Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 71 (1945)

Heft: 13

Artikel: La similitude dans les essais de gel sur de petits échantillons de terrain

Autor: Ruckli, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-54094

71e année 19 juin 1945 N° 13

BULLETIN TECHNIQUE
DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

La similitude dans les essais de gel sur de petits échantillons de terrain,

par R. RUCKLI, Dr ès sc. techn.
Inspecteur à l'Inspection fédérale des Travaux publics, Berne.

A. Généralités et exposé du problème.

L'étude de la gélivité des sols prend en Suisse une grande actualité par suite de l'établissement des projets des bases aéronautiques. Il a paru à ce sujet dans la *Nouvelle Gazette de Zurich* du 29 novembre 1944 [6] [1] une description des caractéristiques techniques de l'aéroport de Zurich-Kloten. Dans ce cas, le problème de la fondation des pistes d'envol, de façon à les rendre insensibles au gel, revêt une grande importance. Les constructeurs d'aérodromes se trouvent placés ainsi, aujourd'hui, devant le même problème que celui qui préoccupe les constructeurs de routes depuis une vingtaine d'années.

Les mesures préventives contre l'action du gel entraînent de fortes dépenses. Il importe donc de développer les recherches tendant à faire mieux connaître les causes de cette action et les moyens de la combattre. Ces études n'ont pas un intérêt scientifique seulement mais aussi un intérêt économique.

Les essais de laboratoire sur des échantillons de terrain jouent un rôle important pour déterminer le risque de gélivité du sous-sol des routes ou des pistes d'aérodromes. Plus ces échantillons peuvent être de petite dimension et plus les essais sont commodes, rapides et économiques. Mais on se demande toujours si de tels essais ont une valeur purement indicative ou bien si l'on peut en déduire le comportement effectif et quantitatif du même sol dans la nature. Dans ce dernier cas, les phénomènes produits par le gel en laboratoire et dans la nature devraient être semblables et alors les principaux facteurs entrant en jeu : dimensions, températures, aspiration d'eau par les lentilles de glace, coefficients caractéristiques du sol, temps, etc., doivent être liés entre eux par des rapports déterminés.

En d'autres termes, les soulèvements ou gonflements de chaussées produits par le gel, qui dépendent des caractéristiques géotechniques et thermiques du sol, et ceux observés en laboratoire, doivent être régis par une loi de similitude, pour autant que les essais ne reproduisent pas fidèlement les conditions naturelles. Si l'on en juge d'après ce qui a été publié jusqu'ici sur ces questions, on n'a pas attaché grande importance à cet argument et l'on n'a pas discuté la question de savoir dans quelle mesure les résultats obtenus en laboratoire peuvent être appliqués dans la pratique.

Etant donné la grande part que prendront dans ces recherches les travaux de laboratoire, il nous paraît indispensable d'examiner dans ce qui suit si une loi de similitude existe et dans quelles conditions elle est réalisée.

B. Loi de similitude de Fourier.

Pour tout phénomène thermique régi par l'équation différentielle générale de la transmission de chaleur, la loi de similitude de Fourier est applicable.

[1] Les chiffres entre crochets renvoient aux numéros correspondants de l'index bibliographique placé à la fin de l'article.

Afin de distinguer les facteurs régissant les phénomènes naturels de ceux intervenant sur modèles en laboratoire, désignons les premiers par un symbole surmonté d'un trait.

Dans le cas d'une transmission de chaleur à une seule dimension, l'équation différentielle générale s'écrit :

$$\begin{aligned} &\text{nature} \quad \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{t}} = \bar{a}\,\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{x}^2} \\ &\text{modèle} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = a\,\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \end{aligned} \qquad (1)$$

dans laquelle : θ = température
t = temps
x = longueur
a = coefficient de transmission des températures.

Choisissons comme suit les rapports entre grandeurs homologues :

$$\delta = \frac{\bar{\theta}}{\theta} \qquad \tau = \frac{\bar{t}}{t} \qquad \Lambda = \frac{\bar{x}}{x}\,^{1} \qquad (2)$$

Remplaçons dans (1) (nature) les valeurs $\bar{\theta}\,\bar{t}$ et $\bar{x}$ par leur valeur tirée de (2)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}\cdot\frac{\delta}{\tau} = a\,\frac{\bar{a}}{a}\,\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}\cdot\frac{\delta}{\Lambda^2} \qquad (3)$$

Les deux phénomènes sont semblables si l'on a

$$\frac{\delta}{\tau} = \frac{\bar{a}}{a}\,\frac{\delta}{\Lambda^2} \quad \text{ou} \quad \tau = \frac{a}{\bar{a}}\,\Lambda^2 \qquad (4)$$

La température n'intervient donc pas dans les conditions de similitude. La relation (4) est la loi de similitude bien connue de Fourier.

