

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 69 (1943)  
**Heft:** 5

**Artikel:** Gèlività des sols et fondation des routes  
**Autor:** Ruckli, R.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-52507>

### **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:** 26.01.2026

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

# BULLETIN TECHNIQUE

## DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

## 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<sup>ie</sup>, à Lausanne.

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.

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE

A. STUCKY, ingénieur, président ; M. BRIDEL ; G. EPITAUX, architecte ; M. IMER.

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.

SOMMAIRE : *Géivité des sols et fondation des routes* (suite), par R. RUCKLI, ingénieur à l'Inspectorat fédéral des travaux publics — *Société genevoise des ingénieurs et des architectes : Rapport du président sur l'exercice 1942*. — *Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne : Doctorat ès sciences techniques*. — BIBLIOGRAPHIE. — CARNET DES CONCOURS. — SERVICE DE PLACEMENT.

## Géivité des sols et fondation des routes

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

(Suite.)<sup>1</sup>

### B. Essais de détermination de la force d'aspiration sur des bases purement mécaniques.

#### 1. Description de la méthode.

D'après la théorie développée au chapitre I, ce sont les forces de cohésion dans les pellicules d'eau entourant les particules de terrain et non les cristaux ou les lentilles de glace, qui sont la cause de l'absorption d'eau. On peut alors se demander s'il n'est pas possible de faire agir ces forces de cohésion et d'aspirer de l'eau du sol autrement qu'en provoquant la formation de lentilles de glace.

Il est en réalité possible de produire un effet analogue de la manière suivante. Les lentilles de glace sont remplacées par une autre substance, qui a la propriété d'absorber de l'eau ; pour éviter les effets d'osmose, cette matière ne doit pas être liquide ; mais elle ne doit pas être grenue ni pulvérulente non plus, sinon les effets de capillarité avec formation d'un ménisque libre produiraient un tout autre phénomène que celui que nous cherchons ; elle doit en outre assurer une protection de l'éprouvette absolument imperméable à l'air. Une substance adéquate a été trouvée dans la gélatine versée à l'état chaud, visqueux, en couche d'environ 1 mm d'épaisseur sur l'échan-

tillon de terrain parfaitement humidifié. Sur la gélatine on verse une couche de quelques centimètres de «Blaugel»<sup>1</sup> (gel bleu). C'est une substance absorbant l'eau fournie par la Maison Hobein et Bender de Zurich, en grains de 1 à 5 mm de diamètre. De bleu foncé à l'état sec, elle vire au rose-rouge en absorbant de l'eau.

L'essai consiste à faire absorber par le «Blaugel» l'eau de la gélatine, qui cherche à son tour à la remplacer aux dépens du sol. Comme le montre la figure 9, la gélatine est en contact avec la pellicule d'eau tout comme les lentilles de glace.

Comparativement aux agrégats constituant le sol, on peut considérer la gélatine et les lentilles de glace comme des masses homogènes, bien que la structure moléculaire de la première corresponde à une solution et celle des secondes, à un réseau cristallin. Toutes deux ont la propriété d'absorber de l'eau par la totalité de leur surface inférieure, les cristaux en incorporant cette eau à leur réseau, la gélatine en remplaçant celle que le «Blaugel» lui a soustraite. Toutes deux absorbent l'eau de la pellicule qui entoure les grains de la partie supérieure de l'éprouvette et qui empêche la glace comme la gélatine d'entrer en contact direct avec les particules de terrain. Dans les deux cas, c'est la force de cohésion du film qui tend à remplacer l'eau soustraite de la pellicule par de l'eau aspirée des pores. La différence entre les lentilles de glace et la gélatine semble donc tout intérieure au système et sans influence vis-à-vis de l'extérieur, c'est-à-dire de l'éprouvette de terrain.

<sup>1</sup> Voir Bulletin technique du 20 février 1943. p. 37.

<sup>1</sup> Nous désignerons par la suite, sous ce nom, un gel de silice activée, colorée par un sel de cobalt.

