

Zeitschrift: Bulletin du ciment
Herausgeber: Service de Recherches et Conseils Techniques de l'Industrie Suisse du Ciment (TFB AG)
Band: 30-31 (1962-1963)
Heft: 14

Artikel: La pâte de ciment durcie
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-145610>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN DU CIMENT

FÉVRIER 1963

31^E ANNÉE

NUMÉRO 14

La pâte de ciment durcie

**Développement, composition et structure de la pâte de ciment durcie.
Gel, pores du gel et pores capillaires. Influence des propriétés du ciment
sur la résistance et la compacité du béton.**

La propriété majeure de la pâte de ciment est de pouvoir durcir (BC 8/62) et agglomérer solidement entre eux les granulats qui constituent le squelette du béton. C'est donc elle qui détermine les propriétés principales du béton, notamment sa résistance, sa perméabilité et sa durabilité.

Les qualités dominantes de la pâte de ciment durcie dépendent moins de sa composition chimique que de sa structure. La première est encore assez mal connue, mais elle offre une certaine constance du fait de la régularité de la fabrication du ciment. En revanche, la connaissance de la structure a fait de grands progrès au cours des dernières années.

On a constaté que la pâte de ciment durcie est constituée de particules extrêmement ténues dont l'épaisseur ne dépasse pas celle de quelques molécules. On donne le nom de **gel de ciment** à la partie hydratée de la pâte de ciment et de **pores du gel** aux espaces situés entre les fines particules du gel.

Le clinker de ciment est composé d'un agglomérat des quatre constituants principaux suivants:

Silicate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	env. 50%
Silicate bicalcique	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	env. 25%
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	env. 10%
Ferroaluminate tetracalcique	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	env. 10%

A l'exception des plus fins d'entre eux, chaque grain de ciment contient ces quatre composants réunis. En présence d'eau, ils

2 s'hydratent progressivement au cours du durcissement et forment de nouvelles combinaisons.

Les silicates tri- et bicalcique hydratés forment la majorité et sont aussi les constituants les plus actifs du durcissement. Leur composition moyenne peut être représentée par la formule $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Au cours de leur cristallisation, les oxydes de calcium et de silicium forment alternativement des couches réticulées superposées, entre lesquelles se placent les molécules d'eau. Cette structure cristalline est complètement différente de celle que possédaient auparavant les silicates de calcium. Ainsi le rôle de l'eau n'est pas simplement de pénétrer entre les cristaux du clinker et de s'y fixer solidement, mais de les dissoudre couche après couche en libérant les molécules de leurs liaisons cristallines ce qui leur permet de se déplacer et de se regrouper différemment. Au cours de ce processus, il ne se forme pas uniquement du calcium et du silicate hydratés, mais aussi de l'hydroxyde de calcium libre, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, qui, suivant les circonstances, peut provoquer les efflorescences blanches observées parfois à la surface du béton.

Ce qu'il y a de caractéristique dans la structure de la pâte de ciment durcie, c'est cette répartition du calcium et du silicate hydratés en couches extrêmement minces. Alors que les cristaux de l'hydroxyde de calcium sont encore juste perceptibles au microscope, les particules hydratées sont 1000 fois plus petites avec un diamètre de $1:1000000$ à $1:100000$ mm (fig. 1). Des vues prises au microscope électronique ainsi que l'interprétation de mesures d'adsorption et de compacité montrent que ces particules hydratées ont une forme allongée, qu'elles sont entremêlées en une sorte de feutre (gel de ciment), et qu'elles laissent entre elles des vides (pores du gel). La proportion de pores du gel est à peu près constante et voisine de 30% du volume total du gel.

Une valeur qui exprime bien l'extrême petitesse des corpuscules du gel de ciment est celle de leur surface spécifique qui est de 400 à 500 m^2/g (en comparaison, celle du ciment est de 0,3 m^2/g et celle d'un sable 0–1 mm de 0,01 m^2/g).