Si les coefficients de transmission des températures $\bar{a}$ et a sont égaux, l'équation (4) s'écrit

$$\tau = \Lambda^2 \qquad (4\,a)$$

ce qui exprime que les transmissions de chaleur sont semblables si les temps sont dans le rapport du carré des longueurs.

Cette condition de similitude conduit, et cela sans intégration de l'équation différentielle, à un résultat important relatif à la pénétration de vagues de chaleur dans un espace semi-infini et isotrope telle qu'elle se produit, par exemple, à la suite des variations de température journalières et annuelles dans la terre.

Définissons par x_0 la profondeur caractéristique à laquelle un changement de température est encore sensible à la suite d'une variation superficielle donnée. Si nous prenons la variation journalière pour modèle de la variation annuelle nous devons avoir

$$\tau = \frac{\bar{t}}{t} = \frac{365}{1} = \Lambda^2 = \left(\frac{\bar{x}_0}{x_0}\right)^2$$

[1] Le symbole Λ est choisi pour éviter toute confusion avec λ qui désigne le coefficient de conductibilité.

d'où $$\bar{x}_0 = \sqrt{\frac{\bar{t}}{t}}\,x_0 = \sqrt{365}\,x_0 = 19{,}1\,x_0,$$

ce qui veut dire que les variations de température annuelles se font encore sentir à une profondeur environ vingt fois plus grande que les variations journalières.

On peut arriver au même résultat en intégrant l'équation différentielle (1) si l'on se donne par exemple la variation de température à la surface, celle-ci étant soit de nature harmonique, soit la courbe réelle exprimée, par exemple, par un développement en série.

C. Loi de similitude pour la pénétration du gel dans le sol avec formations de lentilles de glace.

1. *Equation différentielle de la pénétration du gel.*

Pour pouvoir établir les relations de similitude, supposons connu le processus de pénétration du gel. L'échange normal de température est perturbé par suite de l'apport de chaleur dû à la libération de la chaleur de fusion de l'eau des pores et de celle aspirée par les lentilles de glace ; la quantité de chaleur qui doit être évacuée vers la surface est donc plus grande.

Jusqu'à maintenant, on n'a pas réussi à intégrer l'équation différentielle de la transmission de chaleur lorsqu'il se forme des lentilles de glace ; le calcul exact de la pénétration du gel n'est donc pas encore possible.

L'auteur était parvenu toutefois à établir une équation différentielle de la vitesse de pénétration du gel à l'aide d'une méthode approchée, qui consistait à remplacer les tautochrones $\theta = f(x)$ par des paraboles du premier degré. De nouvelles recherches de l'auteur ont montré que l'on a une meilleure approximation si, dans la zone gelée, on remplace la tautochrone par une droite au lieu de la parabole.

Cette relation peut servir de base pour l'étude des lois de similitude. Elle s'écrit :

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{A}{\xi} - B v - \frac{C}{\sqrt{t}} \qquad (5)$$

dans laquelle [1] ξ = profondeur de gel en cm
t = temps en heures
v = vitesse de l'eau alimentant les lentilles de glace en cm/heure
A = constante en cm²/heure qui dépend des caractéristiques du terrain et des conditions thermiques.

Elle s'exprime par :
dans l'hypothèse de deux paraboles comme tautochrones

$$A = \frac{2\lambda_1\mu(\theta_{II} - \theta_I)}{c_1\gamma_1\,\dfrac{\mu\theta_{II} - \theta_I}{3\mu} - c_2\gamma_2\,\dfrac{\theta_{II}}{3} + n\sigma} = \frac{Z}{N} \qquad (6)$$

$$\mu = 1 - \sqrt{\frac{\theta_{II}}{\theta_{II} - \theta_I}}$$

[1] Le développement de cette équation a été publié par l'auteur dans le *Bulletin technique de la Suisse romande*, 1943, nº 5, p. 55 et dans *Strasse und Verkehr*, 1943, nº 22, p. 357.

