig. 6. — Déformation totale des trois différents types de béton cellulaire en fonction du temps.

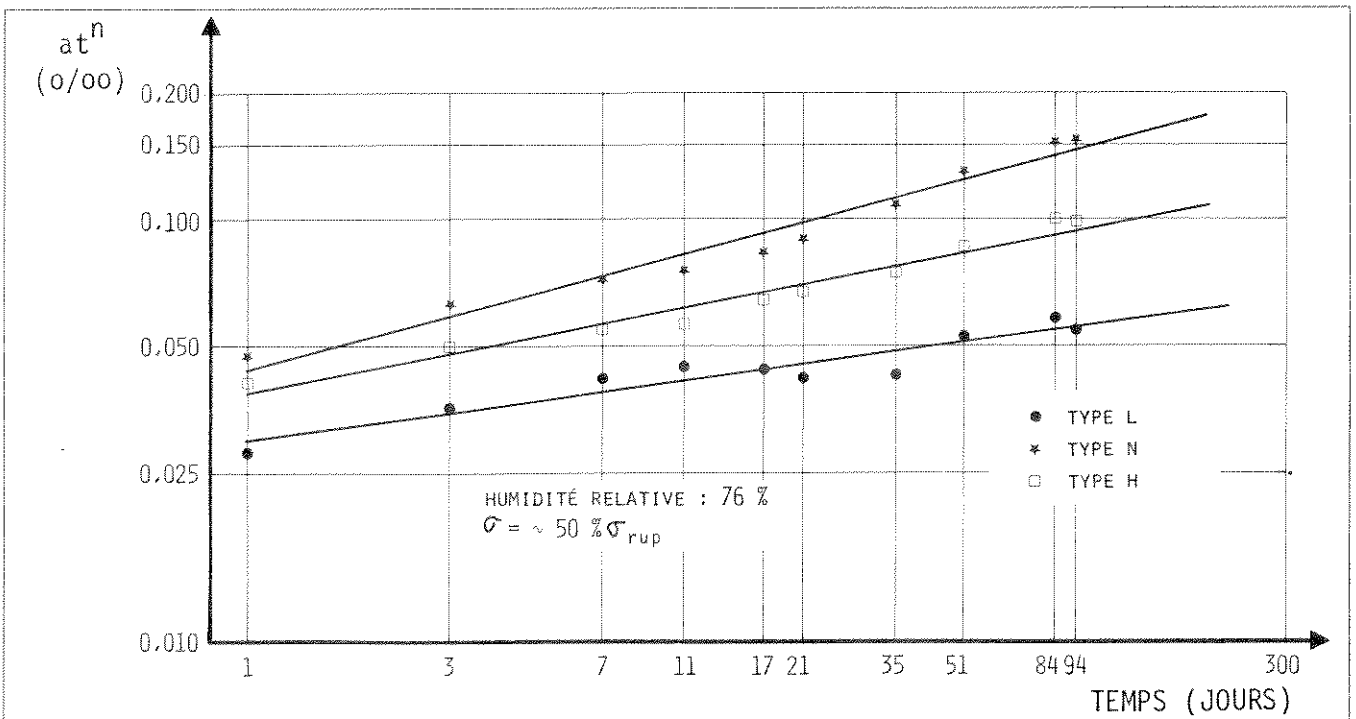


Fig. 7. — Valeurs du fluage reprises de la figure 6 et représentées à une échelle doublement logarithmique.

tion de la pression disjonctive. A partir de la pente de la droite de la figure 5, nous avons calculé λ de l'équation (4) et trouvé une valeur de $0,29 \cdot 10^{-3}$ g/J. Des courbes similaires à celles de la figure 3 ont été obtenues pour le retrait. Dans la région comprise entre 90% HR et 40% HR, un faible retrait est observé.

Cela peut être expliqué par le fait que durant le séchage, l'équilibre complexe entre les forces capillaires et la pression disjonctive reste pratiquement constant. Splittgerber [4, 6] a montré que la pression disjonctive chute à humidité relative comparativement basse. Cependant, au-dessous de 33% HR, une très

importante variation de longueur se produit lorsque la chute de la pression disjonctive et de l'action de l'énergie superficielle a lieu en même temps.

4.3 Fluage

Les courbes de déformation en fonction du temps pour des échantillons conser-

TABLEAU III: Module d'élasticité (N/mm^2) en fonction de HR pour les trois différents types de béton cellulaire.