L'action de l'eau sur les silicates de calcium commence dès le début de la prise. Il se forme premièrement de très fines membranes de gel qui éclatent sous l'effet de la pression osmotique, ce qui permet aux réactions d'hydratation de se développer rapidement au début. A la fin de la prise, le 15% environ du ciment est déjà hydraté. Les couches de gel devenant plus épaisses, elles ne peuvent plus éclater en sorte que l'hydratation se poursuit toujours plus lentement. L'acheminement de l'eau vers les points de réaction devient progressivement plus lent et plus difficile à

3 travers des pores se resserrant de plus en plus. Le diamètre des pores du gel n'est que de 5 à 15 fois plus grand que celui des molé-

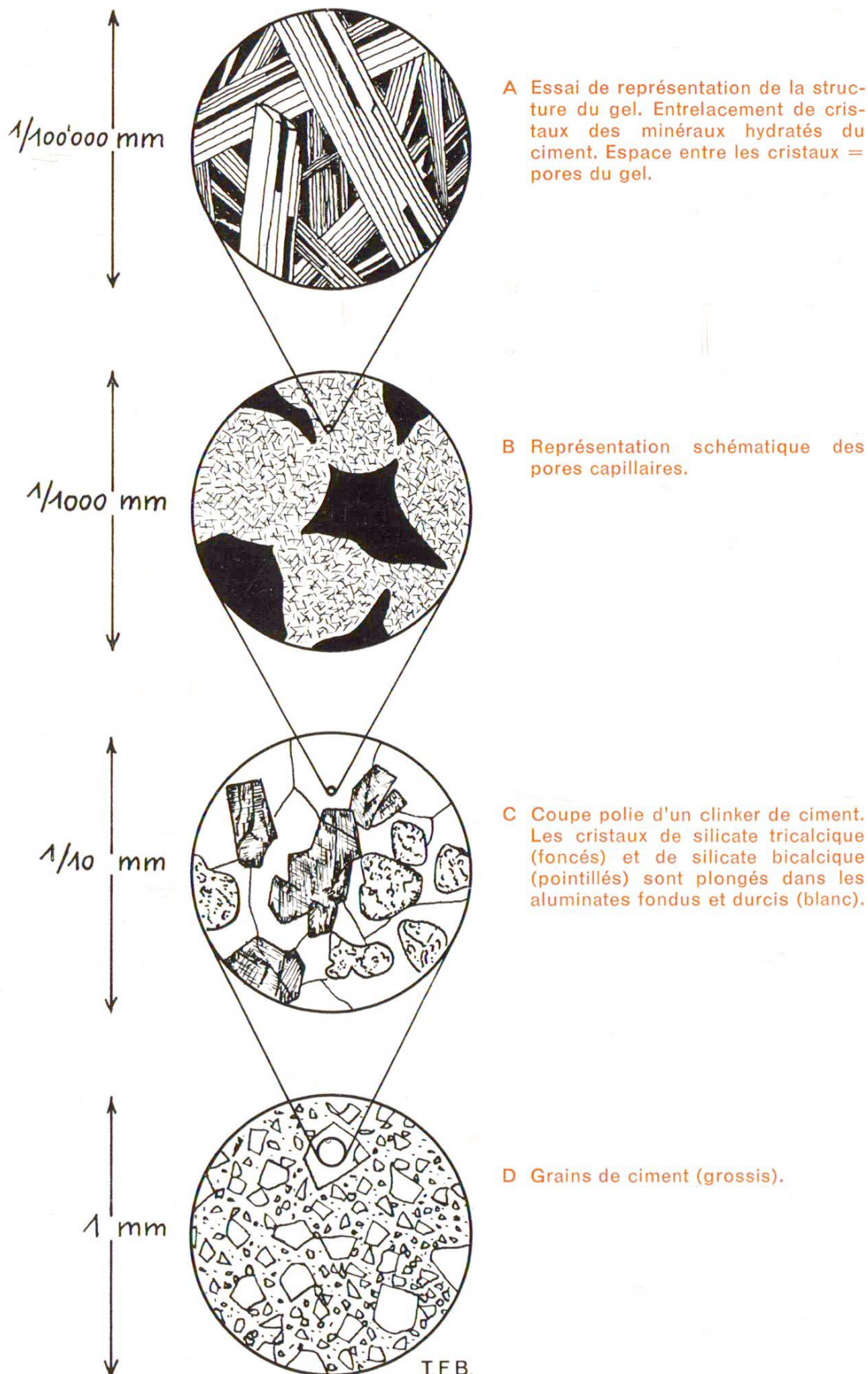


Fig. 1 Représentation schématique des grandeurs relatives des composants de la pâte de ciment durcie (A et B, après hydratation; C et D, avant hydratation).