et dans l'hypothèse d'une droite et d'une parabole

$$A' = \frac{-\lambda_1 \theta_I}{c_1 \gamma_1 \dfrac{\eta\theta_{II} - \theta_I}{2\eta} - c_2\gamma_2 \dfrac{\theta_{II}}{3} + n\sigma} = \frac{Z'}{N'} \qquad (6\,a)$$

$$\eta = \frac{\theta_I}{\theta_{II} - \theta_I},$$

λ = coefficient de conductibilité ($\mathrm{cal}.h^{-1}\ \mathrm{cm}^{-1}\ {}^0C^{-1}$)

c = chaleur spécifique ($\mathrm{cal}\cdot g^{-1}\ {}^0C^{-1}$)

γ = poids spécifique ($g \cdot cm^{-3}$)

L'indice 1 se réfère à la zone gelée, l'indice 2 à celle non encore atteinte par le gel.

Au temps $t = 0$ la température du sol qui était de $\theta_{II} > 0^0\,C$ à la surface, passe brusquement à une valeur $\theta_I < 0^0\,C$;

θ_I = température (constante) à la surface du sol dès le début de la période de gel,

θ_{II} = température existant partout dans le sol et par suite aussi en surface avant le gel (constante).

n = volume des pores supposés saturés d'eau

σ = chaleur de fusion de la glace (79,15 $\mathrm{cal.cm}^{-3}$)

$$B = \text{constante} = \frac{\sigma}{N} \text{ resp. } \frac{\sigma}{N'} \text{ nombre pur} \qquad (7)$$

$$C = \text{constante} = \frac{\lambda_2 \theta_{II}}{\sqrt{3a_2(1-m)} \cdot N \cdot \text{resp. } N'} \ \mathrm{cm}\ h^{-\frac{1}{2}} \qquad (8)$$

a = coefficient de transmission des températures

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}\ \mathrm{cm}^2\, h^{-1}$$

m = nombre variant de 0,1 à 0,3.

On voit d'après l'équation (5) que la vitesse de pénétration du gel dépend des constantes thermiques du sol, de la température avant et après congélation et de l'apport d'eau. Plus grand est cet apport, plus faible est la vitesse de pénétration. L'équation différentielle de ξ ne suppose aucune loi régissant la vitesse d'alimentation de l'eau v vers les lentilles de glace et a donc une valeur générale.

Bien que le mécanisme exact de l'alimentation en eau ne soit pas encore bien élucidé, on peut admettre, avec une très forte probabilité, qu'il a pour cause une sous-pression ou « force d'aspiration » dont l'origine serait la force moléculaire qui lie les pellicules d'eau à la surface des particules de terrain ; cette force sera donc influencée par les propriétés du sol et aussi par des surcharges extérieures mais paraît être indépendante de la température de congélation [1]. Lorsque la pression extérieure atteint une certaine valeur, elle s'annule. La profondeur correspondant à cette pression critique sera désignée dans ce qui suit par ξ_0. La différence de pression créée par cette force d'aspiration $\frac{P_{s_0}}{\gamma_w}$ sert à vaincre les résistances à l'écoulement selon Darcy.

La vitesse d'écoulement de la nappe vers les lentilles de glace s'exprime approximativement par la relation [1]

$$v = k_D \frac{P_{s_0}}{\gamma_w}\left[\frac{1}{H-\xi} - \frac{\xi}{\xi_0(H-\xi)}\right] \qquad (9)$$

où k_D = coefficient de perméabilité (cm h^{-1})

$\frac{P_{s_0}}{\gamma_w}$ = hauteur d'eau représentative de la force d'aspiration à la surface du sol, exprimée en *cm*

H = profondeur de la nappe sous le niveau du sol en cm

ξ = profondeur de gel en cm.

Dans cette équation, on suppose, ce qui n'est pas tout à fait exact, que la force d'aspiration décroit linéairement avec la profondeur.

L'équation de v peut se représenter par une courbe. Suivant les conditions, v augmente ou diminue avec la profondeur.

Remplaçons v par sa valeur dans l'équation différentielle

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{A}{\xi} - Bk_D \frac{P_{s_0}}{\gamma_w} \frac{1}{H-\xi} + Bk_D \frac{P_{s_0}\xi}{\gamma_w \xi_0 (H-\xi)} - \frac{C}{\sqrt{t}} \qquad (10)$$

Examinons maintenant si cette équation différentielle (10) conduit à une loi de similitude.

