

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 69 (1943)
Heft: 7

Artikel: Gélivité des sols et fondation des routes
Autor: Ruckli, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-52509>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 16.01.2026

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 13.50 francs

Etranger : 16 francs

Pour sociétaires :

Suisse : 1 an, 11 francs

Etranger : 13.50 francs

Prix du numéro :

75 centimes.

Pour les abonnements

s'adresser à la librairie

F. Rouge & C^{ie}, à Lausanne.

Paraisant tous les 15 jours

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président : R. NEESER, ingénieur, à Genève ; Vice-président : M. IMER, à Genève ; secrétaire : J. CALAME, ingénieur, à Genève. Membres : *Fribourg* : MM. L. HERTLING, architecte ; P. JOYE, professeur ; *Vaud* : MM. F. CHENAUX, ingénieur ; E. ELSKES, ingénieur ; EPITAUX, architecte ; E. JOST, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; CH. THÉVENAZ, architecte ; *Genève* : MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; E. MARTIN, architecte ; E. ODIER, architecte ; *Neuchâtel* : MM. J. BÉGUIN, architecte ; R. GUYE, ingénieur ; A. MÉAN, ingénieur ; *Valais* : M. J. DUBUIS, ingénieur ; A. DE KALBERMATTEN, architecte.

RÉDACTION : D. BONNARD, ingénieur, Case postale Chauderon 475, LAUSANNE.

Publicité :
TARIF DES ANNONCES

Le millimètre
(larg. 47 mm.) 20 cts.

Tarif spécial pour fractions
de pages.

En plus 20 % de majoration de guerre.

Rabais pour annonces
répétées.



ANNONCES-SUISSES S.A.
5, Rue Centrale,
LAUSANNE
& Succursales.

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE
A. STUCKY, ingénieur, président ; M. BRIDEL ; G. EPITAUX, architecte ; M. IMER.

SOMMAIRE : *Gélivité des sols et fondation des routes* (suite), par R. RUCKLI, ingénieur à l'Inspectorat fédéral des travaux publics. — BIBLIOGRAPHIE. — SERVICE DE PLACEMENT. — DOCUMENTATION.

Gélivité des sols et fondation des routes

par R. RUCKLI, ingénieur à l'Inspectorat fédéral
des travaux publics.

(Suite.)¹

CHAPITRE V.

Théorie des gonflements par le gel.

Etant donné la multiplicité des conditions climatologiques et surtout géologiques, il n'est pas possible d'établir une théorie générale du phénomène de gonflement par le gel. Les théories développées dans les chapitres précédents permettent cependant de chiffrer approximativement la gélivité, dans l'hypothèse d'une seule période de froid et dans le cas particulier classique d'un terrain homogène, où le corps de la route libre de neige est placé au-dessus d'une nappe phréatique ou d'un courant souterrain bien défini.

A. Etude préliminaire.

Le gel ne cause de dégâts aux routes que si trois conditions sont réalisées simultanément : gélivité du sol, présence d'eau souterraine absorbable et périodes de froid suffisamment longues. Si l'une de ces trois conditions n'est pas remplie, il ne se forme pas de lentilles de glace et le danger de gel n'existe pas. L'étude pratique de la gélivité doit donc établir tout d'abord l'existence de ces conditions, en procédant aux essais indiqués ci-après.

¹ Voir *Bulletin technique* des 20 février et 6 mars 1943.

1. Essais en vue de la détermination de la gélivité du sol et de la présence d'eau souterraine.

a) Essais sur le terrain.

Si l'on soupçonne le terrain d'être gélif, il faut prélever des échantillons de terre non remaniée dans le sous-sol, à l'aide d'un outillage adéquat ; le nombre d'échantillons dépend de la variété des couches rencontrées. Il faut déterminer en même temps le niveau de la nappe phréatique. Pour tenir compte des fluctuations possibles de ce niveau, il est bon de répéter les observations et de les étendre sur une période comportant des conditions météorologiques diverses, des plus sèches aux plus humides.

b) Essais de laboratoire.

Sur l'échantillon de terrain non remanié, on commencera par faire au laboratoire un essai de perméabilité, puis on déterminera la force d'aspiration P_s au moyen d'essais de congélation ou de la nouvelle méthode du « Blaugel » décrite au chapitre II. Par tamisage on déterminera ensuite la composition granulométrique du terrain.

Au moyen du critère de Casagrande, on peut alors répondre à la question de la gélivité du terrain.

2. Détermination des conditions climatologiques.

Nous avons vu au chapitre III que les longues périodes de froid sont moins fréquentes que les courtes, où le froid est moins vif ; il faut déterminer quelles sont la durée et l'intensité du froid à prendre comme base de l'étude. En plus de l'altitude, ces données dépendront en première ligne, comme nous l'avons déjà montré au

chapitre III¹, de la nature du revêtement de la route. On posera donc comme condition que le sous-sol de la route doit être insensible au gel correspondant à la période de froid maximum qui a de grandes probabilités de se produire au moins une fois pendant la durée d'existence du revêtement.

Si l'existence normale probable du revêtement est de L années, pendant lesquelles une destruction par le gel ne doit normalement pas se produire, on peut, en faisant usage des résultats donnés au chapitre III¹, déterminer pour l'altitude donnée la durée du froid T_i , qui ne sera probablement pas dépassée pendant ces L années, et l'intensité moyenne θ_{T_i} du froid. On connaît ainsi les conditions climatériques dans le cas envisagé.

3. Intensité du froid θ_T et température superficielle du sol δ_s .

Nous avons vu précédemment que l'air se réchauffe en général par le fait que le sol lui cède de la chaleur ; pour que ce soit possible, il faut que la température de l'air soit plus basse que celle du sol. Notre calcul serait trop défavorable si nous ne tenions pas compte de cette différence.

Si nous appelons η le rapport entre la température superficielle du sol et celle de l'air, nous avons

$$\delta_s = \eta \theta_T.$$

Pour l'ensemble d'une période de froid, η peut être évalué à 0,5 — 0,7 ; mais ce n'est pas une grandeur physique ; ce n'est qu'un coefficient de calcul.

B. Calcul du gonflement.

1. Vitesse ν de l'absorption d'eau.

La vitesse d'absorption ν dépend à la fois de la distance de la zone de gel au niveau de la nappe phréatique, et de la compression produite par les charges extérieures, et par conséquent de la profondeur de la zone de gel au-dessous de la surface du sol. Nous considérerons d'abord ces deux effets séparément puis les superposerons.

a) Relation entre l'absorption d'eau et la distance de la zone de gel à la nappe phréatique.

D'après l'équation (1) du chapitre II, la vitesse de circulation verticale et ascendante de l'eau, sous l'effet de la force d'aspiration est donnée par

$$\nu = k_D \cdot \frac{P_s}{\gamma_w \cdot l}$$

l représente la distance entre les lentilles de glace et la nappe phréatique, donc

$$l = H - \xi$$

$$\nu = k_D \cdot \frac{P_s}{\gamma_w} \cdot \frac{1}{(H - \xi)} \quad (1)$$

Le facteur $k_D \frac{P_s}{\gamma_w}$ est une constante à déterminer pour chaque terrain.

¹ Seules les conclusions du chapitre III ont été publiées ici, pour plus ample information prière de se reporter au texte de la thèse elle-même (Réd.).

b) Relation entre l'absorption d'eau et la pression, respectivement la profondeur de la zone de gel.