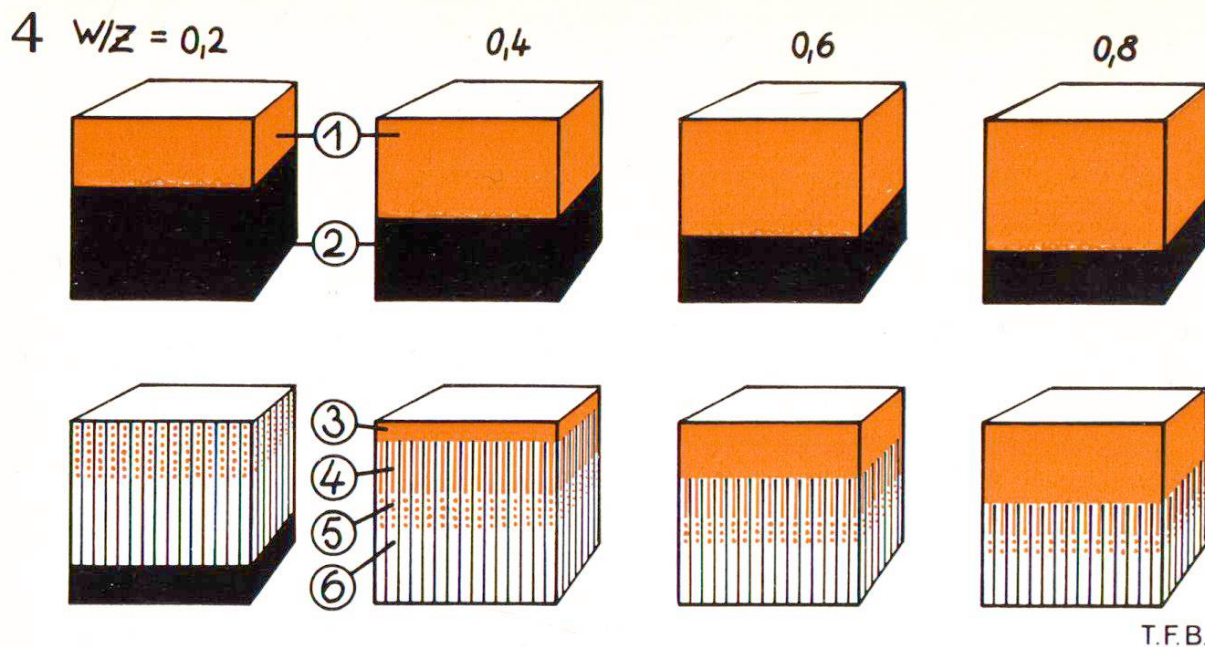


Fig. 2 Répartition des volumes à l'intérieur de la pâte de ciment à l'état frais et après un certain degré d'hydratation, pour des facteurs eau/ciment de 0,2; 0,4; 0,6 et 0,8. 1. Eau de gâchage; 2. ciment; 3. eau inutile = volume des pores capillaires; 4. eau fixée dans les pores du gel; 5. eau fixée chimiquement; 6. volume spécifique de la pâte durcie (hachures verticales). Pour $e/c = 0,2$, la quantité d'eau est insuffisante, il reste du ciment non hydraté.

cules d'eau qui sont ainsi soumises à de grandes forces d'absorption, ce qui limite beaucoup leur mobilité.

Qu'en est-il des **modifications de volume** et du **régime de l'eau** pendant le durcissement de la pâte de ciment? Le volume du gel après hydratation complète est d'un peu moins du double de celui du ciment dont il est issu. Le gel va donc se répandre dans les espaces remplis d'eau que laissent entre eux les grains de ciment. Une quantité d'eau égale au cinquième du poids du ciment est liée chimiquement par l'hydratation. Un autre cinquième trouve place dans les pores du gel. Par conséquent, avec un facteur eau/ciment de 0,4 ($= \frac{2}{5}$), la totalité de l'eau de gâchage est contenue par le gel. Il se forme un ensemble fermé et saturé. Si la quantité d'eau est plus élevée, l'excédent crée des vides qu'on désigne par **pores capillaires** (fig. 2). Ils ne sont pas encore visibles au microscope bien qu'ils soient 100 à 1000 fois plus gros que les pores du gel. Pour un facteur eau/ciment situé entre 0,4 et 0,7, les pores capillaires restent fermés; pour des quantités d'eau supérieures, leur proportion devient si grande qu'une communication s'établit entre eux et l'extérieur. Ils occupent alors un tiers ou davantage du volume de la pâte.