2. *Recherche de la similitude.*

La pénétration du gel dans la nature a lieu d'après la relation

$$\frac{d\bar{\xi}}{d\bar{t}} = \frac{\bar{A}}{\bar{\xi}} - \bar{B}\bar{k}_D \frac{\bar{P}_{s_0}}{\gamma_w} \frac{1}{\bar{H}-\bar{\xi}} + \bar{B}\bar{k}_D \frac{\bar{P}_{s_0}}{\gamma_w} \frac{\bar{\xi}}{\bar{\xi}_0(\bar{H}-\bar{\xi})} - \frac{\bar{C}}{\sqrt{\bar{t}}} \qquad (10\,a)$$

et dans le modèle selon la relation (10).

Pour rapports de similitude, choisissons comme précédemment les grandeurs caractéristiques suivantes :

$$\frac{\bar{x}}{x} = \frac{\bar{\xi}}{\xi} = \Lambda \quad \text{échelle des longueurs}$$

$$\frac{\bar{t}}{t} = \tau \quad \text{échelle des temps.}$$

Remplaçons dans (10 *a*) $\bar{\xi}$ et $\bar{t}$ par $\Lambda\xi$ et $\tau \cdot t$;

$$\frac{d\xi}{dt}\cdot\frac{\Lambda}{\tau} = \frac{\bar{A}}{A}\cdot\frac{A}{\xi\cdot\Lambda} - \frac{\bar{B}}{B} B \frac{\bar{k}_D}{k_D}\cdot k_D \cdot \frac{\bar{P}_{s_0}}{P_{s_0}}\cdot\frac{P_{s_0}}{\gamma_w}\cdot\frac{1}{(H-\xi)\Lambda}$$

$$+ \frac{\bar{B}}{B} B \frac{\bar{k}_D}{k_D}\cdot k_D \cdot \frac{\bar{P}_{s_0}}{P_{s_0}}\cdot\frac{P_{s_0}}{\gamma_w}\cdot\frac{\xi\cdot\Lambda}{\dfrac{\bar{\xi}_0}{\xi_0}\,\xi_0(H-\xi)\Lambda} - \frac{\bar{C}}{C}\cdot\frac{C}{\sqrt{t}\cdot\sqrt{\tau}}.$$

Pour que l'équation soit satisfaite c'est-à-dire pour que les deux phénomènes soient semblables, les facteurs de l'équation différentielle doivent être égaux :

$$\frac{\Lambda}{\tau} = \frac{\bar{A}}{A}\cdot\frac{1}{\Lambda} = \frac{\bar{B}}{B}\cdot\frac{\bar{k}_D}{k_D}\cdot\frac{\bar{P}_{s_0}}{P_{s_0}}\cdot\frac{1}{\Lambda} = \frac{\bar{B}}{B}\cdot\frac{\bar{k}_D}{k_D}\cdot\frac{\bar{P}_{s_0}}{P_{s_0}}\cdot\frac{\xi_0}{\bar{\xi}_0} = \frac{\bar{C}}{C}\cdot\frac{1}{\sqrt{\tau}}. \qquad (11)$$

Le modèle est constitué en général du même matériau au point de vue thermique que le sol lui-même. Ecrivons encore que dans les deux cas, on a la même température de départ

$$\theta_I = \bar{\theta}_I \qquad \theta_{II} = \bar{\theta}_{II}$$

[1] En ce qui concerne l'établissement de cette formule, voir les publications de l'auteur [4] et [5].

on a alors d'après les équations (6), (7) et (8)

$$\frac{\overline{A}}{A} = 1 \qquad \frac{\overline{B}}{B} = 1 \qquad \frac{\overline{k_D}}{k_D} = 1 \qquad \frac{\overline{P_{s_0}}}{P_{s_0}} = 1 \qquad \frac{\overline{C}}{C} = 1$$

et l'équation (11) se simplifie comme suit :

$$\underbrace{\underbrace{\underbrace{\underbrace{\frac{\Lambda}{\tau} = \frac{1}{\Lambda}}_{\mathrm{I}} = \frac{1}{\Lambda}}_{\mathrm{II}} = \frac{\xi_0}{\overline{\xi}_0}}_{\mathrm{III}} = \frac{1}{\sqrt{\tau}}}_{\mathrm{IV}}. \qquad (11\,a)$$

Conditions I et II :

$$\frac{\Lambda}{\tau} = \frac{1}{\lambda}\,; \qquad \tau = \Lambda^2.$$

On retrouve la loi de similitude de Fourier déjà rappelée.