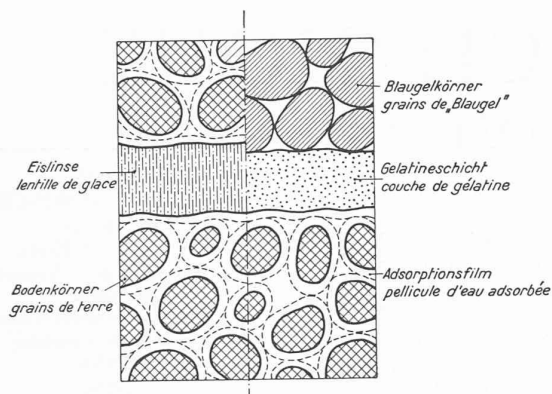


Fig. 9. — Aspiration de l'eau par les lentilles de glace et le «Blaugel».

## 2. Essais.

L'appareil d'essai se compose, en principe, de deux cylindres verticaux communicants fixés sur une même plaque de base. Le plus grand a un diamètre intérieur de 106,5 mm et une hauteur de 250 mm ; il est tiré d'un tube d'acier de 114 × 106,5 et reçoit l'échantillon de terrain. Le plus petit est un tuyau de verre de 21 mm de diamètre et 200 mm de haut. Le conduit de liaison entre les deux cylindres est ménagé dans la plaque de base en aluminium. L'échantillon ou « carotte » repose sur une pierre poreuse, qui n'appuie pas directement sur la base en fonte, mais qui est maintenue par trois points à 10 mm au-dessus du fond. Il reste ainsi un espace intermédiaire de 10 mm dans lequel débouche le conduit de communication (fig. 10).

Pour l'exécution de l'essai, l'échantillon de terrain non remanié, de 95 mm de diamètre et environ 200 mm de hauteur, est introduit dans le cylindre d'acier ; l'espace resté libre entre le cylindre et l'éprouvette est rempli de paraffine. Puis on verse de l'eau jusqu'à un niveau déterminé dans le tube de verre. L'espace au-dessous de la pierre poreuse se remplit aussi d'eau, qui monte de là dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'elle atteigne le niveau correspondant à celui du tube de verre. L'échantillon de terrain est ainsi plongé dans une nappe phréatique dont le niveau, pour autant que la perméabilité soit suffisante, peut être changé à volonté entre les limites imposées par la longueur du tube de verre. Par effet de la capillarité, la partie de l'éprouvette située au-dessus de la nappe se remplit aussi d'eau.

On verse alors sur la face supérieure de l'éprouvette la solution de gélatine chaude, dont la concentration est de 12 cm<sup>3</sup> de gélatine sèche par cm<sup>3</sup> d'eau. Il se forme après refroidissement une couche de 1—2 mm d'épaisseur, qui adhère parfaitement à la surface. Par-dessus la gélatine, on verse le «Blaugel» sur une épaisseur de 3 cm environ.

Cette méthode d'essai permet de choisir arbitrairement trois conditions extérieures :

- la perméabilité  $k_D$ ,
- la hauteur d'aspiration  $l$

et la surcharge extérieure.

Le programme d'essais prévoyait initialement l'étude de l'influence de ces trois facteurs sur la force hypothétique d'aspiration.

La perméabilité dépend en premier lieu de la composition granulométrique du sol. Il fallut donc opérer avec différents échantillons, dont la perméabilité variait de  $k_D = 7,4 \cdot 10^{-2}$  à  $2,7 \cdot 10^{-6}$  cm/min. La figure 11 représente les courbes granulométriques de quelques-uns des échantillons utilisés.

On peut modifier la hauteur d'aspiration en changeant le niveau de la nappe ou la hauteur de l'éprouvette. La plupart des essais ont été faits avec une hauteur constante de l'éprouvette. Mais comme les niveaux de la nappe dans l'éprouvette ne peuvent pas être contrôlés et ne s'ajustent que lentement au niveau du tube de verre si la perméabilité est petite, nous avons fait aussi à titre de comparaison quelques essais avec un niveau de la nappe constant et différentes hauteurs d'éprouvette. Pour augmenter les possibilités de variation, nous avons prolongé le tube d'acier par un deuxième élément, de manière à pouvoir travailler avec des éprouvettes jusqu'à 50 cm de hauteur.

Il est facile avec la méthode du «Blaugel» de faire intervenir une surcharge extérieure. Sur la couche de «Blaugel», on place une plaque circulaire bien ajustée qu'on charge de manière à obtenir la pression désirée. Dans la réalité, si l'on admet une profondeur de gel de 1 m et un poids spécifique apparent du terrain de 2 t/m<sup>3</sup>, cette pression vaut 0,2 kg/cm<sup>2</sup>. Pour augmenter l'étendue des mesures et gagner ainsi une vision plus large du phénomène, nous avons opéré avec des surcharges allant jusqu'à 0,4 kg/cm<sup>2</sup>.