Résumons maintenant comment se présente la structure de la pâte du ciment durcie:

1. Le **gel de ciment** est la substance principale. Il a une composition et une structure assez constantes, mais une quantité d'eau variable retenue par ses pores.

2. Des parcelles d'hydroxyde de calcium se trouvent surtout dans la couche extérieure du gel.
3. Des résidus de ciment non hydraté subsistent notamment en cas de dessèchement prématuré ou de facteur eau/ciment $< 0,4$.
4. Des restes d'eau de gâchage excédentaire qui forment des pores capillaires (facteur eau/ciment $> 0,4$).

En ce qui concerne l'influence des propriétés du ciment sur la résistance, la compacité et la durabilité du béton, seules les propriétés du gel de ciment et sa teneur en pores capillaires jouent un rôle appréciable.

La **résistance** du béton dépend étroitement du caractère propre du ciment, des conditions d'humidité, de la température et surtout du facteur eau/ciment.

La première de ces influences est déterminée par la structure du gel de ciment et par la proportion d'hydroxyde de calcium qui s'y trouve. Il est probable que les petites différences existant dans la composition des ciments agissent sur la structure du gel. Toutefois, la nature exacte de ces influences est encore très mal connue.

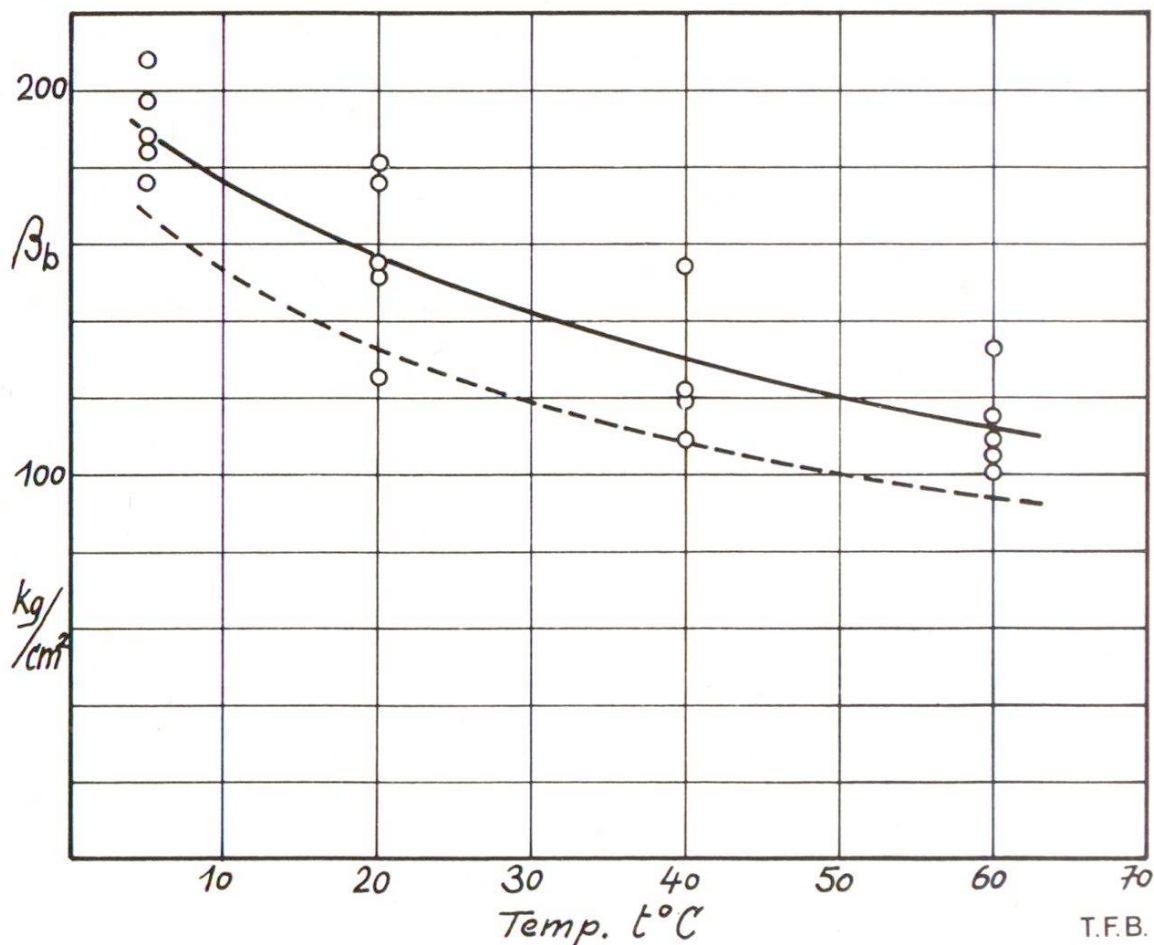


Fig. 3 Influence de la température lors de l'essai sur la résistance à la flexion β_b de la pâte de ciment durcie. Ligne pleine supérieure: conservation 3 mois dans l'eau à 40°C ; ligne pointillée inférieure: conservation 6 mois dans l'eau à 20°C . Essais après que les éprouvettes aient été placées 6 h. dans l'eau à $t^{\circ}\text{C}$ (selon G. Wischers).