Sur la base de nombreux essais, Beskow (7) a trouvé la relation suivante entre la vitesse de gonflement et la pression totale p , qui se compose de la pression résultant de charges extérieures et de la tension capillaire : (fig. 5.).

$$\nu_p = a \cdot \frac{1}{p^2}$$

L'équation représente une hyperbole et donne pour la pression $p = 0$ une vitesse ν infinie. Quand la profondeur de la zone de gel s'accroît, la pression agissant sur les lentilles de glace augmente comme suit, à cause du poids de la couche de terre sus-jacente ;

$$\nu = \gamma_e \xi + p_c$$

où γ_e représente le poids spécifique du terrain congelé et p_c la tension capillaire. On peut donc écrire aussi

$$\nu_p = a \cdot \frac{1}{(\gamma_e \xi + p_c)^2}$$

où ν_p est exprimé en fonction de la profondeur.

Au lieu de la vitesse de gonflement ν , il est aussi possible de donner la force d'aspiration en fonction de la pression. Elle diminue comme la vitesse de gonflement quand la pression augmente, c'est-à-dire quand la profondeur de la zone de gel augmente. On doit donc avoir aussi

$$\frac{P_s}{\gamma_w} = \frac{\beta}{p^2} = \beta \cdot \frac{1}{(\gamma_e \xi + p_c)^2}$$

Cependant, cette équation conduit à des formules compliquées et il faut chercher à représenter par une loi simple la relation entre la pression et la force d'aspiration.

Seule la partie de l'hyperbole du second degré qui correspond à la profondeur située entre la face inférieure de l'empierrement et la limite F de la zone de gel, est pratiquement intéressante. Ce tronçon de courbe peut être remplacé par sa corde $S — F$ et on peut écrire ainsi : (fig. 28).

$$P_{s\xi} = P_{s_0} - \frac{P_{s_0} \cdot \xi}{\xi_0} \quad (2)$$

$$P_{s\xi} = P_{s_0} \cdot \left(1 - \frac{\xi}{\xi_0}\right)$$

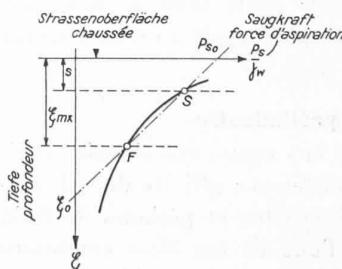


Fig. 28.

Force d'aspiration $\frac{P_s}{\gamma_w}$ en fonction de la profondeur ξ . ξ_0 = profondeur critique, c. à. d. celle où l'absorption d'eau devient impossible par suite des charges extérieures. (Voir également fig. 5)

c) Relation entre la vitesse de circulation de l'eau et la profondeur de la zone de gel.

En combinant les équations (1) et (2), on obtient pour la vitesse de circulation de l'eau :

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{k_D \cdot P_{s_0}}{\gamma_w} \cdot \left(1 - \frac{\xi}{\xi_0}\right) \cdot \frac{1}{H - \xi} \\ \nu &= k_D \cdot \frac{P_{s_0}}{\gamma_w} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{H - \xi} - \frac{\xi}{\xi_0(H - \xi)}\right)}_e. \end{aligned} \quad (3)$$

Chacune des deux fractions de la parenthèse de cette équation représente une courbe, que nous appellerons K_1 et K_2 respectivement. La parenthèse exprime l'écartement des deux courbes mesuré perpendiculairement à l'axe des ξ . On peut construire ces courbes géométriquement de la façon suivante.

Courbe K_1 . (fig. 29.)

On trace une droite fondamentale, parallèlement à l'axe des ξ à la distance $a = 1$, et une autre parallèle

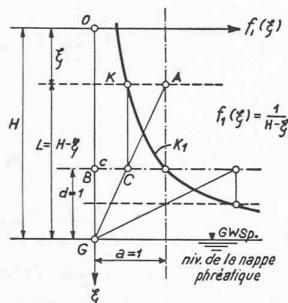


Fig. 29.

Construction graphique de $f_1(\xi) = \frac{1}{H - \xi} = K_1$.

ment à la nappe phréatique à la distance $d = 1$. A une profondeur quelconque ξ , on mène une horizontale qui coupe la droite fondamentale verticale en A . La droite $A - G$ découpe sur la droite fondamentale horizontale le segment $BC = c$, de longueur $\frac{1}{H - \xi}$; le point C est relevé en K sur l'horizontale de cote ξ , K est le point de la courbe correspondant à la profondeur ξ .

$$\begin{aligned} \frac{a}{l} &= \frac{c}{d} & a &= 1 \\ d &= 1 & & \\ \frac{1}{l} &= \frac{c}{1} & c &= \frac{1}{H - \xi} \end{aligned}$$

Courbe K_2 . (fig. 30.)

On reporte, à partir de G le segment horizontal $GA = \frac{H}{\xi_0}$. La droite AO coupe l'horizontale de cote ξ au point B et la droite GB coupe la droite fondamentale

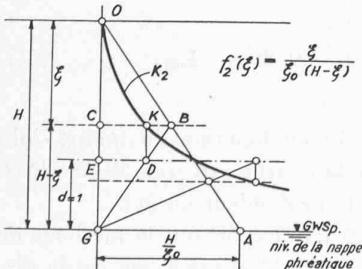


Fig. 30.

Construction graphique de $f_2(\xi) = \frac{\xi}{\xi_0(H - \xi)} = K_2$.

horizontale en D . Le point D est relevé en K sur l'horizontale de cote ξ . CK représente la valeur cherchée $\frac{\xi}{\xi_0(H - \xi)}$ en fonction de ξ .

$$\begin{aligned} CB &= \frac{\xi}{\xi_0} \\ ED &= \frac{1}{H - \xi} \\ ED &= \frac{CB}{H - \xi} = \frac{\xi}{\xi_0 \cdot (H - \xi)} \\ CK &= \frac{\xi}{\xi_0 \cdot (H - \xi)} \end{aligned}$$

Les deux courbes sont tracées dans un même système d'axes. Leur écartement e mesuré sur l'horizontale, multiplié par le facteur $k_D \frac{P_s}{\gamma_w}$ représente pour chaque profondeur ξ de la zone de gel, la vitesse ascensionnelle cherchée du courant d'eau. On peut distinguer deux cas :

$\xi_0 < H$.

Pour $\xi = \xi_0$, la fonction $f_2(\xi) = \frac{\xi}{\xi_0(H - \xi)}$ se confond avec $f_1(\xi) = \frac{1}{H - \xi}$.

L'expression entre parenthèses de l'équation (3) et par conséquent la distance entre les deux courbes deviennent nulles, les courbes se coupent à la profondeur ξ_0 , ce qui correspond à l'hypothèse faite quant à la variation de la force d'aspiration P_s . Dans ce cas, la vitesse diminue constamment à partir de la valeur ν_0 à la surface, et elle s'annule à la profondeur ξ_0 . A partir de ce point, l'absorption d'eau et le gonflement cessent, à cause de l'excès de pression, bien que la profondeur de la zone de gel continue à augmenter (fig. 31).

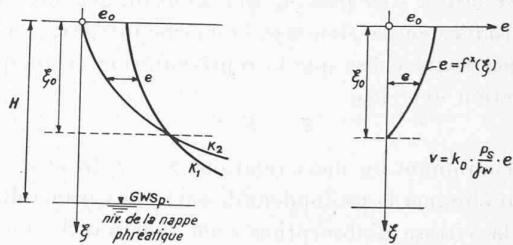


Fig. 31 (a et b). — Valeur de $e = K_1 - K_2$ en fonction de la profondeur de gel, pour $\xi_0 < H$.

$\xi_0 > H$.