Condition IV :

$$\frac{\Lambda}{\tau} = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \qquad \tau = \Lambda^2.$$

Les conditions I, II et IV sont donc identiques

$$(\mathrm{IV}) \equiv (\mathrm{I})$$

Condition III :

$$\frac{\Lambda}{\tau} = \frac{\xi}{\overline{\xi}_0} \qquad \tau = \Lambda \frac{\overline{\xi}_0}{\xi_0}$$

Cette condition n'est pas compatible avec les autres, c'est-à-dire que la similitude n'est en général pas réalisée car, pour un même matériau, les constantes ξ_0 et $\overline{\xi}_0$ sont égales.

La condition III est basée sur la relation entre la pression et la pénétration du gel. Si l'influence de la pression peut être négligée, la condition III tombe. C'est le cas si, dans l'équation (9), ξ_0 est très grand, c'est-à-dire si la force d'aspiration varie peu ou pas avec la profondeur.

On peut encore se demander s'il est possible de réaliser un modèle quand l'apport d'eau dépend de la pression ;

on doit avoir :

$$\tau = \Lambda \frac{\overline{\xi}_0}{\xi_0} = \Lambda^2 \quad \text{ou} \quad \frac{\overline{\xi}_0}{\xi_0} = \Lambda$$

$$\xi_0 = \frac{\overline{\xi}_0}{\Lambda}.$$

Un tel changement de constante n'est pas possible sans que d'autres constantes soient modifiées à leur tour, par exemple $\frac{P_{s_0}}{\gamma_w}$ et k_D.

Considérons encore le cas particulier

$$\xi_0 = \overline{H}$$

l'équation (9) s'écrit alors

$$\overline{\nu} = k_D \frac{P_{s_1}}{\gamma_w}\left[\frac{1}{\overline{H}}\right] = \text{const.}$$

Etant donné que, dans le modèle, le deuxième terme de la parenthèse de l'équation (9) devient négligeable, ν. (modèle) s'écrit alors

$$\nu = \sim k_D \frac{P_{s_0}}{\gamma_w}\left[\frac{1}{H - \xi}\right].$$

S'il s'agit d'un essai pour lequel la profondeur de la nappe est grande vis-à-vis de la pénétration du gel, on a

$$\nu = \sim k_D \frac{P_{s_0}}{\gamma_w}\left[\frac{1}{H}\right]$$

et

$$\overline{\nu} = \sim k_D \frac{P_{s_0}}{\gamma_w}\left[\frac{1}{H \cdot \Lambda}\right].$$

Les valeurs de ν dans le modèle et dans la nature sont encore entre elles comme 1 est à $\frac{1}{\Lambda}$.

Donc si $\xi_0 = \overline{H}$, les conditions de similitude sont approximativement remplies si la profondeur $\overline{H}$ de la nappe est grande par rapport à la pénétration maximum du gel ξ_{max}.

3. *Résumé.*

Si le modèle est constitué du même matériau que le sol naturel et si les températures initiales sont égales dans les deux cas, les deux processus de congélation sont similaires :

a) S'il n'y a aucun apport d'eau extérieur ou

b) si l'apport d'eau est indépendant de la pression.

Ils sont à peu près semblables si la profondeur de la nappe $\overline{H}$ dans la nature est égale ou à peu près égale à la profondeur ξ_0 pour laquelle la pression correspondante empêche le cheminement de l'eau.

La loi de similitude de Fourier $\tau = \Lambda^2$ détermine le rapport entre les longueurs et les temps de pénétration du gel dans le sol. Pour un rapport des longueurs donné Λ le rapport des temps τ est déterminé.

Si l'apport d'eau vers la zone en congélation dépend de la pression, il faut étudier dans chaque cas particulier si cette influence est importante pour la congélation du terrain ou pas. Si cette influence est faible, il y a similitude approchée entre le modèle et la nature.

Ainsi que l'a montré Neumann [3] on peut, dans le cas *a*), intégrer l'équation différentielle de l'échange de chaleur et calculer directement la pénétration du gel.

La loi de similitude reste valable si l'on intègre l'équation différentielle de la pénétration du gel par une méthode approchée à condition qu'il n'y ait pas d'afflux d'eau. On peut voir dans cette vérification une preuve que la méthode approximative proposée par l'auteur est correcte du point de vue formel.