Type	Humidité relative (%)						
	5	33	55	76	93	100	
L	σ N/mm^2	2,04	1,71	1,65	1,51	1,49	1,23
	cv %	20	19	10	19	20	15
N	σ N/mm^2	3,19	2,55	2,48	2,52	2,34	2,49
	cv %	13	12	12	10	10	7
H	σ N/mm^2	5,66	4,87	4,29	4,16	3,90	3,71
	cv %	14	15	13	15	11	9

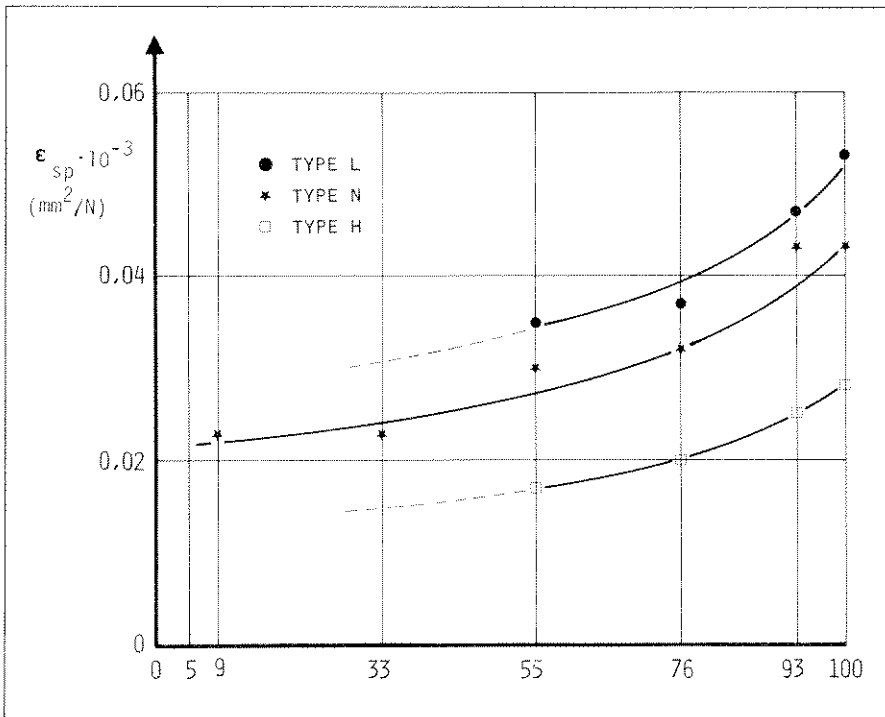


Fig. 8. — Influence de HR sur le fluage spécifique.

vés à 18 °C et 76% HR sont données sur la figure 6. Chaque point est la moyenne de 12 mesures, c'est-à-dire 4×3 éprouvettes (voir fig. 7).

Les courbes ont été calculées avec la fonction:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_{\text{élast.}} + \varepsilon_{\text{fluage}} \\ &= \varepsilon_{\text{élast.}} + a t^n \end{aligned} \quad (11)$$

où les paramètres a et n ont été déterminés par la méthode des moindres carrés. Les valeurs de a , n et celle du fluage spécifique a/σ sont données dans le tableau II. La déformation élastique des trois différents types de béton cellulaire est donnée dans le tableau III. Sur la figure 7, $\varepsilon_{\text{fluage}} = a t^n$ est représenté à une échelle doublement logarithmique. Les points mesurés sont pratiquement alignés sur la droite. La même approche a été adoptée pour 9, 33, 55, 93 et 100% HR, mais seulement avec 3 éprouvettes. Le fluage spécifique en fonction de HR est représenté à la figure 8. On peut voir que le fluage spéci-

fique diminue assez sensiblement avec l'humidité; cette diminution est approximativement un tiers entre 100 et 55% HR. Au-dessous, la diminution est pratiquement nulle. La fonction exponentielle décrit le fluage du béton cellulaire aussi bien que celui du béton normal [5].

L'influence de la teneur en humidité sur le fluage est qualitativement équivalente pour le béton cellulaire et pour la pâte de ciment durci et le béton [6]. Cependant, la diminution du fluage spécifique avec la diminution de HR est nettement plus faible pour le béton cellulaire. Cela est dû à la structure plus grossière et plus stable de ce matériau.

4.4 Résistance à la compression

La résistance à la compression a été déterminée sur des prismes 20/20/60 mm entre 5 et 100% HR. Les valeurs obtenues et le coefficient de variation sont donnés dans le tableau IV.

Les valeurs moyennes pour les trois types de béton cellulaire sont données à la figure 9.