Pour $\xi_0 > H$ la fonction $f_2(\xi) = \frac{\xi}{\xi_0(H - \xi)}$ est toujours plus petite que $f_1(\xi) = \frac{1}{H - \xi}$ quelle que soit la valeur de ξ . ξ peut au maximum devenir égal à H , et les

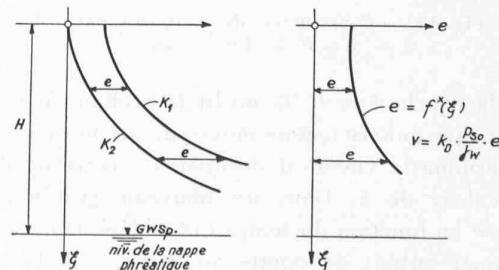


Fig. 32. — Valeur de $e = K_1 - K_2$ en fonction de la profondeur de gel pour $\xi_0 > H$.

deux fonctions tendent alors vers des valeurs infinies. Les deux courbes ne se coupent pas (fig. 32). La vitesse commence par diminuer avec la profondeur, atteint un minimum, puis croît de nouveau. Au moment où la zone de gel atteint la nappe phréatique, la vitesse croît théoriquement au-delà de toute limite.

La profondeur du niveau de la nappe phréatique a donc une influence déterminante sur la relation entre l'absorption d'eau et la profondeur de la zone de gel. Suivant que la nappe est au-dessous ou au-dessus de la profondeur critique ξ_0 à laquelle la pression dépasse la force d'aspiration, le gonflement sera limité ou non.

2. Gonflement.

D'après le chapitre IV, l'équation différentielle (20.b) de la pénétration du gel dans le sol est la suivante :

$$\xi' = \frac{A}{\xi} - B\nu - \frac{C}{\sqrt{t}}$$

où A , B et C sont des constantes, dépendant de la chaleur spécifique c , de la conductibilité thermique λ , du poids spécifique du terrain γ_e , de la porosité n , de la chaleur de fusion de la glace σ et des températures δ_I et δ_{II} avant et après le gel. On peut les déterminer ou les évaluer dans chaque cas particulier.

La fonction $\nu = f(\xi)$ étant aussi connue, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, nous avons toutes les données nécessaires pour résoudre l'équation différentielle et calculer par là la hauteur du gonflement. Le problème présente cependant de sérieuses difficultés.

L'équation différentielle de la pénétration du gel est de premier ordre. Elle possède une solution générale, qu'on peut trouver en construisant la courbe intégrale, laquelle n'est pas autre chose que la représentation graphique de la fonction cherchée

$$\xi = F(t).$$

En combinant les deux relations $\xi = F(t)$ et $\nu = f(\xi)$ on peut éliminer la profondeur de gel ξ et exprimer directement la vitesse d'absorption ν en fonction du temps t . La manière la plus simple de le faire est pratiquement la suivante (fig. 33) :

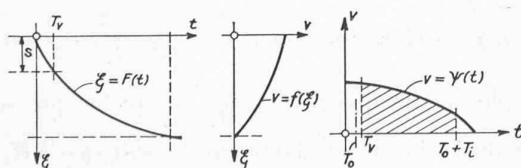


Fig. 33. — Construction de $\nu = \psi(t)$ à partir de $\xi = F(t)$ et $\nu = f(\xi)$.

Sur la courbe $\xi = F(t)$, on lit la profondeur de gel ξ à une époque donnée t , et au moyen de la courbe $\nu = f(\xi)$, on détermine la vitesse d'absorption ν correspondant à cette valeur de ξ . Dans un nouveau graphique, on reporte ν en fonction du temps t considéré. On peut ainsi déterminer autant de points qu'on veut de la courbe $\nu = \psi(t)$.

En pratique, l'absorption ne commence qu'au moment

où la zone de gel atteint la profondeur s au-dessous de l'empierrement ce qui se produit après un temps T_s . Ce temps se calcule comme suit, d'après les équations (8) et (4a) du chapitre IV :

$$x = \sqrt{12 \cdot a \cdot t}$$

$$t = \frac{x^2}{12 \cdot a} = \frac{\xi^2}{12 \cdot \mu^2 \cdot a}.$$

Si l'épaisseur de l'empierrement est s et son coefficient de transmission des températures a_s , dans lequel l'influence du genre de revêtement est implicitement contenue, le temps cherché est donné par

$$T_s = \frac{s^2}{12 \cdot \mu^2 \cdot a_s} \quad (4)$$

De la courbe $\xi = F(t)$ on peut tirer le temps virtuel T_v auquel le phénomène d'aspiration commence. C'est le moment où la limite de la zone de gel atteint la profondeur s au-dessous de la chaussée, c'est-à-dire

$$\xi_{T_v} = s.$$

L'instant T qui marque le début réel de la période de gel résulte de la relation

$$T_o = T_v - T_s. \quad (5)$$

La durée de la période de gel ne doit donc pas être comptée à partir de l'origine du système de coordonnées, mais à partir du point correspondant au temps T_o .

L'absorption globale depuis le début du gel jusqu'au temps T_i peut se déduire de la courbe $\nu = \psi(t)$, par intégration entre les limites T_v et $T_o + T_i$:

$$Q = \int_{T_v}^{T_o + T_i} \nu \cdot dt. \quad (6)$$

L'intégrale correspond à la surface hachurée de la fig. 33. Cette quantité d'eau qui s'écoule par unité de surface à travers la limite de la zone de gel s'accumule sous forme de lentilles de glace et provoque le gonflement h_v de la route. Par suite du foisonnement de l'eau au moment de sa congélation, ce gonflement est de 9 % supérieur à la quantité d'eau Q déterminée ci-dessus.

$$h_v = 1,09 \cdot Q^1.$$

Si l'on considère encore la dilatation de l'eau des pores, on a au total

$$h_{tot} = 1,09 \cdot \int_{T_v}^{T_o + T_i} \nu \cdot dt + 0,09 \cdot n \cdot [\xi_{max} - s]. \quad (7)$$

La courbe du gonflement en fonction du temps s'obtient par combinaison de la courbe intégrale de $\nu = \psi(t)$ et de la courbe donnant la profondeur du gel.

Si le gonflement devient très important, la méthode de calcul indiquée plus haut perd de sa précision, car la distance de la nappe phréatique à la surface de la route augmente de la même quantité que le gonflement lui-même. Le calcul ne tient pas compte de ce fait.

¹ 1 cm³ d'eau donne plus exactement 1,0908 cm³ de glace.

C. Exemples.

Il s'agit d'examiner si des mesures de protection contre le gel sont nécessaires dans la construction d'une route avec revêtement asphaltique, à 800 m d'altitude. L'épaisseur de l'empierrement est de 30 cm et la durée probable du revêtement admise à vingt ans. Les essais géotechniques ont donné les résultats suivants :

Perméabilité $k_D = 1 \times 10^{-3} \text{ cm/min} = 6 \times 10^{-2} \text{ cm/h}$

Force d'aspiration $\frac{P_s}{\gamma_w} = 10 \text{ cm}$ (fig. 8)

Porosité $n = 30 \%$

Poids spécifique $\gamma_e = 1,90 \text{ gr/cm}^3$

Profondeur critique $\xi_0 = \frac{2,9 \text{ t/m}^2}{1,9 \text{ t/m}^3} = 1,5 \text{ m. (fig. 5 b.)}$

Les constantes thermiques peuvent être évaluées comme suit :

Capacité calorifique avant le gel $C_1 = 0,62 \text{ cal/cm}^3$
après le gel $C_2 = 0,52 \text{ cal/cm}^3$

Conductibilité thermique avant le gel $\lambda_1 = 8,8 \text{ cal/cm h}^{\circ}\text{C}$
après le gel $\lambda_2 = 8,8 \text{ cal/cm h}^{\circ}\text{C}$

Transmission des températures

avant le gel $a_1 = \frac{\lambda_1}{C_1} = 14,2 \text{ cm}^2/\text{h}$

après le gel $a_2 = \frac{\lambda_2}{C_2} = 17 \text{ cm}^2/\text{h}$

D'après les indications données au chapitre III, les conditions climatologiques sont admises comme suit : Durée de la période de froid à considérer

$T_i = 45 \text{ jours.}$

Intensité du froid pendant cette période

$\theta_T = -6,5 \pm 2,5^{\circ} \quad \theta_T = -9^{\circ}\text{C}$

Rapport entre la température superficielle et celle de l'air

$\eta = 0,65$

Température superficielle : $\delta_I = 0,65 \cdot (-9^{\circ}) = -6^{\circ}$, température du sol avant le gel : $\delta_{II} = +5^{\circ}$.