4. *Gonflement par le gel et degré de gélivité.*

Dücker [2] a proposé l'emploi d'un coefficient *F* appelé degré de gélivité pour juger de la gélivité d'un terrain. Ce coefficient peut être déterminé en laboratoire sur de petits échantillons.

F est défini comme le rapport du gonflement maximum h_{max} à la profondeur maximum de pénétration du gel ξ_{max}.

$$F = \frac{h_{max}}{\xi_{max}}\,.$$

Le soulèvement est la somme des épaisseurs des lentilles de glace mesurée dans le sens de la pénétration du gel.

Il se calcule aussi d'après le volume d'eau qui passe pendant la durée T de l'essai à travers une section horizontale égale à l'unité augmentée de la dilatation de l'eau des pores et de celle aspirée par suite du passage de l'état liquide à l'état solide

$$h = 1{,}09 \int_0^T \nu \cdot dt + 0{,}09 \cdot n \cdot \xi_{max}. \qquad (12)$$

Examinons si le facteur de gélivité suit la loi de similitude

$$\nu = k_D \cdot \frac{P_{s_0}}{\gamma_w}\left[\frac{1}{H-\xi} - \frac{\xi}{\xi_0(H-\xi)}\right] = f(\xi) \qquad (9)$$

comme $\xi = F(t)$ [1] on a aussi $\nu = \psi(t)$.

$$h = 1{,}09 \int_0^T \psi(t) \cdot dt + 0{,}09 \cdot n \cdot \xi_{max}. \qquad (12\,a)$$

Exprimons h par le soulèvement $\overline{h}$ dans la nature

$$h = \frac{\overline{h}}{\Lambda} = 1{,}09 \int_0^{\frac{\overline{T}}{\tau}} \frac{\psi(\overline{t})}{\Lambda} \cdot \frac{d\overline{t}}{\tau} + 0{,}09 \cdot n \cdot \frac{\overline{\xi}_{max}}{\Lambda} \qquad (12\,b)$$

$$F = \frac{h}{\xi_{max}} = \frac{\overline{h} \cdot \Lambda}{\Lambda \cdot \overline{\xi}_{max}} = 1{,}09 \cdot \int_0^{\frac{\overline{T}}{\tau}} \frac{\psi(\overline{t}) \cdot d\overline{t}}{\Lambda} \cdot \frac{\Lambda}{\overline{\xi}_{max}} + 0{,}09 \,.\, n\, \frac{\overline{\xi}_{max} \cdot \Lambda}{\Lambda \cdot \overline{\xi}_{max}}. \qquad (13)$$

$$F = \frac{h}{\xi_{max}} = \frac{\overline{h}}{\overline{\xi}_{max}} = \overline{F} \qquad (14)$$

[1] $\xi = F(t)$ est obtenu par intégration de l'équation différentielle (5). On peut remplacer la courbe $\nu = f(\xi)$ équation (9) par une droite sans commettre une erreur grossière ; cette droite passe par les points correspondants à la face inférieure de l'empierrement et à la profondeur maximum du gel. L'équation de la pénétration du gel s'écrit alors

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{A}{\xi} - B_1 . \xi - \frac{C}{\sqrt{t}} + D_1.$$

M. le professeur Dr E. Stiefel, E. P. F., m'a communiqué à titre personnel que l'intégration est possible au moyen d'une méthode d'approximation très précise. La pénétration du gel s'écrit par la loi :

$$\xi = L . \sqrt{t}\,\{1 - B_1 . R . t\} + D_1 . S . t$$

où

$$L = \sqrt{2A + C^2} - C$$

$$R = \frac{1}{\frac{A}{L^2} + \frac{3}{2}}\,; \qquad S = \frac{1}{\frac{A}{L^2} + 1}\,.$$

Pour $\nu = 0$ (pas d'aspiration d'eau) on a

$$B_1 = 0 \quad D_1 = 0 \qquad \text{et} \qquad \xi = L\sqrt{t},$$

ce qui correspond à l'équation donnée par Neumann.

La condition de similitude étant remplie il en résulte que le facteur de gélivité est indépendant de l'échelle du modèle. Dans ces conditions, il définit bien la gélivité d'un sol.

