

LUND UNIVERSITY

Degre critique de saturation. Un outil pour l'estimation de la resistance au gel des materiaux de construction

Fagerlund, Göran

Published in: Matériaux et Constructions

1971

Link to publication

Citation for published version (APA): Fagerlund, G. (1971). Degre critique de saturation. Un outil pour l'estimation de la resistance au gel des materiaux de construction. Matériaux et Constructions, 23(4), 271-285.

Total number of authors: 1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

- Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the
- legal requirements associated with these rights.

· Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: https://creativecommons.org/licenses/

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117 221 00 Lund +46 46-222 00 00 Extrait de Matériaux et Constructions nº 23, volume 4 - Septembre-Octobre 1971

Degré critique de saturation Un outil pour l'estimation de la résistance au gel des matériaux de construction

G. FAGERLUND (1)

On a prouvé expérimentalement et théoriquement l'existence de degrés critiques de saturation en relation avec le gel des matériaux de construction poreux et cassants. Le degré critique de saturation est une constante du matériau qui a une valeur bien définie pour un type et une qualité donnés de matériau.

On a démontré qu'il se produisait des détériorations après un gel si le degré de saturation actuel excède la valeur du degré de saturation critique.

On peut choisir un matériau en fonction de sa résistance au gel en comparant, pour différents matériaux, le degré critique de saturation et les degrés de saturation effectivement atteints dans une situation donnée.

L'utilisation du « degré critique de saturation » permet de faire disparaître le manque de corrélation existant dans certains cas entre les résultats obtenus par les expériences de gel et les résultats obtenus lors de l'utilisation du matériau.

NOTATIONS

- Perméabilité (m/s). B
- DCR
- Épaisseur critique (définition p. 00) (m). Module d'élasticité dynamique après n cycles E, de gel et dégel (N2/m).
- Influence d' « un gel ». Fraction d'eau non congelée lorsque S = 1.0. F K
- cf. équ. (5) (m³/m³).
- Épaisseur de paroi d'un récipient, cf. équ. L (17) (m).
- M Poids moléculaire de l'eau (kg /Mole).
- Nombre de pores remplis d'air (1/m3). N

(1) The Lund Institute of Technology, Division of Building Materials.

- « Facteur d'espacement Philleo » critique (m). PCR
- Charge effective (N). QACT
- QBR Charge de rupture (N).
- QDRY
- Poids de matériau sec (à + 105 °C) (kg). Poids d'eau évaporable (kg). Qwe
- R Constante des gaz parfaits (Nm /Mole.ºC).
- Humidité relative (%). R.H.
- S Degré de saturation.
- SACT Degré actuel de saturation.
- SCR Degré critique de saturation.
- Se Degré de saturation au gel selon l'équation (6).
- Degré de saturation au gel selon l'équation (2). Sr
- SWERT Cf. équ. (13).
- Température de congélation de l'eau ordi-T, naire (ºK).
- Т Température de congélation de l'eau capillaire (ºK).
- Teneur en air (m3/m3 de matériau). a
 - (Note : a ne doit pas être confondu avec " la teneur en air du béton frais ou durci ".)
- dwf Vitesse de formation de la glace (m3/S.m3 de dt matériau).
- Fréquence transversale fondamentale après f_n n cycles de gel-dégel (hz).
- k_1 Abaissement maximal admissible du module d'élasticité dynamique (fraction).
- Allongement permanent maximal admissibel k_2 de l'éprouvette (m).

- Porosité ouverte (m3/m3 de matériau). p
- Rayon d'un capillaire (m).
- Coefficient de sécurité à la rupture.

- t₀ Temps d'application des températures de congélation (s).
- u Pourcentage d'humidité, cf. équ. (7) (% rapporté au poids).
- v_i Dans un matériau polyphase, fraction volumique d'une phase i.
- w. Eau évaporable (m³/m³ de matériau).
- w_e^r Eau évaporable après plusieurs jours de montée d'eau (m³/m³ de matériau).
- W_e^t Teneur en eau totale après par exemple un séjour dans le vide (m³/m³ de matériau).
- w_f Eau congelable à une certaine température $(m^3/m^3 de matériau).$
- W_{nf} Éau non congelable à une certaine température (m³/m³ de matériau).
- α Surface spécifique des pores remplis d'air (m²/m³).
 - Densité apparente (kg/m³).
- Δl_n Allongement permanent après n cycles de gel-dégel (m).
- ΔH Chaleur de fusion de la glace (Nm/Mole). ΔT T₀ — T.
- EBR Déformation à la rupture.
- θ_{min} Température minimale dans l'éprouvette (°C).
 k Structure des pores, en particulier répartition du diamètre des pores.
- μ Coefficient de Poisson.
- p Densité de l'eau (kg/m³).
- σ Tension superficielle (N/m).
- σ_{BR} Contrainte de rupture (N/m²).

I. DÉFINITION DE LA RÉSISTANCE AU GEL

Il est raisonnable de définir la résistance au gel d'un certain matériau de la manière suivante :

La résistance au gel d'un certain matériau est son aptitude à résister, sans qu'il y ait de détérioration complète ou même partielle, aux variations climatiques qui se produisent dans les conditions précises d'utilisation de ce matériau.

Cette définition est intéressante en ce sens qu'elle conduit à penser qu'un même matériau peut être à la fois résistant au gel et non résistant au gel. La tenue au gel n'est pas uniquement une fonction dont les variables dépendent des propriétés du matériau mais aussi des conditions climatiques et du mode d'utilisation du matériau.

La résistance au gel est une propriété dépendant du milieu.

Quand on spécifie dans la brochure fournie par le fabricant ou bien encore dans un rapport scientifique qu'un matériau est « résistant au gel », ce qu'on entend par là ordinairement est tout-à-fait différent de la définition ci-dessus. Cette appréciation est basée sur l'analyse du comportement du matériau pendant une certaine période de gel subie au laboratoire et valable exclusivement pour cette méthode d'expérimentation.

Un changement de méthode d'étude du gel peut totalement changer l'appréciation concernant la tenue au gel et cela pour un même matériau.

Ceci est mis en évidence lorsqu'on expérimente la résistance au gel du béton en utilisant quatre modes opératoires différents suivant le procédé A.S.T.M.[1].

Comme autre exemple, nous pouvons mentionner l'expérience suivante : la résistance au gel d'un béton a été considérablement améliorée, lorsque le matériau a pu être séché avant le premier gel [2]. Ainsi les appréciations « Résistant au gel » « ne résistant pas au gel » au sujet d'un certain matériau, basées sur son comportement durant une seule expérience de gel sont-elles trop catégoriques. Elles ne sont valables que pour cette seule expérience de gel, et ne s'appliquent pas nécessairement à ce matériau dans des conditions climatiques différentes.

L'exemple mentionné ci-dessus montre que lorsqu'on ne tient pas compte du milieu ambiant dans lequel le matériau sera utilisé, c'est-à-dire lorsqu'on utilise les méthodes habituelles de détermination de la résistance au gel, les résultats ne correspondent pas à la réalité.

Si l'on désire apprécier la tenue au gel d'un matériau en n'ayant recours qu'à des expériences sur le gel et si de plus, on cherche un critère pour choisir entre différents matériaux, on devra, d'une part, appliquer la même méthode de gel pour différents matériaux, et d'autre part, les méthodes de gel devront être adaptées à toutes les sortes d'environnement possibles.

Une telle adaptation est malheureusement impossible dans la pratique car elle donnerait naissance à une multitude de méthodes de gel différentes qui toutes devraient à leur tour se traduire en « essais de performance » complexes.

En conséquence, il est évident qu'il y a une totale divergence sur l'interprétation de la notion de « résistance au gel » entre un jugement basé, d'une part, sur la tenue d'un matériau aux expériences de gel, et un jugement basé, d'autre part, sur la tenue du même matériau utilisé dans les conditions réelles d'emploi.

En introduisant le concept du « degré critique de saturation », on donne un moyen d'éliminer cette divergence.

II. LE CONCEPT « DEGRÉ CRITIQUE DE SATU-RATION »

II-1. Calcul en fonction de la résistance au gel

La tenue au gel d'un matériau *utilisé d'une certaine* façon est fonction de trois variables principales :

1) Propriétés du matériau : (Résistance, déformabilité, conditions de porosité).

2) Conditions climatiques : (Nombre de cycles de gel, température la plus basse, vitesse d'abaissement de la température, précipitations, degré d'humidité relative dans l'air,⁴ etc.).