Calcul des constantes de l'équation différentielle, de la pénétration du gel (éq. 4, 20 et 20 b, chapitre IV)

$$v = \sqrt{\frac{\delta_{II}}{\delta_{II} - \delta_I}} = \sqrt{\frac{5}{5 - (-6)}} = \sqrt{\frac{5}{11}} = 0,68$$

$$\mu = 1 - v = 0,32$$

$$A = \frac{2 \cdot 8,8 \cdot 0,32 \cdot 11}{0,62 \cdot \frac{0,32 \cdot 5 - 11}{3 \cdot 0,32} - 0,52 \cdot \frac{5}{3} + 0,3 \cdot 80} = \frac{62}{17} = 3,65$$

$$B = \frac{80}{17} = 4,7$$

avec $m = 0,2$ on trouve (voir page 58)

$$C = \frac{8,8 \cdot 5}{\sqrt{3 \cdot 17 \cdot 0,8 \cdot 17}} = 0,40$$

$$\xi' = \frac{3,65}{\xi} - 4,7 \cdot v - \frac{0,40}{\sqrt{t}}.$$

1. Profondeur de la nappe phréatique : $H = 2,5 \text{ m.}$

La détermination de v se fait graphiquement. Il faut remarquer à ce propos que la construction suivante donne

une valeur de e 100 fois trop grande, puisqu'elle est fondée sur les mètres au lieu des centimètres (fig. 34).

D'après l'équation (3) on a :

$$v = \frac{k_D \cdot P_{s_0}}{\gamma_w} \cdot e = \frac{6 \cdot 10^{-2} \cdot 10 \cdot e}{1 \times 100} = \frac{6}{1000} \cdot e \text{ cm/h}$$

$$4,7 \cdot v = 0,0282 \cdot e \text{ cm/h}$$

$$\xi' = \frac{3,65}{\xi} - 0,0282 \cdot e - \frac{0,40}{\sqrt{t}}.$$

Equation différentielle de la pénétration du gel : la valeur de e se déduit de la figure 34a.

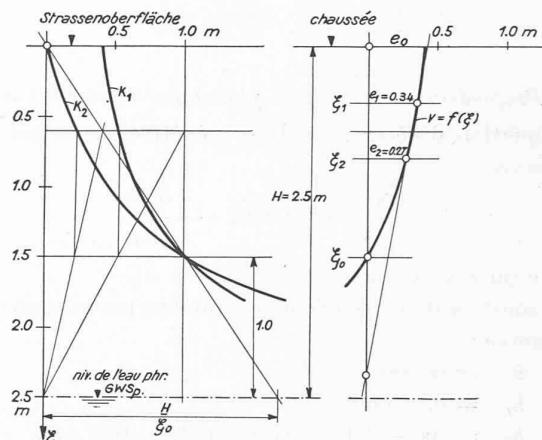


Fig. 34 a. — Calcul théorique du gonflement. Exemple n° 1, $\xi_0 < H$; profondeur critique plus faible que celle de la nappe phréatique.

a) Construction de la courbe e .

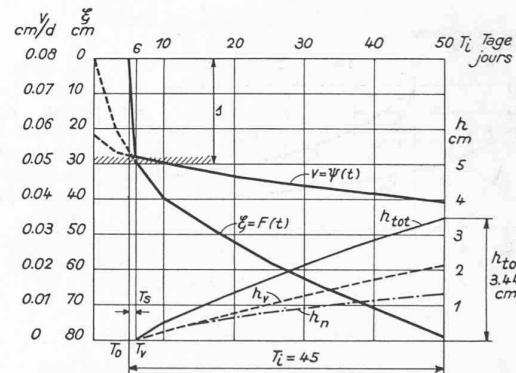


Fig. 34 b. — Calcul théorique du gonflement. Exemple n° 1, $\xi_0 < H$; profondeur critique plus faible que celle de la nappe phréatique.

b) Absorption d'eau, pénétration du gel et gonflement, en fonction du temps.

La résolution de l'équation par éléments finis conduit à la courbe $\xi = F(t)$ de la figure 34b où l'on a également reporté la courbe $v = \Psi(t)$ et la courbe de gonflement.

Nous tirons du graphique le temps virtuel qui s'écoule jusqu'à ce que la zone de gel atteigne la profondeur de 30 cm :

$$T_v = 6 \text{ jours.}$$

Selon équation (4) le temps au bout duquel le gel atteint la profondeur de l'empierrement se calcule comme suit :

$$T_s = \frac{s^2}{12 \cdot a_s \cdot \mu^2} = \frac{30^2}{12 \cdot 30 \cdot 0,32^2} = 24,4 \text{ heures.}$$

$$T_s = 1 \text{ jour}$$

et on obtient avec l'équation (5)

$$T = T_i + T_v - T_s$$

$$T_{total} = 45 + 6 - 1 = 50 \text{ jours.}$$

La figure 34b donne pour la profondeur de gel et le gonflement au bout de 50 jours :

$$\xi = 79 \text{ cm.}$$

$$h_v = 2,12 \text{ cm.}$$

$$h_n = (79 - 30) \times 0,30 \times 0,09 = 1,32 \text{ cm.}$$

$$h_{tot} = h_v + h_n = 2,12 + 1,32 = 3,44 \text{ cm.}$$

Le degré de gélivité d'après Dücke prend ainsi la valeur

$$F = \frac{h}{\xi} = \frac{3,44}{79} \cdot 100 = 4,35 \text{ %.}$$

2. Profondeur de la nappe phréatique $H = 1,00 \text{ m}$.

L'équation différentielle de la pénétration du gel est de nouveau

$$\xi' = \frac{3,65}{\xi} - 0,0282 e - \frac{0,40}{\sqrt{t}}$$

mais v ou e y suit une autre loi.

La solution de ce problème est donnée par la figure 35. On trouve :

$$\xi = 60 \text{ cm.}$$

$$h_v = 9,31 \text{ cm.}$$

$$h_n = (60 - 30) \times 0,30 \times 0,09 = 0,81 \text{ cm.}$$

$$h_{tot} = h_v + h_n = 9,31 + 0,81 = 10,12 \text{ cm.}$$

$$F = \frac{h}{\xi} = \frac{10,12}{60} \times 100 = 16,9 \text{ %.}$$

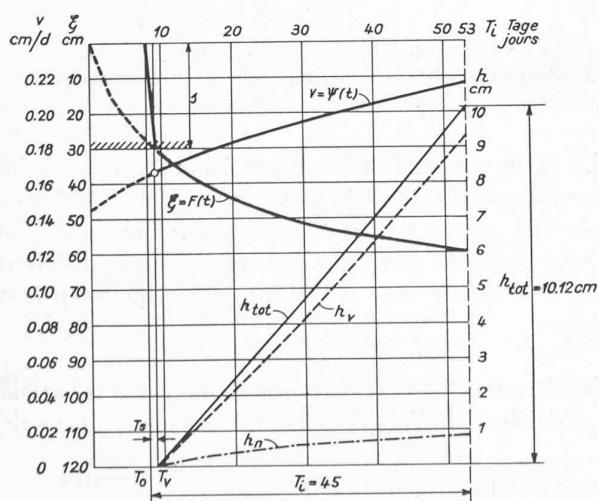
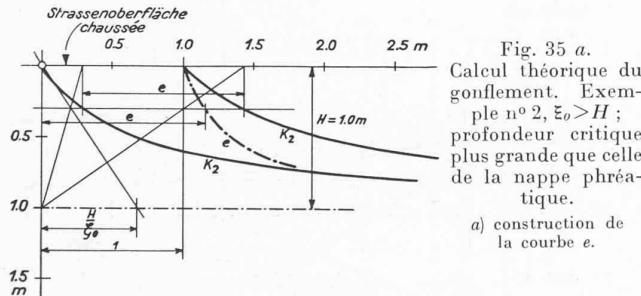


Fig. 35 b. — Calcul théorique du gonflement. Exemple n° 2, $\xi_0 > H$; profondeur critique plus grande que celle de la nappe phréatique. b) Absorption d'eau, pénétration du gel et gonflement, en fonction du temps.