5. *Similitude dans l'hypothèse d'une autre loi régissant l'apport d'eau.*

a) *Cet apport est supposé dû à des forces capillaires.*

Dans ce cas, on peut écrire que la vitesse ν

$$\nu = k_D\, \frac{K - (H - \xi)}{H - \xi} \qquad (15)$$

où K est la hauteur d'aspiration capillaire. (15) peut encore s'écrire :

$$\nu = k_D\, \frac{K}{H - \xi} - k_D\, \frac{H - \xi}{H - \xi} \quad \text{modèle}$$

$$\text{et} \quad \overline{\nu} = \overline{k}_D \cdot \frac{\overline{K}}{\overline{H} - \overline{\xi}} - \overline{k}_D\, \frac{\overline{H} - \overline{\xi}}{\overline{H} - \overline{\xi}} \quad \text{dans la nature.} \qquad (16)$$

Par suite de l'identité des matériaux dans les deux cas on peut écrire :

$$k_D = \overline{k}_D \quad \text{et} \quad K = \overline{K}$$

Il vient alors :

$$\underbrace{\underbrace{\overline{\nu} = \nu\, \frac{\Lambda}{\tau} = k_D \cdot \frac{K}{\Lambda(H - \xi)}}_{\mathrm{II}} - k_D}_{\mathrm{III}} \qquad (17)$$

Les conditions I et IV ne sont pas influencées par la loi régissant l'apport de l'eau. (11 *a*).

La condition II s'écrit :

$$\frac{\Lambda}{\tau} = \frac{1}{\Lambda}\,, \qquad \tau = \Lambda^2.$$

La condition III, qui ne dépend plus de la pression mais de la hauteur d'aspiration capillaire, prend la forme :

$$\frac{\Lambda}{\tau} = 1 \qquad \tau = \Lambda$$

Si dans l'équation (17) la hauteur d'aspiration $(H - \xi)\,\Lambda$ est petite par rapport à K, on peut négliger le second terme. La condition de similitude est alors satisfaite.

Plus $(\overline{H} - \overline{\xi})$ se rapproche de la valeur K et moins il y a similitude entre modèle et nature.

Pour $(\overline{H} - \overline{\xi}) = K$ d'après (15) l'aspiration d'eau dans la nature cesse.

b) *L'apport d'eau est une conséquence d'une « force de cristallisation ».*

Dücker et d'autres auteurs admettent, comme cause de l'aspiration de l'eau, une force de cristallisation qui ne dépendrait que de la température de congélation. La perméabilité, par contre, toujours selon Dücker, n'influencerait pas la vitesse de croissance des lentilles de glace. Pour une température donnée de congélation, l'apport d'eau serait constant parce que, si la perméabilité n'a pas d'influence, la hauteur d'aspiration n'en aurait pas non plus. Pour une température de congélation constante, les grandeurs B et ν de l'équation (5) sont constantes, et la loi de similitude n'est pas applicable. Si cela était, le degré de gélivité introduit par Dücker n'aurait pas de sens parce qu'on ne pourrait pas passer d'un essai sur un modèle au phénomène naturel.

6. *Conclusion.*

Il faut, pour chaque essai de gel, contrôler si la loi de similitude est satisfaite.

Si c'est le cas, il n'est pas nécessaire d'interpréter l'essai parce qu'alors le gonflement observé est semblable à celui qui aura lieu à l'échelle naturelle et le degré de gélivité est obtenu directement par l'essai sur modèle.

Si, au contraire, il n'y a pas similitude, il faut déterminer la force d'aspiration agissant sur le modèle et de là, par exemple à l'aide de la théorie établie par l'auteur, calculer le gonflement probable.

La connaissance des lois de similitude présente donc le grand avantage que pour toute une série de cas pratiques, le danger de gélivité peut être déterminé par des essais de gélivité en laboratoire sur de petits échantillons. L'application de la théorie se limite donc aux cas où les conditions de similitude ne sont pas remplies.

Les lois de similitude montrent ainsi qu'il est parfaitement justifié de faire les essais aux mêmes températures que celles observées dans la nature. La durée des essais ne doit pas être admise à priori mais doit être basée sur le rapport de similitude.

La loi de similitude établie ci-dessus sur des bases théoriques doit encore être contrôlée expérimentalement pour vérifier si les hypothèses de base sont justifiées et dans quelle mesure [1].

Bibliographie.