3) Mode d'utilisation du matériau : (Mode et degré d'exposition à l'humidité du sol, précipitation, eau libre en général, grādients de pression de vapeur et de température à travers le matériau, etc.).

La séparation des variables peut constituer une façon radicale de traiter dans son ensemble cette question complexe et d'obtenir une possibilité de prévision correcte de la résistance au gel de différents matériaux dans un milieu donné. Il est évident que la résistance au gel est définie par les *propriétés des matériaux* et par les *conditions de milieu*.

Par conséquent s'il était possible d'exprimer quantitativement les propriétés des matériaux comme les conditions de milieu, on aurait ainsi la possibilité de *calculer* une partie d'une construction en tenant compte de la résistance au gel de même qu'on

calcule les éléments porteurs d'une construction en fonction des charges.

La « composante matériau » de la résistance au gel serait déterminée par une méthode d'essai simple qui serait la même pour tous les types et qualités de matériau tandis que la « composante milieu » serait déterminée par des méthodes complètement différentes (par exemple par le calcul en ayant recours à la cinétique de l'humidité ou bien par des expériences spécifiques).

Une telle expression quantitative se définit comme le *degré de saturation au gel du matériau*. Le degré de saturation est défini ci-dessous par les équations (2), (6) ou (7).

La « composante matériau » de la résistance au gel est le degré critique de saturation, S_{CR} , c'est le plus haut degré de saturation qui puisse être atteint sur une éprouvette au cours du gel sans qu'il y ait détérioration. La « composante milieu » est le degré actuel de saturation, S_{ACT} , aux différents gels auxquels un matériau est soumis durant sa « vie ».

Le degré critique de saturation est *une constante du matériau*, par contre, le degré actuel de saturation varie dans le temps et avec le milieu.

Les deux degrés de saturation sont étroitement liés l'un à l'autre. La connaissance de la valeur de S_{CR} n'a donc pas de sens si les valeurs de S_{ACT} dans les conditions réelles ne sont pas connues.

Le tableau ci-dessous donne la correspondance entre les valeurs intervenant dans les calculs de résistance au froid et de résistance.

Résistance mécanique	Résistance au gel	
Charge effective QACT	SACT	
Charge de rupture QBR	SCR	
Coefficient de sécurité s ₁	52	
Critère pour le calcul : s_1 . QACT $\leq QBR$	s_2 .Sact \leq Scr	

En additionnant une constante s à S_{ACT} , indépendamment de la valeur de S_{CR} , on obtient une meilleure expression du critère pour le calcul de la résistance au gel. Le critère s'écrit alors de la façon suivante :

$$S_{ACT} + s \leq S_{CR}$$
 (1)

La figure 1 donne un exemple d'un calcul de résistance au gel.

On veut faire un choix entre deux matériaux A et B qui doivent être utilisés dans des conditions bien déterminées (Milieu I). Les degrés critiques de saturation des deux matériaux sont :

 $S_{CR}^{A} et S_{CR}^{B}$ avec $S_{CR}^{A} < S_{CR}^{B}$.

Le calcul ou l'expérience montrent que les degrés maximaux de saturation pouvant être atteints dans le milieu I sont :

SACT^A et SACT^B.

On peut remarquer sur la figure, les intersections des droites S_{CR} et S_{ACT} dans les deux cas. Les deux intersections se produisent dans la moitié basse du quadrant, c'est-à-dire dans la zone de résistance



au gel. Les deux matériaux peuvent être utilisés pour le milieu I sans aucun risque de détérioration par le gel.

Il apparaît sur le graphique que le matériau A présente la plus grande résistance contre les risques de détérioration par le gel et cela bien qu'il ait le degré critique de saturation le plus bas.

Si, par contre, on utilise les deux matériaux dans le milieu II qui est plus humide, le degré maximum de saturation est plus élevé que pour le milieu I. La figure 1 montre que le matériau B n'est plus résistant malgré son degré critique de saturation élevé tandis que le matériau À répond encore aux exigences quoiqu'il y ait déjà un certain risque pour l'utilisation.

On peut donc déduire de la figure 1 essentiellement deux choses :

1) On obtient la corrélation entre les études en laboratoire de résistance au gel et les conditions réelles en divisant en deux parties les essais de résistance au gel. *La première partie ne s'occupe que du matériau* : détermination de S_{CR}, *la deuxième partie ne s'occupe que du milieu* : détermination de S_{ACT}.

Il est évident que le milieu ne joue pas un rôle entièrement passif dans la détermination de S_{CR} . Il joue sur les cycles de température utilisés. De la même façon, les propriétés du matériau influent sur la détermination de S_{ACT} , les caractéristiques des pores en particulier.

2) Le choix du matériau en fonction de la résistance au gel est rendu possible par la comparaison entre le degré de saturation critique et le degré de saturation actuel des matériaux parmi lesquels le choix est fait.

On peut exprimer la résistance au gel de différents matériaux utilisés dans les mêmes conditions, de la manière suivante :

Degré de résistance au gel = S_{CR} - S_{ACT}

La figure l élimine aussi les risques de mauvaise interprétation. Un faible degré de saturation critique d'un matériau donné ne permet pas de conclure que sa résistance au gel est mauvaise. Le degré de saturation atteint en pratique peut être encore plus bas.

La figure 2 représente une section transversale d'un mur extérieur fait d'un matériau unique. Au niveau du milieu I, il n'y a aucun risque de détérioration par le gel, par contre des détériorations apparaissent au niveau du milieu II si S_{ACT} est plus élevé



· Fig. 2. - Section d'un mur homogène.

que S_{CR} à une profondeur assez grande à partir de la surface. Cette profondeur a pour valeur la moitié de l'épaisseur critique D_{CR} (D_{CR} est défini comme étant la mesure de la couche de matériau la plus épaisse qui n'est pas détériorée par le gel même si elle est complètement saturée d'eau). La valeur D_{CR} varie avec les matériaux. Warris [3] fait état de valeurs variant de 2 à 7 mm pour le béton ayant un E/C de 0,45. Dans nos laboratoires, nous avons trouvé 12 mm pour une brique d'argile ordinaire. Néanmoins, la valeur exacte de D_{CR} est incertaine. Elle dépend avant tout autre chose de la perméabilité *aux températures de gel.*

La faible valeur de D_{CR} entraîne un risque de détérioration de la surface plus grand qu'avec un D_{CR} important lors d'un gel se produisant par exemple après une pluie battante. D_{CR} intervient aussi dans le calcul théorique de S_{CR} que nous analyserons plus loin.

Une construction faite de plusieurs couches peut être calculée de la même manière qu'un mur homogène (fig. 3). Les deux matériaux ont un coefficient S_{CR} différent car leur structure poreuse est différente ainsi que d'autres caractéristiques. Dans la zone de transition existant entre les deux matériaux, le passage du premier S_{CR} au second se fait d'une façon certaine. La largeur de la zone de transition doit être une fonction des épaisseurs critiques des deux matériaux.



۶



En général, le degré de saturation actuel doit faire un saut à la ligne de séparation car les deux matériaux ont des courbes de capillarité différentes. Ainsi, pour une pression capillaire identique entre les deux matériaux, les degrés actuels de saturation sont totalement différents, comme conséquence directe, des parties du revêtement extérieur peuvent se dégrader au cours du gel et cela malgré la condition respectée de $S_{ACT} < S_{CR}$ pour toute la construction excepté dans la zone de transition. Ce genre de dégradation est très courant.

Des matériaux comportant un revêtement « Imperméable » comme le vernis sur des tuiles de céramique par exemple, ou bien encore des couches épaisses de peinture appliquées sur le béton ou sur d'autres matériaux poreux, sont particulièrement exposés à l'attaque du gel. La figure 4 donne une interprétation du phénomène à partir du concept de « degré critique de saturation ». Près de la surface imperméable, S_{CR} doit être diminué, car de l'eau qui est expulsée à la formation de glace dans les pores est en partie empêchée d'aller vers la surface. La diminution de la valeur de S_{CR} dépend de la perméabilité de la surface et de l'adhérence entre le revêtement et le matériau. La profondeur de la zone de transition doit dépendre de la valeur du coefficient D_{CR}.



Fig. 4. — Section d'un mur avec une surface extérieure recouverte d'une couche protectrice.