La comparaison des résultats des deux exemples montre très clairement comment une nappe phréatique peu profonde favorise le gonflement mais ralentit la pénétration du froid.

Toutes conditions géophysiques et thermiques étant égales par ailleurs, le gel pénètre en 45 jours à 79 cm de profondeur dans les cas d'une nappe profonde, et à 60 cm seulement dans le cas d'une nappe peu profonde. Les gonflements correspondants sont respectivement de 3,44 cm et 10,12 cm.

Les valeurs trouvées sont tout à fait de l'ordre de grandeur des gonflements observés dans la nature, et constituent ainsi une confirmation indirecte de l'existence de la force d'aspiration définie au chapitre II.

Dans l'établissement du projet, il faut juger quels sont les gonflements qu'on peut encore admettre. Cette question ne comporte pas de réponse générale, car elle dépend souvent des irrégularités plus ou moins fortes que présentent les profils en long et en travers; d'autre part, la nature du revêtement joue aussi un rôle. Des gonflements de 5 cm appellent déjà la prudence.

Pour ce qui concerne les mesures de protection à prendre, nous renvoyons à la littérature spécialisée en la matière (par exemple « Mécanique des terres et procédés modernes de constructions de routes », série de publications des auteurs Colbjörn, Heje, G. Beskow et L. Casagrande, parue dans « Strasse » n° 3). Les mesures les plus importantes sont notamment :

a) Empêcher l'ascension de l'eau, soit au moyen d'un drainage, soit au moyen d'une couche isolante. L'isolation peut être obtenue par une couche interrompant l'ascension capillaire ou par une diaphragme imperméable (toile bitumée, par exemple).

b) Empêcher ou ralentir la pénétration du gel par l'interposition d'une couche d'isolant thermique, tourbe ou brindilles de bois, par exemple. Une couche de ce genre interrompt en même temps l'ascension capillaire.

c) Excaver le terrain gélif et le remplacer par des matériaux non gélifs.

Il serait suffisant pour de nombreuses applications pratiques de calculer approximativement le gonflement au moyen de la force d'aspiration et de la perméabilité; il faudrait alors évaluer la profondeur de gel et admettre une durée de froid sur la base des données climatologiques. Ce procédé simplifié est en principe l'expression du critère de gélivité de Freiberg, avec la différence toutefois qu'il faut faire intervenir dans le calcul la force d'aspiration comme cause de l'absorption d'eau, et non plus la force de capillarité, exprimée par la hauteur d'ascension capillaire.

CHAPITRE VI.

Essais sur le terrain.

A. Mesures effectuées sur une route.

Pour contrôler et compléter notre étude théorique, nous avons également effectué des observations pratiques sur le terrain, dans le cadre du présent travail.

Elles portaient sur un profil de route près d'Ebikon, sur la route cantonale Lucerne-Zurich, à 5 km environ de Lucerne, et comprenaient en particulier :

la mesure de la température de l'air,
la mesure de la température superficielle,
la mesure de la température du sol,
la mesure de la température de la nappe phréatique,
la mesure du niveau de la nappe phréatique,
la mesure des mouvements de la surface de la route par
nivelingement de deux profils distants de 50 m
et les essais géotechniques (fig. 36).

En 1934 déjà, des observations avaient été faites au même endroit par le Dr Bendel, en collaboration avec le Département des Travaux publics du canton de Lucerne. Il était intéressant de reprendre ces observations et de les poursuivre, et c'est pourquoi nous avons conservé l'ancien emplacement des stations de mesure (5).

1. Exécution des mesures.

L'observation régulière des températures a été reprise au printemps 1939. Pour avoir une vue d'ensemble de la variation annuelle des températures du sol et pouvoir ainsi calculer les constantes thermiques, nous avons aussi fait des mesures pendant l'été. Les observations avaient lieu à intervalles d'un à trois jours, et presque toujours entre 13 et 14 heures. L'éloignement de la station (5 km environ de Lucerne) ne permettait pas de faire plus d'une mesure par jour.

a) Mesure de la température de l'air.

Pour mesurer la température de l'air à 1 m environ au-dessus du bord de la route, nous avons fait usage d'un thermomètre à mercure, dont la division en $\frac{1}{2}$ degrés C permettait d'évaluer le $\frac{1}{5}$ de degré. Pour éliminer l'influence du rayonnement, le thermomètre, attaché à une ficelle était balancé suivant des cercles verticaux.

Une seule mesure de la température de l'air au milieu de la journée ne suffit pas à donner une image correcte de l'allure des températures ; des mesures plus fréquentes n'étant pas possibles, comme il a été dit plus haut, les observations faites ont été confrontées avec celles de la station météorologique de Lucerne (Wesemlin), distante de 3,9 km seulement.

b) *Mesure de la température superficielle.*

Pour mesurer la température superficielle du revêtement asphaltique, nous avons utilisé un thermomètre à mercure avec réservoir en spirale, horizontal. Il était constamment protégé des rayons du soleil par un récipient de tôle polie.

c) *Mesure de la température du sol.*

La température du sol était mesurée à 44 cm, 65 cm, 95 cm et 1,19 m de profondeur. Le point supérieur était situé immédiatement sous l'empierrement. Nous avons fait usage de thermomètres à résistance de platine de la maison Trüb Täuber, à Zurich. L'élément actif de platine, de 25 cm de long, est protégé par un fourreau en cuivre, fermé par une tête en fonte d'aluminium. Les câbles sous plomb étanches, pénètrent dans cette tête. Pour empêcher toute pénétration de l'eau dans le fourreau de cuivre, la tête est garnie à chaud de mastic bitumineux. Pour les essais, les câbles sous plomb étaient reliés à un coffret de jonction au niveau du sol, coffret sur lequel pouvait être également branché un pont de Wheatstone. A chaque thermomètre correspondaient dans le coffret deux contacts de jonction (fig. 37, 38 et 39).

L'étalonnage a donné la relation suivante entre la résistance ohmique mesurée au potentiomètre, et la température :

| | | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ω | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 |
| δ^0 | -5,97 | -3,23 | -0,48 | 2,28 | 5,02 | 7,76 | 10,51 |
| Ω | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | |
| δ^0 | 13,25 | 15,96 | 18,73 | 21,49 | 24,23 | 26,97 | |

L'erreur moyenne d'une observation a été déterminée à $\frac{1}{3}$ de degré C pour une série, et à $\frac{1}{5}$ de degré pour l'autre.

d) Mesure du niveau et de la température de la nappe phréatique.

Pour l'observation de la nappe phréatique, nous avions foncé dans le sol, tout près du bord de la route, un tube de 2" de diamètre et 3 m de long, percé latéralement de nombreux trous. Il était fermé par un bouchon de bois.