1. Beskow, G. : *Tjälbildningen och Tjällyftningen.* Sveriges Geologiska Undersökning. Arsbok 26, 1932, Nr. 3, Stockholm 1935.
2. Dücker, A. : *Beziehungen zwischen Frosthebung und Gefriertemperatur.* Schriftenreihe der « Strasse », Bd. XVII. Volk und Reich Verlag, Berlin 1939.
3. Gröber-Erk : *Die Grundgesetze der Wärmeübertragung.* Jul. Springer, Berlin 1933.
4. Ruckli, R. : *Gélivité des sols et fondation des routes.* « Bulletin technique » des 20 février, 6 mars, 3 avril et 15 mai 1943.
5. Ruckli, R. : *Die Frostgefährlichkeit des Strassenuntergrundes.* « Strasse und Verkehr », Heft Nr. 19 f.f., 1943.
6. Strickler, H. : *Das Flughafenprojekt Zürich-Kloten.* « Neue Zürcher Zeitung », éd. de midi, 29 nov. 1944, p. 5. Supplément technique n° 2048 (50).

[1] Le *Laboratoire de Géotechnique* de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne vient de mettre en service une chambre froide et procède actuellement à une série d'expériences destinées précisément à élucider ces questions et à compléter les recherches qu'il fit antérieurement en ce domaine. Les résultats de ces travaux ainsi que les constatations faites lors de l'étude de sols de fondation de nombreuses routes et d'aérodromes feront l'objet ultérieurement de publications dans le B. T. (Réd.)

SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

Assemblée des délégués du 28 avril 1945, à Aarau.

Rapport du Secrétaire central.

Le présent rapport s'étend sur l'activité de la S. I. A. depuis la dernière assemblée des délégués du 25 novembre 1944, à Zurich ; il doit donner un aperçu général des travaux de la Société et notamment du Comité central et du Secrétariat central.

a) *Etat nominatif.*

A la date du 27 avril 1945, la S. I. A. comptait 2873 membres contre 2809 au 24 novembre 1944, ce qui correspond à une augmentation de 64 membres depuis la dernière assemblée des délégués. Les membres se répartissent comme suit d'après leur profession : architectes, 832 ; ingénieurs civils, 1024 ; ingénieurs électriciens, 327 ; ingénieurs mécaniciens, 492 ; ingénieurs ruraux et topographes, 125 ; chimistes, etc., 73.

Ces derniers temps, la S. I. A. a admis un nombre réjouissant de nouveaux membres, ce qui contribuera à renforcer sa position vis-à-vis du public et des autorités. Le Comité central a demandé aux sections d'entreprendre une campagne systématique de propagande, car il s'avère toujours plus qu'il y a de nombreux ingénieurs et architectes qui remplissent les conditions nécessaires à leur admission et qui ne font pas partie de la S. I. A., soit parce qu'ils n'ont pas de relations avec des membres actifs, soit parce qu'ils sont trop peu renseignés sur l'activité de la S. I. A. Quelques sections ont déjà organisé des campagnes de propagande et ont obtenu des résultats appréciables. Le Secrétariat se met volontiers à la disposition des sections pour les conseiller et les appuyer dans l'organisation de ces actions, et, cas échéant, il est prêt à leur préparer ou à leur faire tenir les documents nécessaires.

Le Comité central a toujours attaché la plus grande importance à ce que soient respectées les instructions pour l'admission dans la S. I. A. ; le niveau de nos membres ne doit pas être rabaissé sous prétexte de faciliter l'action de recrutement. En principe, l'admission dans la S. I. A. reste, comme auparavant, subordonnée à l'accomplissement du cycle complet des études universitaires, ou, si cette condition n'est pas réalisée, à une pratique de dix ans dans une situation dirigeante, avec une formation technique, ou encore à une pratique de quinze ans, si cette formation manque. Dans certains cas, des travaux remarquables en science technique ou des succès exceptionnels dans des concours peuvent être considérés comme équivalents à la pratique. En cas de doute, le Secrétariat se met volontiers au service des sections pour leur donner son préavis.

b) *Comptes de l'exercice 1944 et budget pour 1945.*

Le Secrétariat est parvenu à obtenir d'importantes recettes supplémentaires par l'extension de son activité et particulièrement par l'accroissement de son service de publications. La S. I. A. a pu s'assurer, en outre, en 1944, différentes recettes accessoires, notamment par la gestion du secrétariat de l'Association suisse pour le plan d'aménagement national. Mais cette dernière source de revenus tarira en 1945, attendu que ce secrétariat a été transféré le 1er janvier 1945 aux organes de l'Association suisse.

Il sera indiqué d'établir avec toute la prudence voulue le budget pour 1945 et de ne réduire en aucun cas la cotisation annuelle. Malgré l'accroissement constant de tous les frais