En même temps, comme la valeur de S_{CR} diminue près de la surface, il est à peu près sûr que la valeur de S_{ACT} croît dans la même zone. La vapeur d'eau qui diffuse à travers le mur, due aux différences de pression entre la vapeur extérieure et la vapeur intérieure, peut se condenser facilement sur le revêtement froid et dense. Le séchage est empêché par la surface dense.

La diminution de S_{CR} ou bien l'augmentation de S_{ACT} contribue à rendre particulièrement sensibles au gel les revêtements de surface imperméables.

Afin que le concept de « degré critique de saturation » puisse être utilisé dans le sens indiqué ci-dessus, les deux conditions suivantes doivent être remplies.

1) Des degrés de saturation critiques existent pour toutes les sortes et toutes les qualités de matériaux.

On doit pouvoir déterminer leurs valeurs à partir d'une méthode expérimentale unique pour tous les matériaux. Ces valeurs ne doivent pas être affectées de façon appréciable par quelque expérience de gel que ce soit reproduisant toutes les conditions climatiques de la région où le matériau sera employé.

2) On doit pouvoir déterminer les degrés de saturation actuels pour tous types et pour toutes qualités de matériaux lorsque ces derniers sont employés dans des conditions différentes.

On traitera plus loin la possibilité de satisfaire à ces conditions. Néanmoins, nous présentons différentes définitions du degré de saturation.

II-2. Définition du « degré de saturation »

Le degré de saturation « S » peut être défini de différentes façons. La loi traduisant correctement la définition est :

$$S_f = \frac{W_f}{W_f + a} \qquad 0 \leqslant S_f \leqslant 1 \tag{2}$$

Une fraction seulement de l'eau contenue dans une éprouvette est susceptible de geler aux températures ordinaires. Un cristal de glace est stable à une certaine température qui est fonction du rayon du cristal selon l'équation suivante :

$$\Delta T = \frac{2 \cdot \sigma \cdot M \cdot T_0}{r \cdot \rho \cdot \Delta H}$$
(3)

Pour un cristal dans un matériau poreux, il existe une incertitude relative à l'introduction de σ et ρ dans l'équation (voir par exemple [4]). L'isotherme de désorption est une fonction de la répartition du diamètre des pores. Elle peut donc servir à calculer la quantité d'eau qui ne gèle pas. En utilisant la formule de Thomson sur la condensation capillaire et l'équation (3) on peut établir la relation suivante entre l'abaissement du point de congélation dans un tube capillaire et l'humidité relative lorsque l'eau cesse de s'évaporer du tube capillaire.

Cela entraîne que $\sigma_{eau air}$ et ρ_{eau} sont inclus dans l'équation (3)

$$\Delta T \simeq -\ln \left[\frac{R.H.}{100}\right] \cdot \frac{R.T_0.T}{\Delta H}$$
 (4)

En considérant les équations (3) et (4), on peut établir que la quantité d'eau non susceptible de geler à l'intérieur d'un certain matériau à une température donnée est constante. Cette constante peut être considérée comme étant une fonction de la porosité totale (ouverte) :

$$K = \frac{W_{nf}}{p} \tag{5}$$

Les équations (3) et (4) sont à retenir dans le cas du gel dans des canaux capillaires individuels. Dans un matériau réel, la glace et l'eau coexistent. L'eau qui n'est pas susceptible de geler in-situ peut s'écouler dans des canaux capillaires plus gros contenant des morceaux de glace; là elle se transforme en glace, ainsi la quantité d'eau susceptible de se transformer en glace dépend en partie du temps d'exposition au gel du matériau.

D'autre part, Helmuth [5] a montré qu'il y a une hystérésis entre la congélation de l'eau et la fusion de la glace dans le même pore. Le taux d'hystérésis est une fonction de la géométrie du système de pore.

Par conséquent, K varie avec la température et la durée du gel.

La fraction de pores remplis d'eau est une définition des conditions d'humidité plus commode que ne l'est celle définie par l'équation (2).

$$S_e = \frac{w_e}{p} \qquad 0 \leqslant S_e \leqslant 1 \tag{6}$$

Pour des raisons de commodité, il sera plus simple d'abandonner le concept de « degré de saturation » au profit du « pourcentage d'humidité », u:

$$u = \frac{Q_{we}}{Q_{dry}} \times 100$$
 (% rapporté au poids) (7)

Les trois expressions exprimant le taux d'humidité dépendent l'une de l'autre ainsi que l'indiquent les équations (8) et (9).

$$S_{f} = \frac{S_{e} - K}{1 - K}$$

$$S_{f} = \frac{\gamma \cdot u}{10^{5} \cdot p(1 - K)} - \frac{\cdot K}{1 - K}$$
(8)
(9)

La définition utilisée importe peu lorsqu'il s'agi de l'utilisation pratique. Mais si l'on veut expliquer l'action du gel d'une manière plus scientifique, on doit útiliser la définition relative à l'équation (2). On utilise cette définition si aucune autre précision n'est donnée.

III. EXISTENCE DE DEGRÉS CRITIQUES DE SATURATION

Des expériences que nous ne rapporterons pas ici ont montré que l'influence *d'un* gel sur des matériaux poreux et fragiles est une fonction des variables suivantes :

$$\mathbf{F} = f\left(\mathbf{S}, \ \boldsymbol{\theta}_{\min}; \frac{dw_f}{dt}; \ t_0 - ; \ \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{BR}}; \ \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{BR}}; \mathbf{B}; \mathbf{K}\right) \ (10)$$

A la fonction (10) on peut additionner des effets de nature osmotique dus aux sels dissous dans les pores accessibles à l'eau ou encore à l'utilisation d'agents de dégel.

Les contraintes externes survenant lorsqu'on charge un bâtiment, affectent le coefficient F.

L'équation (10) peut s'exprimer de la façon suivante :

F = f (S; conditions de température; propriétés du matériau) (10')

Comme il a été écrit ci-dessus, même S est en un certain sens, une fonction des conditions de température (voir les équations (2) et (5)). Cependant si la méthode de gel est adaptée à des conditions climatiques normales, S peut être considéré comme une variable indépendante.

Si une série d'éprouvettes est prélevée dans le même matériau de base, les propriétés du matériau peuvent être considérées comme constantes pour toutes les éprouvettes.

Donc :

Donc :

ou :

$$\mathbf{F} = g\left(\mathbf{S}; \, \theta_{\min}; \, \frac{dw_f}{dt}; \, t_0 - \right) \tag{11}$$

F = g (S; conditions de température) (11')

Il semble raisonnable de dire que S est la variable principale dans le cas de conditions pratiques, dans l'équation (11).

La vitesse de congélation, la durée et la valeur de la température la plus basse dépendent, pour un matériau donné, de la température extérieure et des conditions de convection de l'air extérieur (et de la taille de l'éprouvette dans une certaine mesure). Ces conditions climatiques peuvent être en première approximation considérées comme constantes pour le même matériau utilisé dans différentes conditions.

 $\mathbf{F} = g'(\mathbf{S}) \tag{12}$

En conséquence, pour un matériau donné et dans des conditions climatiques idéales, l'influence du gel est seulement une fonction de S.

La détérioration d'un matériau par le gel est une conséquence d'un effort au-delà de la résistance à la traction en certains points ou sur de larges zones du matériau.

Ainsi l'effet du gel, F, peut être assimilé à une contrainte de traction σ . Tant que F reste inférieur à la résistance à la traction en tout point du matériau, il n'y a pas de détérioration. On peut introduire un « effet critique du gel » F_{CR}.

Lorsqu'on dépasse la limite F_{CR} en un point quelconque du matériau, il se produit une cassure en ce point.

D'après l'équation (12) on est amené à penser qu'il doit exister un degré critique de saturation, S_{CR} . Quand on dépasse la valeur de S_{CR} en un point du matériau, une cassure apparaît en ce point.

. On notera que l'argument ci-dessus n'est valable que pour un matériau unique, bien déterminé mais choisi d'une façon arbitraire, par exemple un béton fait d'un type d'agrégat et de ciment donné, avec un rapport agrégat ciment en volume et un E/Cdonnés, un degré d'hydratation donné, une teneur en air donnée et une distribution donnée des vides d'air.

La valeur exacte de S_{CR} est déterminée par la fonction F = g'(S) qui est définie par les seules caractéristiques du matériau : ductilité, perméabilité, porosité, distribution du diamètre des pores et morphologie des pores. Les différentes caractéristiques des pores affectent la fonction d'une façon qui dépend du mécanisme de gel dominant dans le matériau : pression hydraulique, pression osmotique, ou bien encore ségrégation des lentilles de glace[6]. Le mécanisme de gel dépend avant tout de la distribution du diamètre des pores et de leur morphologie.