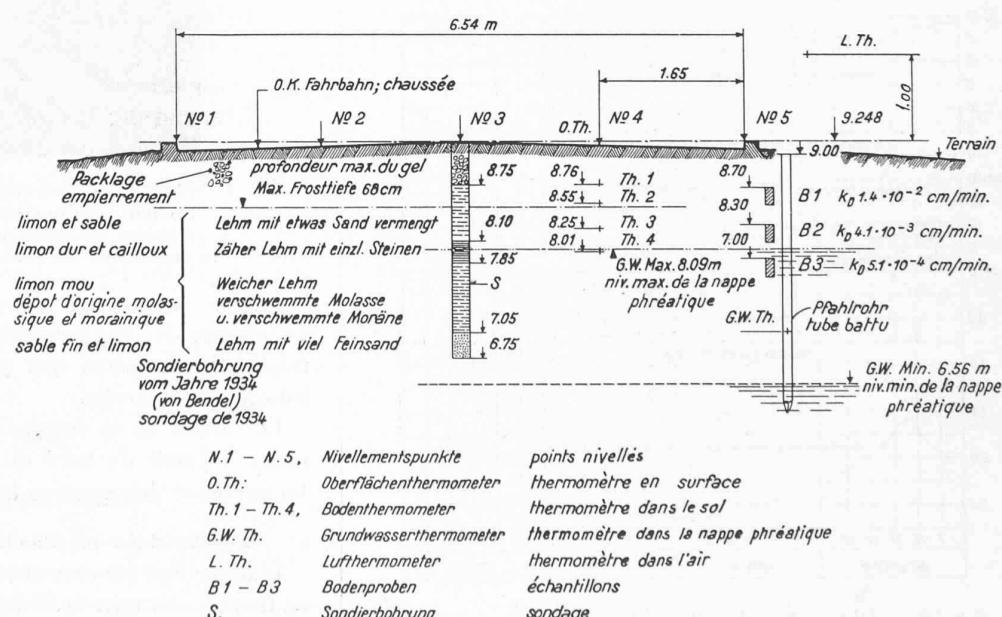


Fig. 36. — Observation des effets du gel à Ebikon (cant. de Lucerne). Section transversale de la route.

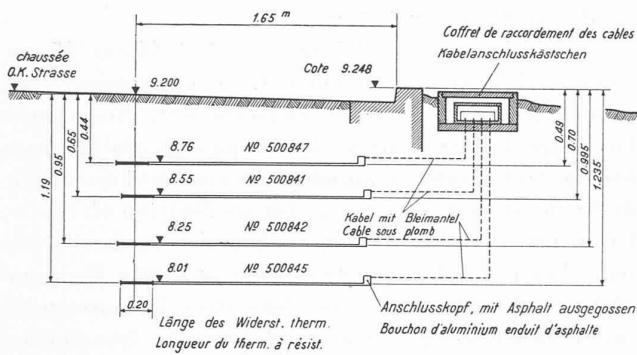


Fig. 37. — Observation des effets du gel à Ebikon. Installation des thermomètres électriques à résistance. Disposition des prises de température.

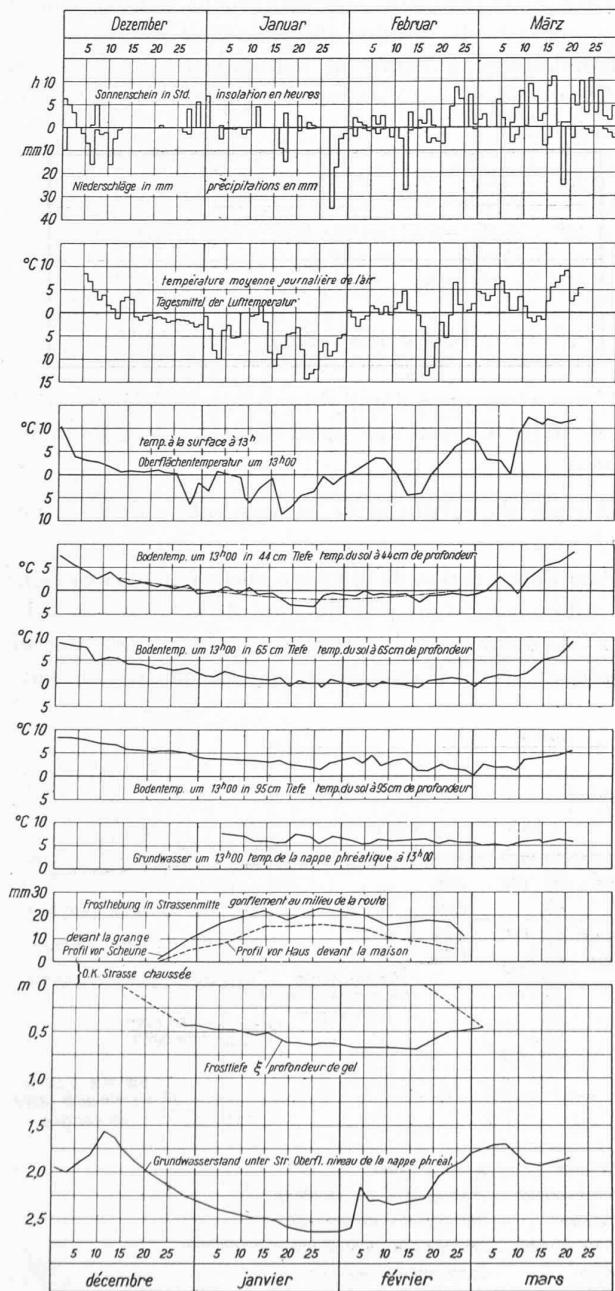


Fig. 40. — Observation des effets du gel à Ebikon. Résultats des observations de l'hiver 1939-40.

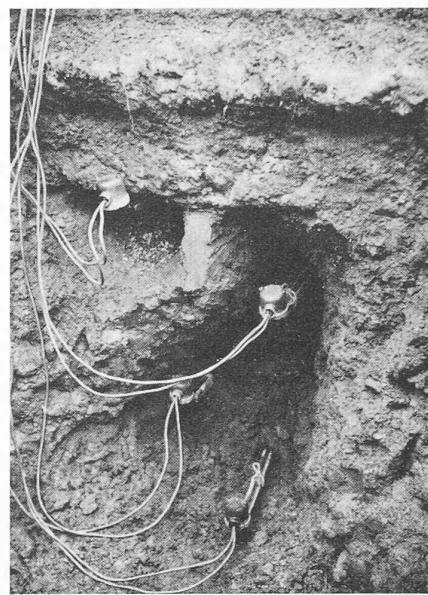


Fig. 38. — Observation des effets du gel à Ebikon. Disposition des thermomètres à résistance, avant le remblayage de la fouille.

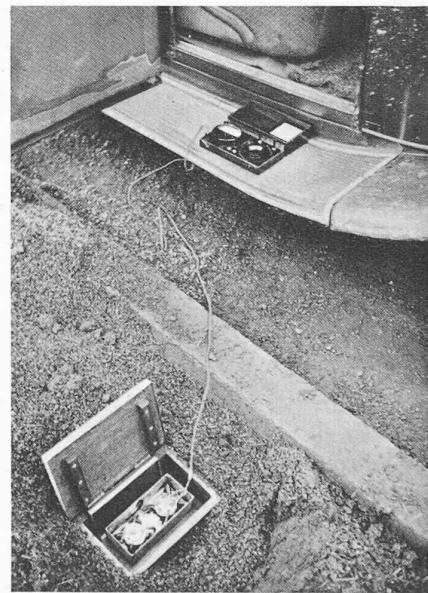


Fig. 39. — Observation des effets du gel à Ebikon. Mesure électrique des températures à quatre profondeurs différentes. Coffret de raccordement des câbles et pont de Wheatstone.