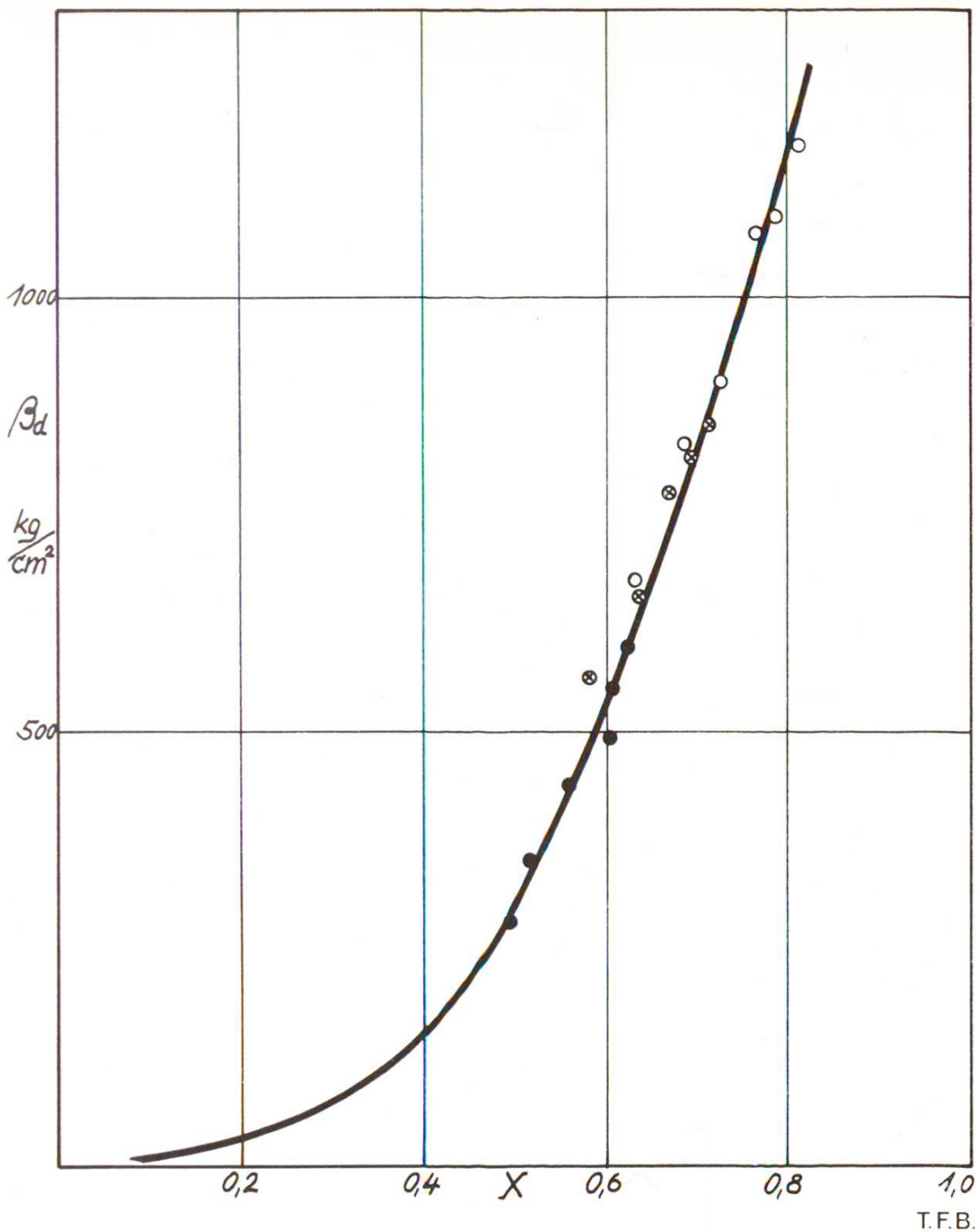


Fig. 4 Relation entre la résistance à la compression sur cube R_d et la proportion de gel dans le volume disponible (X). Les différents points se rapportent à trois mortiers différents. Le fait qu'ils se trouvent sur la même courbe indique bien qu'il s'agit d'une relation très générale (selon T. C. Powers).

On en tient compte empiriquement en fixant des normes pour la résistance du ciment et en considérant leur relation avec la résistance du béton.

L'influence de la teneur en humidité sur la résistance du béton, ainsi que celle de la température sont relativement faibles. On peut admettre que la résistance propre du gel de ciment varie en fonction de la quantité d'eau fixée dans les pores du gel. Si cette quantité diminue ou si la température monte, la résistance baisse légèrement. Il est intéressant de constater que si la température

7 approche de 100 °C et si elle est seule en cause, les résistances cessent de diminuer (fig. 3).

L'influence fondamentale du facteur eau/ciment sur la résistance du béton s'explique par la proportion de pores capillaires se trouvant dans la pâte de ciment durcie. Pour $e/c = 0,5$, les capillaires représentent théoriquement $1/8$ du volume de la pâte; pour $e/c =$