Il est évident que moins il y a d'écarts pour les différentes propriétés déterminant la valeur de S_{CR} , plus S_{CR} sera défini rigoureusement.

La figure 5 fait apparaître deux relations hypothétiques entre l'effet du gel F et le degré de saturation S. Il est évident que l'on atteint la valeur S_{CR} lorsque F prend une valeur équivalente à la résistance à la traction σ_{RR} . Il est clair aussi qu'on peut obtenir des S_{CR} différents pour la même résistance à la traction, selon la forme que prend la fonction F = g'(S), ce qui dépend en fin de compte des différentes caractéristiques poreuses ainsi que du mécanisme de gel.



Fig. 5. — Courbes hypothétiques sur l'influence du gel, F, comme fonction du degré de saturation, S.

Toute tentative visant à trouver un degré de saturation unique qui serait une constante des matériaux, d'un groupe de matériaux, par exemple le groupe des matériaux en céramique ou en béton, sera infructueuse.

Une telle tentative serait analogue à celle visant à trouver une résistance à la compression commune et unique pour toutes les qualités existant dans un groupe de matériaux.

Pourtant, en diverses occasions, on a avancé certaines théories sur des degrés critiques de saturation généralisés à des groupes entiers de matériaux, par exemple Breyer [7] pour les briques d'argile et les tuiles.

Cependant sa théorie « S-wert » a été rejetée par de nombreux auteurs, par Schneider [8] par exemple à partir des expériences sur le gel.

S_{CR} est une constante des matériaux. Elle doit être déterminée et utilisée comme telle.

Vuorinen [9] a déterminé la valeur de S_{CR} pour différents mélanges de béton, Il a trouvé comme valeur inférieure $\simeq 0,70$. Cependant comme le béton a été traité comme un simple matériau, l'écart est important.

Warris [10] pensait que le degré critique de saturation devait varier suivant les différents mélanges de béton. D'après la théorie des pressions hydrauliques de Powers [11] relative au gel de la pâte de ciment, il réussit à calculer les valeurs de S_{CR} pour six bétons différents. La validité de ces calculs théoriques est confirmée par les expériences sur le gel. La méthode de calcul utilisée est la même que celle exposée ci-après.

Nous avons poursuivi, dans notre laboratoire, la détermination des degrés critiques de saturation de différents matériaux. A l'heure actuelle, nous avons pu déterminer S_{CR} avec une bonne précision pour divers matériaux : Béton cellulaire autoclavé, amianteciment, Internit (pâte de ciment renforcée avec des fibres de cellulose), brique silicocalcaire, mortiers de ciments, mortier ciment-chaux, brique d'argile bien cuite et brique d'argile peu cuite.

Toutes ces déterminations ont été faites d'après les mêmes méthodes de gel.

Les figures 6 et 7 donnent des exemples de déterminations de S_{CR} pour deux types de briques d'argile. Le premier type (fig. 6) a été prélevé dans une couche inférieure pour une cuisson donnée. Cet échantillon était peu cuit. Le deuxième type (fig. 7) a été prélevé dans la couche supérieure pour la même cuisson. Cet échantillon était parfaitement bien cuit. Chaque point des figures représente un échantillon. On rend compte plus loin de la méthode de gel.

Le concept de degré critique de saturation est connu depuis longtemps.

Hirschwald [12] peut être considéré comme le premier défenseur de ce concept. Il a utilisé le concept de « S-wert » comme Breyer [7] :

S-wert =
$$\frac{w'_e}{w'_e} \simeq \frac{w'_e}{p}$$
 (13)

On pensait qu'un matériau qui avait un S-wert inférieur à une certaine valeur, par exemple 0,80, serait résistant au gel. Un S-wert compris entre 0,80 et 0,90 signifierait un risque de détérioration par le gel. Un S-wert supérieur à 0,90 est toujours synonyme de mauvaise résistance au gel.



Fig. 6. — S_{CR} et S_{ACT} d'une brique d'argile mal cuite (brique prélevée en bas du four).



Fig. 7. - Valeurs de SCR et SACT pour une brique bien cuite.

Cependant on a rejeté toutes ces théories en raison des incohérences suivantes des premières théories et expériences de gel.

l) Les théories ont été établies d'après des valeurs de S_{CR} très générales pour des catégories entières de matériaux au lieu d'utiliser les valeurs propres à chaque matériau. Par exemple : le « S-wert » peut seulement fournir le terme S_{ACT} à l'expression qui traduit la résistance au gel, équ. (1).

2) Les expériences pratiques de gel qui ont été effectuées afin de déterminer les valeurs de S ou bien pour rejeter l'existence de S_{CR} l'ont été de façon illogique. Gel et dégel, ou dans certains cas le dégel seul, ont été faits dans l'eau. De ce fait, le degré de saturation du spécimen s'est accru d'une façon incontrôlable.

IV. DÉTERMINATION DU DEGRÉ ACTUEL DE SATURATION

La connaissance de S_{CR} est sans signification s'il n'est pas possible de déterminer le degré actuel de saturation dans différentes conditions.

Avec les progrès de la cinétique de l'humidité,

des connaissances des propriétés d'un matériau et de la connaissance exacte du climat dans lequel se trouvera le matériau, on pourra calculer à l'avance les degrés de saturation actuels.

On ne peut malheureusement pas effectuer ces calculs à l'heure actuelle.

Au lieu des méthodes plus complexes de détermination de S_{ACT} mentionnées ci-dessus, on peut utiliser des méthodes de laboratoires simples.

L'isotherme d'absorption donne par exemple le degré de saturation pour différentes humidités relatives du milieu environnant. L'isotherme d'absorption peut être, soit déterminée de façon empirique, soit encore par le calcul, Bergström et Ahlgren [13].

En présence d'eau libre, eau de pluie battante par exemple, en contact avec le matériau, la quantité d'humidité croît plus vite que l'humidité hygroscopique.

Pour une estimation de S_{ACT} dans ces cas d'humidité, un simple test de succion peut suffire. Les résultats obtenus à l'aide des mesures faites sur les deux types de brique en argile sont reportés sur les figures 6 et 7 avec les S_{CR} des matériaux. Les S_{ACT} sont des valeurs moyennes pour tout l'échantillon qui, pour des temps de succion courts, donne une valeur de S trop faible pour la couche qui est proche de la surface de l'eau.

Comme les couches de surface sont spécialement sensibles à l'attaque du gel, il est important de pouvoir déterminer avec précision leurs degrés de saturation.

Il devrait être relativement facile de mettre au point des méthodes d'estimation des degrés de saturation à différentes profondeurs à partir de la surface, en relation avec une montée d'eau. Voir [14].

Il est bien plus difficile de déterminer par de simples expériences la valeur de S_{ACT} à la condensation de la vapeur d'eau. Dans ce cas, les variations de température et d'humidité relative jouent un rôle important. La condensation et le séchage ne dépendent pas seulement des propriétés du matériau sensible au gel, mais aussi de la manière dont le bâtiment a été construit.

Il existe cependant certaines possibilités de déterminer les degrés de saturation atteints en pratique. On peut alors évaluer la résistance au gel relative de différents matériaux. (Voir les fig. 6 et 7 qui donnent une valeur sûre pour la tenue au gel des deux catégories de briques.) Les coefficients de sécurité calculés d'après l'équation (1) pour différents temps d'absorption d'eau ont été reportés dans le tableau I.

La brique bien cuite possède la plus grande résistance au gel, ce qui est en accord avec les éléments connus [15].

Conclusion. — Les conditions (voir II.1) qui doiven^t être remplies, si l'on veut faire un usage pratique du concept de « degré critique de saturation », ont été examinées ci-dessus.

On a démontré que les deux conditions nécessaires peuvent être remplies. Cependant, pour une utilisation plus systématique, on devra faire usage de méthodes plus perfectionnées pour la détermination de S_{ACT} et de nombreuses études de S_{CR} visant à connaître de quelle manière S_{CR} est affecté par la vitesse de gel, le temps de gel, la taille de l'éprouvette, les surfaces imperméables, les charges extérieures, etc. devront être faites.