La mesure des températures de l'eau s'effectuait avec le même thermomètre que pour l'air, descendu dans le tube par une ficelle.

Le niveau de la nappe était mesuré au moyen d'un mètre à partir du bord du tuyau préalablement nivelé. La précision des mesures était de $\pm \frac{1}{2}$ cm.

e) Nivellement des profils en travers et d'un profil en long.

L'allure des mouvements superficiels des deux profils en travers, distants de 50 m environ était déterminée par des nivelllements effectués à intervalles de 5 à 10 jours.

Tableau N° 7. — Moyennes mensuelles des températures de l'air et du sol.

| Lucerne et Ebikon | Janv. | Févr. | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil. | Août | Sept. | Oct. | Nov. | Déc. | Année |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Température de l'air | | | | | | | | | | | | | |
| Moyenne de nombreuses années | -1,3 | +0,6 | +3,8 | 8,5 | 12,7 | 16,4 | 18,2 | 17,2 | 13,9 | 8,5 | 3,7 | -0,2 | 8,5 |
| Moyenne 1891-1900 | -1,3 | +0,7 | +3,7 | 8,6 | 12,7 | 16,4 | 18,3 | 17,1 | 14,1 | 8,4 | 3,7 | -0,4 | 8,5 |
| Moyenne 1939-1940 ¹ | -5,22 | +0,29 | +3,95 | 10,44 | 9,93 | 16,69 | 17,26 | 17,84 | 13,47 | 8,17 | 6,38 | -0,45 | 8,25 |
| Température du sol | | | | | | | | | | | | | |
| 44 cm ¹ | -1,04 | -0,89 | +3,60 | 11,60 | 11,34 | 19,98 | 21,39 | 21,96 | 18,18 | 11,20 | 7,66 | +2,51 | 10,62 |
| 65 " " " " " | +4,20 | +0,22 | +3,69 | 11,16 | 11,10 | 18,38 | 20,82 | 21,38 | 18,68 | 12,54 | 8,90 | +4,96 | 11,08 |
| 95 " " " " " | +3,06 | +2,47 | +3,52 | 9,36 | 10,48 | 15,44 | 19,14 | 19,73 | 18,47 | 13,79 | 10,07 | +6,42 | 10,99 |

¹ Les mesures s'étendent sur la période de mars 1939 à mars 1940.

Les points nivelés étaient pour chaque profil, les bords, les quarts et le milieu. La précision était d'un mm.

D'autre part, nous avons également nivelé deux fois un profil en long de 120 m la première fois le 27 février 1940, et la seconde fois le 19 avril 1940, quand la surface s'était affaissée à nouveau. La distance des points nivelés était d'un mètre.

f) Prélèvement d'échantillons.

Pour déterminer les propriétés géotechniques du sous-sol, nous avons prélevé à deux endroits des échantillons du terrain non remanié. L'un des prélèvements se fit exactement au-dessous de la station de mesure des températures, au bord de la route (échantillons n°s 1 à 3) et l'autre sur le bord d'un gonflement révélé par le nivellement du profil en long (échantillons n°s 4, 5 et 7).

2. Résultats des mesures.

La figure 40 donne les résultats des mesures en fonction du temps pour la période hivernale de décembre 1939 à mars 1940.

Les mesures des températures superficielles, effectuées une fois par jour seulement, sont naturellement très affectées par les variations journalières. Suivant l'éclat du soleil, les valeurs mesurées en plein été peuvent dépasser de 20° la moyenne journalière.

Dans la mesure des températures du sol, l'influence des variations journalières n'est déjà plus très sensible à 45 cm de profondeur. Au milieu de la journée (13 h.30) la température est encore inférieure à la moyenne journalière. L'amplitude des variations journalières n'y est plus que de 3° à peine en été, les jours ensoleillés, et au maximum de 0,5° en hiver. A 65 cm de profondeur, on peut négliger l'effet des variations journalières.

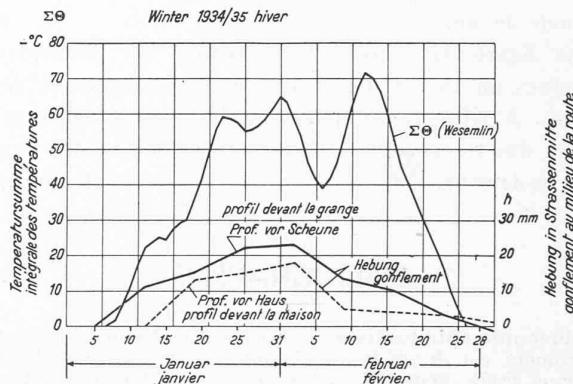


Fig. 41 a. — Observation des effets du gel à Ebikon. Gonflements et courbes intégrales des températures. — a) Hiver 1934-35.

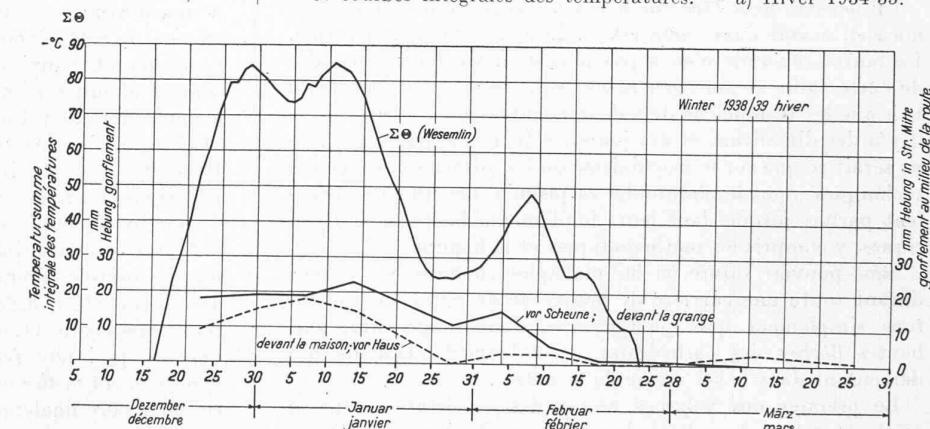


Fig. 41 b. — Observation des effets du gel à Ebikon. Gonflements et courbes intégrales des températures. — b) Hiver 1938-39.

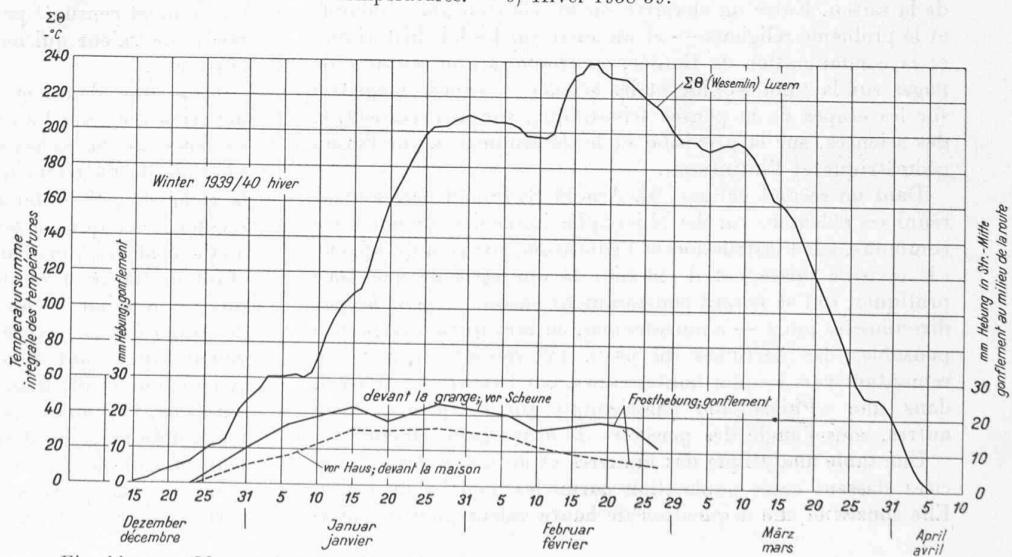


Fig. 41 c. — Observation des effets du gel à Ebikon. Gonflements et courbes intégrales des températures. — c) Hiver 1939-40.