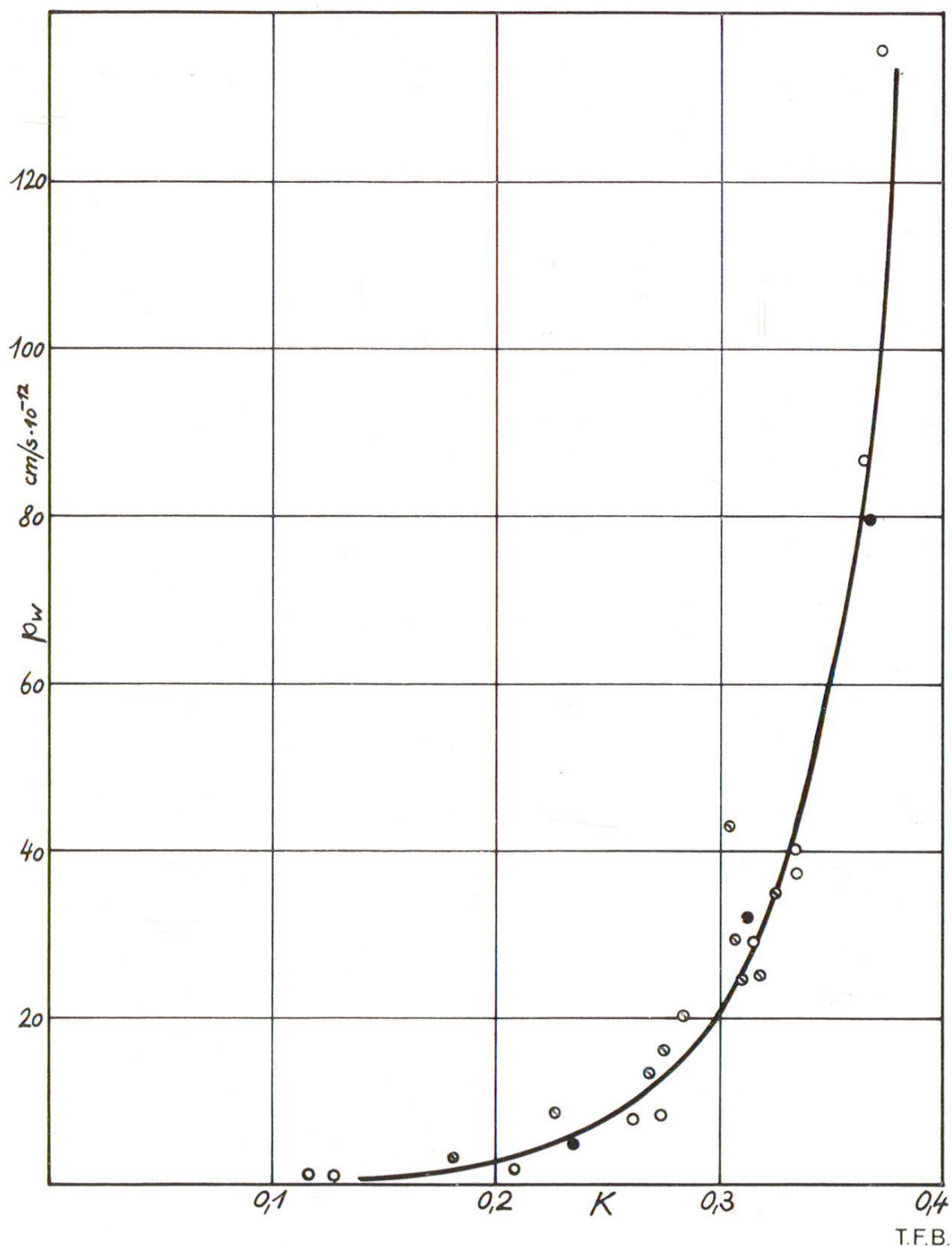


Fig. 5 Relation entre la perméabilité (P_w) et la porosité capillaire (K) de la pâte de ciment durcie. Les points blancs et noirs concernent des pâtes préparées avec des ciments de finesses différentes et essayés à des âges différents. Points blancs: surface spécifique du ciment 3400 cm^2/g , essais à 233 et 416 jours. Points noirs: surface spécifique du ciment: 7800 cm^2/g , essais à 325 jours (selon T. C. Powers).

8 0,7, cette proportion passe déjà à $\frac{1}{3}$. Cette modification de structure doit nécessairement se répercuter sur la résistance comme on le constate effectivement (fig. 4).

La **compacité** du béton est en relation avec la quantité de pores. Les pores du gel étant 100 à 1000 fois plus petite que les pores capillaires, ils offrent une résistance beaucoup plus grande à la pénétration d'un fluide. Ainsi la compacité dépend surtout de la quantité de pores capillaires et par conséquent, comme on l'a vu plus haut, du facteur eau/ciment. La figure 5 montre l'étroite relation qui existe entre la perméabilité de la pâte durcie et sa porosité capillaire. On voit nettement comment cette perméabilité s'accroît rapidement dès que les pores commencent à communiquer entre eux ($e/c = 0,7$ proportion de pore = $\frac{1}{3}$).