Catégorie de matériaux _	Valeur moyenne du coefficient de sécurité, s, après h heures de montée de l'eau				
	h = 1	h = 24	h = 144	<i>h</i> = 240	h = 312
Brique bien cuite Brique peu cuite	0,45 0,10	0,18 0,05	0,09 0,01	0,08 	0,08

TABLEAU I. - Degré de résistance au gel pour 2 sortes de briques en argile

V. DÉTÉRIORATION PAR LE GEL

Les degrés de saturation critiques étant bien définis, le problème de la résistance au gel vue du côté pratique est un problème statistique.

De toutes les combinaisons de températures et de conditions d'humidité possibles, il n'y en a qu'une seule qui entraîne la détérioration par le gel, c'est-àdire :

$$S_{ACT} > S_{CR}$$
 à une profondeur $\ge \frac{D_{CR}}{2}$ depuis la surface
Température à la même profondeur $<$ tempéra-
ture de congélation de l'échantillon.

La figure 8 représente les courbes hypothétiques de température et de S_{ACT} pour un certain matériau utilisé pour la construction des murs. Au deuxième mois, on constate qu'une combinaison dangereuse se produit, entraînant des dégradations par le gel.



Fig. 8. — Courbes hypothétiques des variations de degré de saturation et de la température sur un an.

Si d'une part on considère qu'il s'écoule fréquemment un laps de temps assez long entre la construction du bâtiment et la détérioration par le gel, et si d'autre part on considère que de nombreux dégâts se produisent pour certaines années, l'un et l'autre faits peuvent s'expliquer par la probabilité d'une combinaison dangereuse de conditions de température et d'humidité.

L'étendue des dégâts dans le cas d'une combinaison dangereuse dépend, d'une part, de la différence entre S_{ACT} et S_{CR}, d'autre part, de la fragilité du matériau. Dans le cas d'un matériau très fragile, brique d'argile par exemple, un gel unique avec S_{ACT} > S_{CR} peut entraîner la destruction de l'éprouvette (fig. 7). Pour d'autres matériaux, un certain nombre de gels avec S_{ACT} > S_{CR} sont nécessaires pour qu'il y ait détérioration de l'échantillon.

Des expériences faites dans nos laboratoires montrent clairement que le nombre de gels nécessaire pour qu'il y ait une détérioration sensible avec $S_{ACT} > S_{CR}$ est toujours faible. La figure 9 traduit ce résultat en montrant une détermination de S_{CR} pour un matériau tel que la brique silicocalcaire.

Certains auteurs ont émis l'hypothèse que la détérioration due au gel, était un phénomène de fatigue.

Les résultats mentionnés ci-dessus montrent clairement qu'il suffit de quelques gels pour produire des dommages importants si la teneur en eau du matériau est suffisamment élevée.





La fatigue peut éventuellement jouer un rôle au cours d'un nombre important de gels si le degré actuel de saturation est constamment inférieur au degré critique.

Au laboratoire, on constate que les premiers dégâts se produisent après un nombre relativement élevé de gels. On peut expliquer ce phénomène par le fait que les gels ou les dégels ou l'un et l'autre se font dans l'eau.

Ainsi la quantité d'eau contenue dans le matériau s'accroît sans cesse (voir les résultats de Schneider [8] portés sur la figure 10).

La détérioration par le gel se produit exactement lorsque $S_{ACT} > S_{CR}$ pour une profondeur mesurée depuis la surface $> D_{CR}/2$.

Cela explique aussi les différences constatées plus haut dans les 4 méthodes normalisées américaines de détermination de la résistance au gel du béton [1].



Fig. 10. — Accroissement du degré de saturation résultant du dégel dans l'eau.

La méthode où le gel agissait à l'air et le dégel dans l'eau dans un temps très court par rapport à la durée totale du cycle était moins rigoureuse, bien que les degrés de saturation des éprouvettes avant le premier gel fussent les mêmes.

VI. MÉTHODES PERMETTANT DE DÉTERMI-NER LE DEGRÉ CRITIQUE DE SATURA-TION

VI-1. D'une façon théorique

Lorsque l'eau gèle, son volume s'accroît de $\simeq 9$ %, ce qui entraîne que le degré critique de saturation en vase clos est (équ. (2)) :

$$S_{CR} = \frac{w_f}{w_f + 0.09 w_f} = 0.917$$
 (14)

La pression de l'air dans le récipient est négligée. Si le récipient est fragile, mais s'il a une grande résistance à la traction, il peut être résistant au gel en résistant à la formation de la glace, même s'il est plein d'eau. Quand la glace se forme, il se produit une pression car le vase résiste à la déformation. La pression abaisse le point de congélation. Les matériaux de construction ordinaires ne peuvent résister dans ces conditions qu'à quelques ⁰C.

Cependant,

$$S_{CR} \ge 0.917 \tag{15}$$

Si le récipient est ductile, on peut appliquer l'expression suivante :

$$S_{CR} = 0.917 + \frac{\varepsilon_{BR} 3 (1-2\mu)}{1.09 p(1-K)}$$
(16)

On admet que le matériau est isotrope et qu'aucune concentration de contraintes ne se produit. La déformation de la glace et la pression de l'air peuvent être négligées.

Tous les matériaux possèdent une certaine ductilité. On a utilisé l'équation (16) pour un béton ayant subi une conservation normale avec un E/C = 0.40et 35 % de pâte de ciment, S_{CR} $\simeq 0.93$.

Si les parois du récipient sont perméables l'eau peut être expulsée à travers les parois. Il y a apparition de forces d'origine hydraulique. Lorsque S croît, les forces croissent. Pour des forces trop grandes, il y a destruction du récipient, Powers [11]. S_{CR} est alors défini par l'expression suivante :

$$S_{CR} = 0.917 + f\left(\sigma_{BR}; B; \frac{dw_f}{dt}; L\right).$$
(17)

L'équation (16) est comprise dans l'équation (17). On notera que la perméabilité, B, décroît d'une façon très substantielle quand il y a formation de glace dans les pores et cela spécialement pour les matériaux contenant une fraction importante d'eau susceptible de geler.

Il est évident que l'expression suivante peut être employée pour un vase

$$0,917 \leq S_{CR} \leq 1,0$$
 (18)

Un matériau poreux ne gèle pas comme un simple récipient mais plutôt comme le ferait un grand nombre de « récipients » ayant certaines parois communes. Même si les équations (14)-(18) sont valables pour chaque « récipient » isolé, elles ne peuvent être généralisées à un matériau. Le S_{CR} du matériau dépend de la façon dont les « récipients » sont placés dans le matériau.

A la suite d'expériences empiriques, on trouve des valeurs très basses allant jusqu'à 0,34 pour le béton cellulaire autoclavé.

Si l'on se réfère à l'équation (17), il existe une épaisseur de paroi critique, L_{CR} , si la vitesse de congélation et le degré de saturation sont constants; ce résultat est une conséquence de la théorie de la pression hydraulique de Powers [11]. Powers et Helmuth [16] ainsi que d'autres auteurs tels que Everett [17] ont donné des mécanismes de gel en plus du phénomène de pression hydraulique. Powers et Helmuth [16] étudient la ségrégation des lentilles de glace microscopiques et la pression osmotique. Les deux mécanismes peuvent se produire dans un maieriau possédant une grande quantité d'eau non susceptible de geler et ils peuvent conduire à la rupture du matériau.

Les auteurs établissent théoriquement et empiriquement que, malgré le mécanisme du gel, les forces destructives décroissent avec les distances entre les pores remplis d'air.

Des résultats expérimentaux concernant le béton, récemment publiés par Ivey et Torrans [18] montrent clairement que la résistance au gel diminue rapidement pour une valeur critique de la distance entre les pores pleins d'air, bien que la quantité d'air contenue soit sensiblement la même dans tous les bétons.

Il semble donc raisonnable de supposer qu'il existe des *distances critiques* relativement à la résistance au gel. La distance critique est la plus grande distance admissible entre un point où l'eau gèle et le pore rempli d'air le plus proche, si le matériau doit résister au gel.

La valeur de la distance critique est différente pour des matériaux différents et pour des mécanismes de gel différents pour un même matériau.

On peut donc déduire de ce qui précède que l'existence d'un degré de saturation critique **n**'est qu'une conséquence de l'existence de la distance critique.

La valeur de S_{CR} pour une certaine distance critique ne dépend que de la géométrie du système des pores remplis d'air.