Par suite des fortes précipitations du mois de mai 1939, la nappe phréatique est montée au-dessus du thermomètre inférieur, qui depuis lors indique des valeurs manifestement trop basses. C'est pourquoi, les résultats indiqués par ce thermomètre n° 4 ont été éliminés de la discussion.

La température de la nappe phréatique n'a pas accusé de grosses fluctuations au cours de l'hiver ; elle a oscillé entre 8° et 5°.

La variation dans le temps des gonflements observés au milieu de la route est aussi reportée graphiquement pour les deux profils. Leurs valeurs maxima ont atteint 16 et 23 mm respectivement et ceci avant la fin de la période de gel.

La figure 41 montre la variation des gonflements observés au milieu des deux profils, au cours de trois hivers. A titre de comparaison, les trois courbes intégrales des températures correspondantes ont été reportées également.

(A suivre.)

BIBLIOGRAPHIE

Philosophie spiritualiste. — Etudes et méditations, recherches critiques, par Arnold Reymond, professeur à l'Université de Lausanne. Deux volumes de 429 et 448 pages. — Librairie F. Rouge, Lausanne, 1942. Broché Fr. 15.—

On pensera peut-être que le compte rendu d'un tel ouvrage n'a rien à voir dans cette revue. Lecteurs, ne craignez rien. La Suisse romande n'en a pas plus d'un ou deux à signaler de cette taille en une génération et il serait peut-être assez bon que les techniciens de valeur méditassent à l'occasion — il y a des dimanches et des jours fériés, même pour eux... — ne serait-ce que sur le machinisme ou les miracles des sciences techniques (dont le philosophe va jusqu'à dire qu'elles ébranlent parfois jusque dans leurs fondements les sciences théoriques, y compris les mathématiques et la logique).

Sans pouvoir suivre ici les multiples chemins de l'auteur durant toute une carrière de pensée et de réflexion, constatons simplement que quelques-unes font songer aux plus hautes flèches des cathédrales, et à leurs fondements qui demeurent dans le sol même de la patrie.

Le premier des volumes réunit des dissertations sur la méthode même dans la recherche métaphysique, sur l'activité rationnelle de juger et en particulier sur l'activité logique de la raison. Entre un chapitre sur la réflexion philosophique et le problème religieux — et un autre sur les lois historiques et la condamnation de Galilée, on trouvera une centaine de pages sur la « philosophie et les sciences », exposé magistral sur les étapes de la pensée scientifique, sur la classification des sciences, sur la prévision et le déterminisme, sur l'infini géométrique et l'intuition...

Dans un second volume, M. Arnold Reymond paraît avoir réuni ses réflexions sur des objets plus immédiats de notre vie commune, sur l'instruction et l'éducation, sur ce qu'il appelle « le civisme suisse » et il examine là une série de questions pratiques, qui se posent constamment encore — pour ne pas dire tous les jours — à nous-mêmes, en tant que citoyens responsables des destinées du pays. Le volume s'achève en remontant vers les plus hautes cimes, par Descartes et Pascal, dans une « Philosophie chrétienne » qui s'exprime, entre autres, sous l'angle des penseurs de notre pays romand.

Une table analytique des matières et un index des auteurs cités classent cette publication parmi les modèles du genre. Elle constitue une acquisition de haute valeur pour le patri-

moine intellectuel du pays et fait le plusgrand honneur, non seulement à son auteur dans sa retraite forcée, mais aussi à l'esprit de collaboration qui anime la Faculté des Lettres de l'Université de Lausanne.

J. C.

Vers une Economie politique morale, par Gaston Boivin et Maurice Bouvier-Ajam, professeurs à l'Institut d'études corporatives et sociales. Une brochure de 112 pages. 2^e éd. remaniée. Recueil Sirey, Paris 1942.

Les adeptes du *corporatisme*, en France d'abord « non occupée », ont eu l'idée de publier cette introduction à leur doctrine, dans le but de la faire prévaloir dans une France réorganisée sous l'égide du Maréchal Pétain (première manière) ; ils estiment que l'abaissement actuel de la France est dû à « une décadence d'ordre intellectuel avant que d'être d'ordre moral » et qu'il y a lieu de revenir « au bon sens, à l'honnêteté, à l'esprit de labeur, de devoir, de sacrifice » qui sont les vertus traditionnelles du peuple français. C'est en quelque sorte un message adressé à une génération qui, depuis lors, a été appelée à passer plus rudement encore sous le joug.

M. Boivin, en un raccourci suggestif, commence par rappeler les vertus qui, selon lui, étaient celles de la vie économique d'avant la Révolution (de 1789) : les notions du *juste prix* et du *juste salaire*, avec le sens de la famille, du métier, de la cité, notions auxquelles on préférera la *liberté du travail* et la *liberté de la concurrence* qui devaient conduire, en dernière étape, à la tyrannie des grands groupements ou de l'Etat. L'auteur voit, dans ces pseudo-libertés, un état latent d'anarchie indifférente où triomphent les plus forts, les plus riches, les plus habiles, anarchie qui culmine dans le machinisme et aboutit au prolétariat. Les hommes, au travers de cette évolution lente, placent peu à peu au centre l'égoïsme et bannissent la morale ; il ne leur reste plus, comme aboutissement, qu'à se grouper pour emporter finalement la nation tout entière vers des destinées aveugles. « Ce règne des masses », dit l'auteur, « eut son apogée en 1936-1937 » et il cite cette opinion de Maurice Clavière : « L'origine du mal est au fond des âmes, où l'on s'est efforcé d'éteindre les lumières de la vie spirituelle ».

A cette organisation de barbarie savante (pour employer le mot d'Anatole France), le *corporatisme* prétend substituer une organisation différente, dans laquelle dominent les intérêts *communs* de « tous les gens de la même profession » et en vue de quoi une représentation nouvelle sera celle de la *famille* et du *métier* et non plus celle du parti ; l'organisation en soi ayant finalement pour but « non pas l'unique profit, mais le bien commun » ; l'accès de la profession étant « subordonné à une capacité technique... et à une dignité morale reconnue et censurée par les pairs ». Voici bien quelques arguments de valeur qui ne sont pas absents de nos propres discussions...

Dans une deuxième partie, M. Bouvier-Ajam tente de définir à nouveau l'économie politique, non point seulement « science de la richesse » ou « science de l'échange », mais « l'étude de l'activité humaine dans tous ses rapports... avec la richesse ». Il se demande si l'économie est un art ou une science — ce qui, en soi, est assez accessoire — pour aboutir à la considérer, sous l'angle d'un certain *pragmatisme*, comme étant de nature terriblement *empirique* ; l'homme accomplirait « sa mission » selon les lois organiques et les instincts que lui impose « la nature » ; l'économie politique n'aurait de valeur « qu'autant qu'elle reconnaîtra les lois naturelles qui la régissent » ; et, d'un pas, l'auteur conclut que, si elle est naturelle, l'économie politique « est, par définition, morale ». La grande règle du droit naturel sera « le sacrifice de l'individu au groupe ».

Il n'est pas question ici de prendre parti. On a voulu rapporter simplement une tendance, vers laquelle vont certains