La courbe de la figure 10 a été calculée selon l'équation (8) en utilisant les valeurs de $\Delta\gamma$ pour les humidités correspondantes entre 5 et 76%. On peut voir que la corrélation entre les valeurs expérimentales et calculées est relativement bonne jusqu'à environ 76% HR. Cependant, comme l'équation (8) ne tient pas compte de la pression disjonctive qui a une influence déterminante à humidité élevée, la relation linéaire n'est plus valable au-dessus de 70% HR. L'équation (8), c'est-à-dire la droite de la figure 10, a été redessinée à la figure 9. La zone en pointillés à HR élevée indique l'influence de la pression disjonctive sur la résistance à la compression.

L'équation (9) décrit la relation entre le changement hygrique de longueur avec la diminution de résistance à la compression. Les résultats sont donnés sur la figure 11. Il est clair que les résultats expérimentaux concordent relativement bien avec les prédictions du modèle de Munich.

5. Conclusions

La surface interne du type de béton cellulaire utilisé dans cette contribution est d'environ 44 m^2/g . Cette valeur ne varie pas de façon significative avec la densité du matériau. Le changement hygrique de longueur montre une hystérèse marquée. La résistance à la compression décroît lorsque la teneur en humidité croît.

Le comportement observé du matériau peut être expliqué quantitativement sur la base du modèle de Munich. Cela signifie qu'à basse humidité l'énergie superficielle des particules dans la microstructure est modifiée par la sorption. Comme conséquence, toutes les particules augmentent de volume (équation 4) et les fissures peuvent se développer plus facilement (équation 6). Dans le domaine d'humidité relative élevée, la pression disjonctive de l'eau adsorbée provoque un affaiblissement supplémentaire de la microstructure, ce qui cause un gonflement additionnel et une nouvelle diminution de résistance. Sur la base du modèle de Munich, le comportement observé du béton cellulaire peut être lié directement avec les propriétés correspondantes d'autres matériaux microporeux tels la pâte de ciment durci et le béton.

TABLEAU IV:

Type	Humidité relative (%)					
	9	33	55	76	93	100
L	-	-	1176	1095	1041	955
N	1606	1589	1445	1476	1386	1374
H	-	-	2315	2364	2324	2243

Bibliographie

- [1] F. H. WITTMANN, *Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 290, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1977, pp. 43-101.
- [2] F. H. WITTMANN, *The structure of hardened cement paste — A basis for a better understanding of the materials properties*, Proc. Conf., Hydraulic Cement Pastes, their structure and properties, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1976, pp. 96-117.
- [3] M. J. SETZER and F. H. WITTMANN, *Surface energy and mechanical behaviour of hardened cement paste*, Appl. Phys. 3 (1974), 403-409.
- [4] H. SPLITTGERBER, *Studium de van der Waals-Kräfte zwischen makroskopischen Körpern bei Abständen von 100 Å bis 1600 Å*, Diss. TU München, ausserdem erschienen als Heft 3 der Berichte der Abteilung für Werkstoffphysik, TU München, München, 1971.
- [5] Z. P. BAZANT and E. OSMAN, *Double power law for basic creep of concrete*, Mater. Constr. 9 (1976), 3-11.
- [6] F. H. WITTMANN, *Interaction of hardened cement paste and water*, J. Am. Cer. Soc. 56 (1973), 409-415.