Warris [10] emploie l'expression suivante reliant l'épaisseur critique et la teneur en air :

$$a_{\rm CR} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \frac{D_{\rm CR}}{2}} \tag{19}$$

Cette relation a été établie d'après une étude faite par Danielsson et Wastesson [19]. Elle implique seulement que les pores remplis d'air soient sphériques mais la distribution suivant les dimensions peut être quelconque. Pour des pores de petit diamètre, on doit modifier l'équation (19) - voir [19].

La quantité d'eau maximale susceptible de geler à une température donnée et déterminée pour des expériences de dégel, suit probablement une loi du type suivant, cf. ég. (5) :

$$w_f = w_e - K.p \quad \text{pour} \quad w_e > K.p \quad (20a)$$

$$w_f = 0 \qquad \qquad \text{pour} \quad w_e \leqslant K.p \quad (20b)$$

Powers et Brownyard [20] ont vérifié les équations (20a) et (20b) pour la pâte de ciment. Pour les gels, la constante K peut être quelque peu supérieure à cause du phénomène de surfusion, Helmuth [5].

Des équations (19) et (20) on peut déduire l'expression suivante :

$$\begin{cases} S_{CR} = 1 - \frac{1}{\left(1 + \alpha \cdot \frac{D_{CR}}{2}\right) \cdot \mathcal{F}(1 - K)} \\ pour \quad w_e > K \cdot \mathcal{F} \quad (21a) \\ S_{CR} = 1,0 \qquad pour \quad w_e \leqslant K \cdot \mathcal{F} \quad (21b) \end{cases}$$

Dans une étude faite par Powers, ce dernier déduit des équations semblables aux équations (19). Cependant Powers considère que tous les pores d'air ont les mêmes dimensions.

Larson et al. [21] ont trouvé une relation entre la teneur en air et ce que l'on appelle le « facteur d'espacement Philleo », P.

Le facteur exprime une distance qui, avec une certaine probabilité, est supérieure ou égale à une distance comptée à partir d'un point arbitraire du matériau jusqu'au pore rempli d'air le plus proche.

Les expressions suivantes sont valables avec une probabilité de 90 % :

 $a = (1,087 - 1,89.P.N^{1/3})$ pour $a \ge 0,12$ (22a) $l = (0,474 - 0,694.P.N^{1/3})$ pour a < 0,12 (22b)

Ces expressions ont été utilisées pour la pâte de ciment. Elles impliquent que les pores d'air soient sphériques et qu'il existe une certaine distribution du diamètre des pores avec prédominance des petits pores.

On suppose que P a une valeur critique, PCR. A partir des équations (20) et (22) on déduit les expressions suivantes pour SCR :

$$\begin{cases} S_{CR} = 1 - \frac{1,087 - 1,89.P_{CR}.N^{1/3}}{p(1 - K)} \\ pour \begin{cases} a \ge 0,12 \\ w_e > K.p \end{cases} (23a) \\ S_{CR} = 1 - \frac{0,474 - 0,694.P_{CR}.N^{1/3}}{p(1 - K)} \\ pour \begin{cases} a < 0,12 \\ w_e > K.p \end{cases} (23b) \\ S_{CR} = 1,0 \text{ pour } w_e \leqslant K.p \end{cases} (23c) \end{cases}$$

L'équation (16) réduit l'intervalle d'utilisation des expressions (21) et (23). Ainsi pour un matériau dénué de ductilité on emploie l'expression suivante :

$$S_{CR} < 0.917$$
 pour $w_e > K.p$ (24)

Pour un matériau dont l'épaisseur est inférieure à l'épaisseur critique, DCR, pour des couches de surface inférieures à $\frac{D_{CR}}{2}$, on utilise :

5

$$S_{CR} = 1,0$$
 (25)

Les formules ci-dessus sont valables pour un matériau isotrope. Pour des matériaux anisotropes tels que l'amiante-ciment, on doit modifier les formules pour tenir compte du fait que DCR et PCR diffèrent suivant les directions.

Les équations (21) et (23) expriment pareillement ane :

a) SCR croît si le nombre de pores remplis d'air par unité de volume croît.

b) SCR croît si la distance critique augmente.

Les équations (21) et (23) ne dépendent pas du mécanisme de gel. Elles imposent la sphéricité des pores d'air et l'obligation de l'existence d'une distance critique.

(L'équation (23) implique d'autre part une certaine répartition du diamètre des pores remplis d'air.)



On a représenté graphiquement l'équation (21) sur la figure 11 (en traits continus). On peut représenter de la même manière l'équation (23) avec P_{CR} .N^{1/3} comme variable indépendante. On peut calculer ou déterminer expérimentalement tous les facteurs des équations, excepté la surface spécifique, α , des pores remplis d'air et le nombre de ces pores, N. Il est essentiel d'utiliser la distance critique exacte. L'utilisation d'agents antigélifs peut, par exemple, causer une diminution de la distance critique du fait de l'apparition de la pression osmotique. D'après les équations (21) et (23), cela entraîne une diminution de S_{CR} (ou une augmentation de la teneur en air requise).

La surfacé spécifique et le nombre de pores remplis d'air dépendent du degré de saturation actuel et des types de pores que l'eau est venue remplir.

(Il faut éviter la confusion entre les « pores remplis d'air » qui dans ce contexte ne signifient pas la même chose que les « pores d'air entraîné » dans le béton par exemple. Certains canaux capillaires peuvent être vides et s'il en est ainsi, on les appelle pores remplis d'air. De la même façon certains pores d'air entraîné peuvent être remplis d'eau, s'il en est ainsi, on *ne* les appelle *pas* pores remplis d'air)

Par détermination de la répartition du diamètre des pores et en supposant que les pores sont par exemple sphériques, il est possible de calculer comment α et N varient avec S_{ACT} et suivant différentes localisations de l'eau.

Warris [10] donne les principes de ces calculs.

On peut alors tracer les fonctions $S_{ACT} = f(\alpha; D_{CR})$ et $S_{ACT} = g$ (N; P_{CR}) sur la figure 11 (traits discontinus) et sur une figure représentant l'équation 23.

L'intersection des courbes S_{CR} et S_{ACT} donne la valeur de S_{CR} . On atteint la valeur de S_{CR} la plus faible, lorsque l'eau des pores est en équilibre; cela se produit pour les pores les plus petits (courbe I).

La courbe II correspond au cas où le gel se produit immédiatement après une montée d'eau. L'eau est encore située dans des canaux capillaires relativement grossiers car ils ont la vitesse de succion la plus élevée. Ainsi les pores remplis d'air sont en moyenne plus petits qu'à l'équilibre par le même degré de saturation. N et α ont des valeurs supérieures à celles obtenues à l'équilibre, et par conséquent S_{CR} aura aussi une valeur plus élevée. Parmi toutes les variables qui définissent la valeur de S_{CR}, seul K est affecté dans une certaine mesure par la localisation de l'eau.

Les équations (21) et (23) sont applicables pour des matériaux possédant *une* phase sensible au gel. Pour les matériaux qui ont des systèmes de phases multiples du point de vue de la résistance au gel, on peut les analyser de la façon suivante.

Prenons le béton comme exemple.

a) Système à deux phases avec une phase sensible au gel (béton avec entraîneur d'air et agrégats non poreux).

Les valeurs des paramètres de la pâte de ciment (+« pores d'air ») sont portées dans les équations (21) ou (23). Le coefficient S_{CR} de la pâte est calculé suivant la méthode exposée ci-dessus. La présence des agrégats peut affecter la valeur de la distance critique utilisée.

 S_{CR} d'un matériau composé = S_{CR} de la phase sensible au gel.

b) Système à deux phases avec deux phases sensibles au gel (béton avec agrégats poreux).

Les fractions des voluines des deux phases ont pour valeur v_1 et v_2 respectivement. On considère que chaque phase équivaut à un matériau simple pour lequel S_{CR} est calculé de la manière habituelle.