L'imperméabilité du béton à l'égard des gaz dépend de la proportion d'eau fixée dans les pores du gel. C'est pourquoi elle est en relation avec la teneur en humidité et la température (dans le domaine des températures normales).

La connaissance de la structure de la pâte de ciment durcie conduit aussi à des considérations très intéressantes sur le gonflement, le retrait, la dilatation thermique et le fluage du béton. Ceci fera l'objet d'une étude ultérieure dans notre bulletin. La résistance à l'égard du gel a déjà été traitée ici (BC 2/61). Tr.

Notice bibliographique

T. C. Powers und Mitarbeiter, Permeability of Portlandcement-Paste. J. Am. Concr. Inst. **Proc. 51**, 285 (Nov. 1954).

T. C. Powers, Structure and physical Properties of hardened Portlandcement-Paste. J. Am. Ceramic Soc. **41**, 1 (1958).

T. C. Powers und Mitarbeiter, The Flow of Water in hardened Portlandcement-Paste. Portland Cement Assoc. Res. Dep. Bull. No. 106 (July 1959).

G. Wischers, Diss. TH Aachen 1961, Schriftenreihe der (deutschen) Zementindustrie Heft Nr. 28 (1961).

T. C. Powers, Einige physikalische Gesichtspunkte der Hydratation von Portlandzement. Zement-Kalk-Gips **14**, 81 (März 1961).

L. E. Copeland, Edith G. Schulz, Electron-optical investigations of the hydration products of calciumsilicates and Portlandcement. J. of the Portlandcement Assoc. **4** (Jan. 1962).