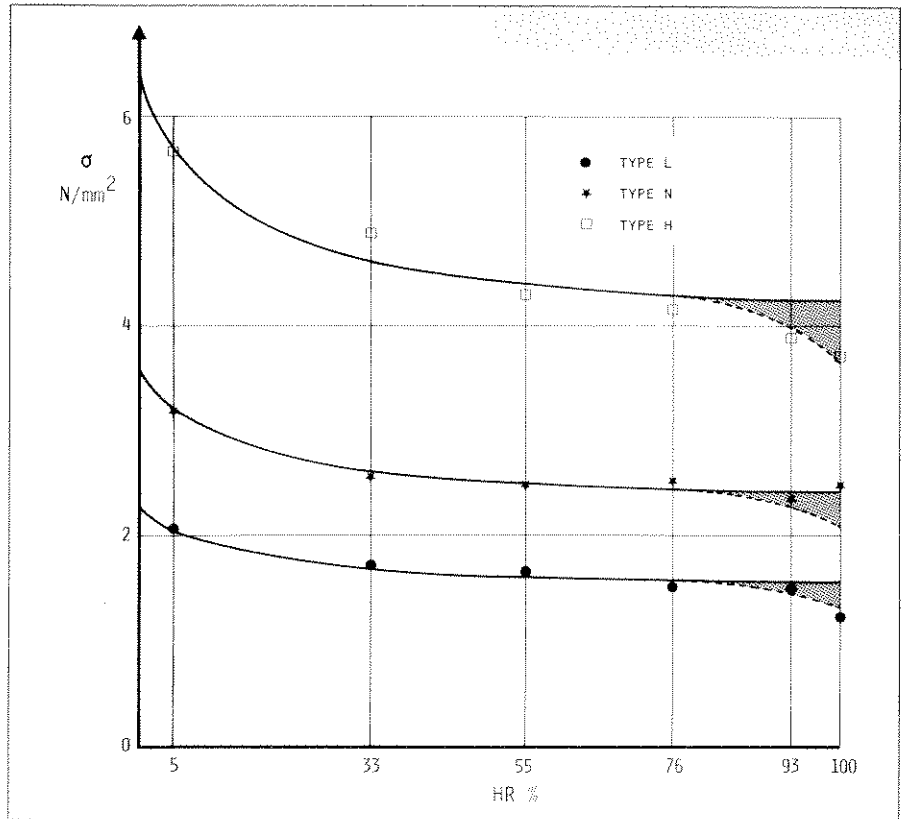


Fig. 9. — Résistance à la compression en fonction de HR. Les courbes continues ont été calculées selon l'équation (8).

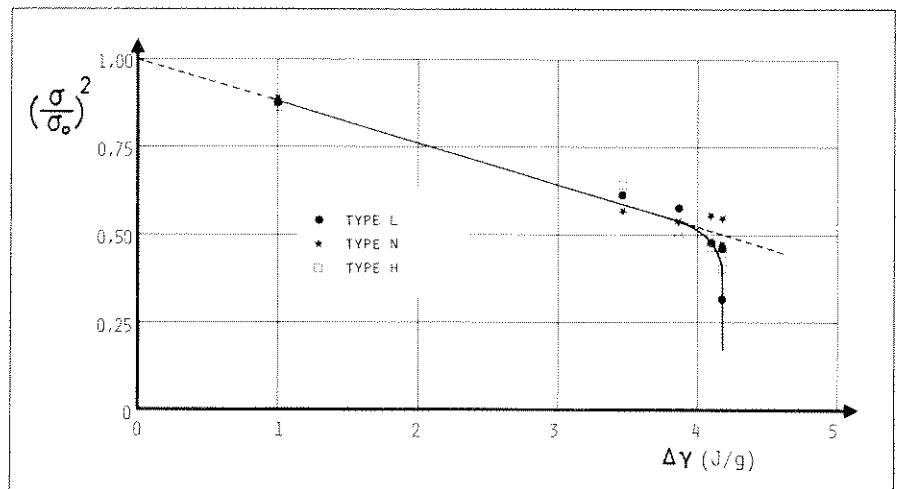


Fig. 10. — Carré du rapport des résistances en fonction de la variation d'énergie superficielle. La droite a été calculée selon l'équation (8).

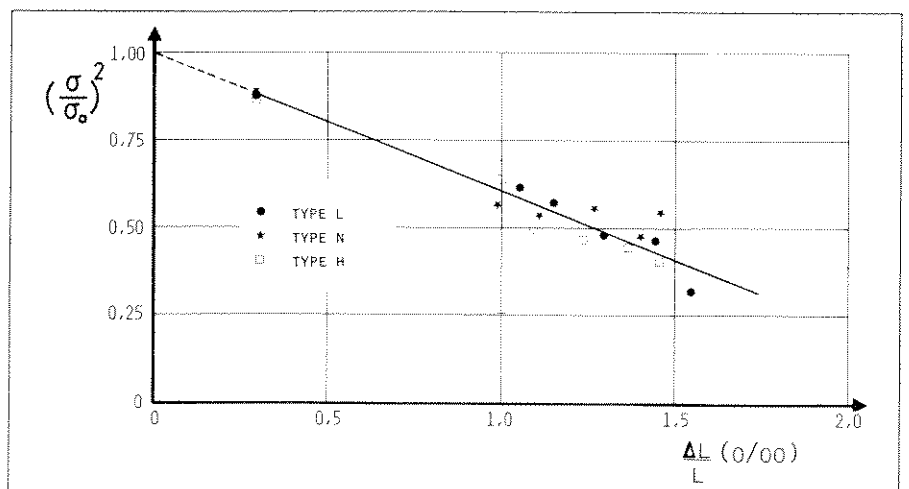


Fig. 11. — Carré du rapport des résistances en fonction du gonflement hygric. La droite a été calculée selon l'équation (9).

Adresse des auteurs:
 Yves Houst, Fermin Alou
 et Folker H. Wittmann
 Laboratoire des matériaux
 de construction de l'EPFL
 Chemin de Bellerive 32
 1007 Lausanne