Par conséquent, on a deux valeurs pour S_{CR} : S_{CR}^1 et S_{CR}^2 . La valeur du coefficient S_{CR} pour le matériau composite n'est ni S_{CR}^1 ni S_{CR}^2 ; on peut le calculer comme suit :

Le degré de saturation actuel d'un matériau composé S_{ACT} , dépend des degrés actuels de saturation des deux phases poreuses, S_{ACT}^1 et S_{ACT}^2 .

$$S_{ACT} = \frac{S_{ACT} \cdot p_1 \cdot v_1 (1 - K_1) + S_{ACT}^2 \cdot p_2 \cdot v_2 (1 - K_2)}{p(1 - K)} (26)$$

où

$$p(1-K) = p_1 \cdot v_1(1-K_1) + p_2 \cdot v_2(1-K_2)$$
 (27)
 $v_1 + v_2 = 1$ (28)

Les indices 1 et 2 caractérisent les deux phases. D'après la répartition du diamètre des pores des deux matériaux on peut savoir de quelle façon l'eau est répartie entre les deux phases pour une certaine valeur de S_{ACT} du matériau composite. On atteint la valeur (S_{CR}) min lorsque l'eau s'est introduite dans les pores ayant les dimensions les plus faibles. On a représenté sur la figure 12 la relation partiellement hypothétique (équation (26)), pour un béton donné avec gros agrégats d'argile expansée. L'indice 1 représente la pâte de ciment, l'indice 2 les agrégats poreux.





L'argile expansée a des pores grossiers. Ainsi, quand la teneur en eau du matériau augmente à partir de l'état sec initial, les pores dus à la contraction du gel et les pores capillaires, à l'intérieur de la pâte de ciment, se remplissent d'abord, en même temps que se produit une certaine adsorption dans l'agrégat. Pour une valeur plus élevée de S_{ACT} , fles pores de compactage et les pores d'air entraîné dans la pâte de ciment commencent à se disputer l'eau avec les pores de l'agrégat.

Le béton atteint la valeur S_{CR} lorsque la pâte de ciment atteint S_{CR}^1 . Cela se produit même si $S_{CR}^1 > S_{CR}^2$.

Comme on connaît la valeur de tous les paramètres des équations (26), (27) et (28) il est possible de calculer S_{CR} pour un matériau composite en employant l'équation (26).

Pour illustrer les deux cas a et b, nous donnons l'exemple d'un calcul de S_{CR} pour une pâte de ciment, un mortier de ciment ou béton, tous sans entraîneur d'air.

a) La phase l consiste en une pâte de ciment sans pores de compactage. La phase 2 consiste en pores de compactage. La phase 3 est la phase d'agrégats non poreux.

b) $S^1 = 1,0 = S_{CAP}$ correspond à une saturation complète de tous les pores de la phase 1 (pores dus à la contraction du gel et pores capillaires). On peut calculer S_{CAP} d'après [22].

c) Comme les pores de compactage sont grossiers (phase 2) $S_{CR} < S_{CAP}$ d'après les équations (21) ou (23). (Les distances entre pores de compactage sont supérieures à la distance critique entre les pores de la pâte).

d) Lorsque S_{ACT} diminue graduellement au-delà de S_{CAP} , le nombre de pores remplis d'air, N, et leur surface spécifique, α , augmentent très vite. Autrement dit, les pores capillaires sont très petits, inférieurs à 13 µm d'après Verbeck [23].

e) S_{CR} est déterminé d'après les équations (21), (23) et (24) par le fait que le nombre de canaux capillaires pleins d'air (phase 1) doit être de 0,09. w_f . Cela signifie que toute l'eau expulsée peut être retenue par les pores capillaires, ce qui donne $S_{CR}^1 = 0,917$.

f) w_f est déterminé pour la température la plus basse en utilisant les équations dans [20].

g) On tire la valeur de S_{CR} de l'équation (26).

Les figures 13a et *b* donnent les résultats S_{CR} déterminés d'une façon empirique pour deux types de mortier de ciment.

On a reporté sur les mêmes figures les différentes valeurs de S_{CR} trouvées par le calcul. On a aussi reporté sur les figures les valeurs de S_{CAP} calculées et les valeurs de S_{ACT} données par les expériences de succion. S_{CAP} a pour valeur S_{ACT} déterminé lorsque la vitesse de succion diminue brusquement. Les figures montrent très nettement pourquoi un béton ou un mortier de ciment sans entraîneur d'air ont une mauvaise résistance au gel, S_{ACT} dépasse très rapidement en grandeur le coefficient S_{CR} au cours de la succion de l'eau.

VI-2. D'une façon empirique

Le degré critique de saturation est une constante du matériau et elle doit être déterminée comme telle; lorsque l'on aborde la méthode de gel, on doit respecter les principales conditions exposées cidessous :

a) On doit connaître le degré de saturation de chaque échantillon, qui doit rester constant durant tous les cycles.

b) L'éprouvette doit être assez petite pour que le degré de saturation soit autant que possible le même en tout point de l'échantillon. Cependant la dimension de l'échantillon doit être supérieure à l'épaisseur critique.

c) La vitesse de congélation doit être le plus proche possible de la réalité.







Fig. 13 b. — Calcul et mesure des valeurs de S_{CR} et S_{ACT} d'un mortier de ciment sans entraînement d'air.

d) Il est essentiel d'établir un critère de détérioration due au gel qu'ont peut considérer comme étant le dépassement de S_{CR} .

e) Le procédé de gel doit être identique pour toutes les catégories de matériaux.

Dans nos laboratoires, au cours de nos expériences, nous avons rempli les conditions de la manière suivante :

Condition a

On détermine aisément S si l'on connaît le volume des pores ouverts et la quantité d'eau susceptible de geler.

La quantité d'eau non susceptible de geler est déterminée à l'aide d'un calorimètre adiabatique pour des valeurs de dégel.

Les éprouvettes sont amenées au degré voulu de saturation par séchage à partir de l'état de saturation de tous les vides.

On assure une valeur constante à S durant les cycles de gel en enveloppant chaque éprouvette d'une feuille de polyéthylène.

Une hydratation continue peut cependant conduire à une diminution du facteur S. Pour déterminer cette diminution on pèse l'éprouvette séchée après l'expérience.

Condition b

L'éprouvette a les dimensions suivantes : $30 \times 30 \times 120$ mm. La taille de l'éprouvette est plus grande que toutes les tailles critiques trouvées jusqu'à présent, le rapport longueur /épaisseur convient aux essais dynamiques.

Condition c

La chambre de gel consiste en un caisson à gel ordinaire. La vitesse de refroidissement de l'air dans le caisson est commandée par un régulateur de température en fonction du temps, de telle sorte que le cycle air soit exactement le même quelle que soit la quantité des éprouvettes se trouvant dans le caisson. La température maximale vaut +5 °C. La température minimale n'excède pas --18 °C. La vitesse moyenne de refroidissement de l'air est de 4,6 °C par heure.

Les vitesses maximales de refroidissement de l'air mesurées en pratique sont d'environ 6 °C/h [24].

Le nombre de cycles maximal pour une éprouvette est de 180. Lorsque la température de l'air a atteinit son minimum, le dégel commence immédiatement. Ainsi le phénomène de la ségrégation de la glace n'a pas le temps de se produire totalement. Il est probable que S_{CR} sera quelque peu inférieur si l'on garde la température minimale pendant plusieurs heures.

Afin d'éviter des gradients d'humidité dus à la gravitation, on attache l'éprouvette à un cadre qui tourne à raison de l t/mn. On évite les gradients de température de l'air par l'utilisation de deux ventilateurs.

Condition d

On a utilisé six méthodes pour estimer les dégâts dus au gel.

1) différence dans l'aspect,

2) variation du module d'Young dynamique,

- 3) variations du frottement interne,
- 4) variations de la longueur (épaisseur),

5) variations du poids sec de l'éprouvette,

6) variation de la densité apparente.

Si on garde S constant pendant toute la durée des gels, il ne se produit théoriquement pas de dommages superficiels. De ce fait les méthodes 2), 3), 4) et 6) offrent les meilleures possibilités de détermination des dégâts dus au gel. On peut distinguer deux critères de résistance au gel pour les éprouvettes soumises au gel :

Critère 1

ou
$$\begin{cases} \frac{E_1}{E_0} \approx \left[\frac{f_1}{f_0}\right]^2 \geqslant 1 - k_1 < 1,0 \\ \Delta l_1 \leqslant k_2 > 0 \end{cases}$$
(29)

Critère 2

0

$$\begin{array}{c} \sum_{n} \sum_{i=1}^{n} \approx \left[\frac{f_n}{f_0}\right]^2 \geqslant \frac{E_1}{E_0} \\ \Delta l_n \leqslant \Delta l_1 \end{array} \tag{30}$$

 k_1 et k_2 sont deux constantes dépendant des matériaux.

 k_1 dépend de la relation existant entre un abaissement du module d'Young et une diminution de la résistance à la traction. A un $k_1 = 0,1$ correspond une diminution de 20 % de la résistance à la traction [25]. k_2 dépend de la déformation à la rupture du matériau. On doit tenir compte du fait que la déformation qui se produit pendant le gel est supérieure à la déformation permanente.

Le critère 2 suppose que les dégâts éventuels qui se produisent au cours du premier gel ne sont pas censés s'intensifier au cours de gels suivants au même degré de saturation.

Ce critère peut paraître inutile dans le cas où le critère l s'applique à tous les cycles. Il existe cependant des cas où il se produit une diminution relativement importante du module d'Young au cours du premier gel, cette diminution n'étant plus suivie d'autres diminutions. Dans ce cas le critère 2 montre que le matériau est résistant au gel. On peut donc utiliser le critère 2 afin de déterminer les valeurs appropriées de k_1 et k_2 .

Condition e

La condition qui rend possible la comparaison entre les résultats obtenus pour des expériences de gel pour différents matériaux est remplie si on utilise le même appareil de gel, si les cycles de gel sont identiques, si la méthode d'évaluation des dégâts est invariable et si le critère de résistance au gel est le même.

VI-3. Recherches en cours

Les études sont orientées à l'heure actuelle vers les gels d'un cycle, afin de voir si l'on pourra déterminer S_{CR} de cette manière-là.

Les expériences sont réalisées dans un calorimètreextensomètre. Les variations de longueur et la formation de la glace sont enregistrées automatiquement.

Des expériences sont projetées aux fins de comparaison entre les résultats en laboratoire et les expériences en pratique.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier le professeur S. G. BERGSTROM qui a lancé cette étude et qui est à l'origine de nombreuses idées originales, le professeur B. WARRIS qui par ses publications a fourni de nombreux renseignements, et le Conseil National Suédois pour la Recherche en Bâtiment qui a financé cette étude.

SUMMARY

Critical degree of saturation. — A tool for estimating the frost resistance of building materials. — It has been proved theoretically and empirically that critical degrees of saturation exist in connection with freezing of porous and brittle materials of different types. It has also been proved that damage occurs after one freezing if the actual degree of saturation exceeds the critical, which means that frost deterioration is not a phenomenon of fatigue but a typical fracture phenomenon. This in turn means that the problem of frost resistance in practice is of a statistical nature (fig. 9).

The "critical degree of saturation", S_{CR} is a material's constant that adopts individual values for each particular type and quality of material. In different environments and points of time, different "actual degrees of saturation", S_{ACT} , are reached.

Comparisons between the critical degrees of saturation of different materials and those reached in practice in a given situation provide a possibility of choosing materials with regard to frost resistance, viz. the frost resistance of different materials used in the same situation is expressed :

Degree of frost resistance = $S_{CR} - S_{ACT}$

The analogy with a normal design in regard to strength is clear (figs. 1, 2, and eq. (1)).

By using the concept " degree of saturation ",

two fundamental: deficiencies of recent methods of estimating frost resistance can be removed to a great extent : The defective correlation between the results of laboratory experiments and the behaviour of the tested material in practice; the difficulties of the choice between different materials with regard to frost resistance.

The article also shows how the concept " degree of saturation " can be used in dealing with the frost resistance of a layered construction (figs. 3, 4).

A laboratory test for determination of frost resistance can be divided in two parts :

Part 1 : Determination of S_{CR} . This can be done empirically by using exactly the same freezing method for all materials. It can also be done theoretically, viz. the existence of a critical degree of saturation is only a geometrical consequence of the existence of a critical distance between air-filled recipients.

Possible empirical and theoretical methods are accounted of in the article.

Part 2 : Determination of S_{ACT} . This can only be done, from a theoretical point of view, by use of advanced moisture mechanics or by tests reproducing exactly the actual environment. However, as a substitute, even simple water-uptake tests can be used. The different ways of using a material can be taken into account by changing the procedure at the determination of S_{ACT} .

RÉFÉRENCES

- Report on Cooperative Freezing-and-Thawing Tests of Concrete. HRB Special Report 47. Wash. D. C. 1959.
- [2] FLACK, H. L. Freezing-and-Thawing Resistance of Concrete as affected by the Method of Test. Am. Soc. Test. Mat. Proc. Vol. 57, 1959.
- [3] WARRIS B. Model describing the process of frost-deterioration. Preliminary Report Part I. Internat. Symp. : Durability of Concrete 1969. Prague, 1969.
- [4] KUBELKA P. Uber den Schmelzpunkt in sehr engen Capillaren. Ztschr. Electrochem Bd 38 Nr 8 a 1932.
- [5] HELMUTH R. A. Capillary Size Restriction on Ice Formation in Hardened Portland Cement Pastes. Proc. 4th Int. Symp. Chemistry of Cement. Vol. II. Nat. Bureau of Standards. Wash. D. C., 1960.
- [6] POWERS T. C. Resistance of Concrete to Frost at early Ages. Proc. RILEM Symp. 1956. Winter Concreting. Copenhagen, 1956.
- [7] BREYER H. Der S-wert, des einzige, verlässliche Kriterium für die Beurteilung der Frostbeständigkeit keramischer Erzeugnisse. Die Ziegelind, 1955 Heft 11.
- [8] SCHNEIDER H. Uber den Frostwiderstand von Dachziegeln und seine Pr
 üfung. Die Ziegelind, 15 (1962) H 8-13.

- [9] VUORINEN J. On Use of Dilation Factor and Degree of Saturation in Testing Concrete for Frost Resistance. Nordisk Betong 1970 : 1.
- [10] WARRIS B. The Influence of Air-Entrainment on the Frost-Resistance of Concrete. Proc. Nr 36 Swed. Cement & Concrete. Res. Inst. Stockholm, 1964.
- [11] POWERS T. C. The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete. Proc. HRB 29 (1949).
- [12] HIRSCHWALD J. Handbuch der bautechnischen gesteinsprüfung. Berlin, 1912.
- [13] BERGSTRÖM S. G., AHLGREN L. Calculation of Absorption Isotherms for Concrete. Nordisk Betong, 1969 : 2.
- [14] BRACS G., BALINT E., ORCHARD D. F. Use of Electrical Resistance Probes in Tracing Moisture Permeation Through Concrete. J. Am. Concr. Inst., August 1970.
- [15] PILTZ G. Einflüsse der Fertigung auf die Frostfestigkeit von Dachziegeln. Die Ziege¹ind 1968 H 15/16.
- [16] POWERS T. C., HELMUTH R. A. Theory of Volume Changes in Hardened Portland-Cement-Paste During Freezing. Proc. HRB 32 (1953).
- (17) EVERETT D. H. The Thermodynamics of Frost Damage to Porous Solids. Trans. Farad. Soc. 57 (1961).

[18] IVEY D. L., TORRANS P. H. — Air Void Systems in Ready-Mixed Concrete. Journal of Materials, Vol. 5, No. 2, june 1970.

.

- [19] DANIELSSON U., WASTESSON A. The Frost-Resistance of Cement-Paste as Influenced by Surface-Active Agents. Proc. Nr 30. Swed. Cement & Concrete. Res. Inst., Stockholm, 1958.
- [20] POWERS T. C., BROWNYARD T. L. Studies of Physical Properties of Hardened Portland-Cement-Paste. Bull. 22, Res. Labs of the PCA 1948.
- [21] LARSON T. D, CADY P. D., MALLOY J. J. The Protected Paste-Volume-Concept Using New Air-Void Measurement and Distribution Techniques. Journal of Materials, Vol. 2, No. 1, March 1967.
- [22] POWERS T. C. Physical Properties of Cement-Paste. Proc. 4th Int. Symp. Chemistry of Cement. Vol. II. Nat. Bureau of Standards, Wash. D. C. 1960.
- [23] VERBECK G. Pore Structure. Res. Dept. Bull. 197 (1966). PCA Res. & Devel. Labs.
- [24] BUTTERWORTH B. The Work of the T.B.E. Frost Committee. Claycraft, August 1961.
- [25] BERGSTROM S. G. Comparison of non-destructive Methods of Observation used in Freezingand-Thawing Tests of Concrete. 5th Congress of Large Dams, Paris 1955.

Édité par la Société de Diffusion des Techniques du Batiment et des Travaux Publics. 9, Rue La Pérouse, Paris-XVI^e *Le Gérant*: R. L'Hermite FD Imprimente alençonnaise, 61-alençon, np 57 Dépôt légal : 4° trim. 1971 - Nº 9.509 - 52.528

1

÷