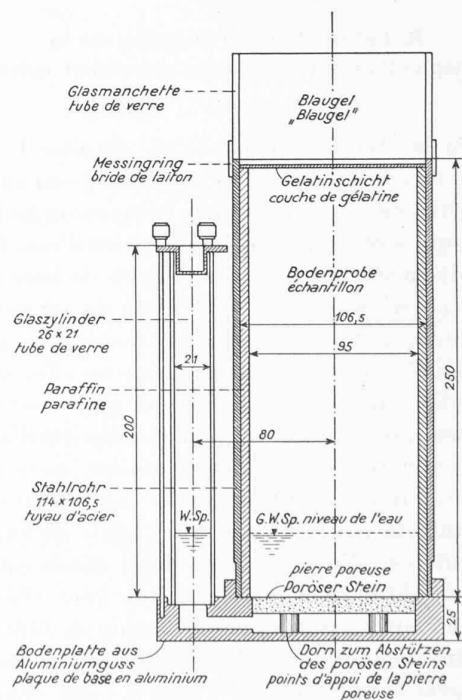


Fig. 10. — Appareil pour la détermination de la force d'aspiration par la méthode du «Blaugel».

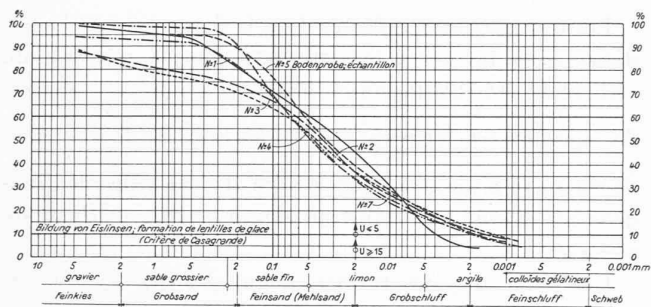


Fig. 11. — Composition granulométrique de quelques terrains examinés. Route cantonale Lucerne-Zurich, tronçon Ebikon-Feldmatt.

Quelques temps après l'introduction du «Blaugel», le niveau dans le tube de verre commence à baisser. Il est cependant possible de maintenir le niveau de la nappe dans d'étroites limites pendant toute la durée de l'essai en remettant constamment de l'eau dans le tube. Si nous désignons par  $F$  le diamètre de l'éprouvette,  $f$  celui du tube de verre, par  $\Delta l$  l'abaissement du niveau et par  $t$  la durée de l'essai, nous avons, pour autant que la durée de l'essai ne soit pas trop longue :

$$v = \frac{\Delta l \cdot f}{t \cdot F}$$

De là, on peut calculer la force d'aspiration au moyen de l'équation (2)

$$\frac{P_s}{\gamma_w} = \frac{\Delta l \cdot l \cdot f}{t \cdot k_D \cdot F} \quad (3)$$

### 3. Résultats d'essais<sup>1</sup>.

Les résultats d'essais (valeurs moyennes) sont résumés à la figure 12.

Pour les valeurs extrêmes supérieures, l'écart entre la moyenne et les observations individuelles atteint 44 % en moyenne et 109 % au maximum. Devant une telle imprécision des mesures, nous avons renoncé à calculer l'erreur moyenne d'une observation d'après les règles de la théorie des erreurs. De telles dispersions ne sont pas exceptionnelles en géotechnique ; elles montrent qu'il est prudent de ne pas se baser sur quelques observations isolées seulement, mais sur les moyennes de nombreux essais. Dans le même ordre d'idées, signalons encore l'imprécision dont souffre la détermination de la capillarité, pour laquelle il faut bien souvent se contenter d'un ordre de grandeur.

#### Discussion des résultats.

##### a) Influence de la perméabilité $k_D$ .

Tous les essais ont montré que la force hypothétique d'aspiration dépend en premier lieu de la perméabilité. La relation entre ces grandeurs trouvée par les essais de

gel d'auteurs étrangers et reproduite dans la figure 8, semble ainsi confirmée. Si l'on choisit des coordonnées logarithmiques, les résultats trouvés avec le «Blaugel» s'inscrivent aussi approximativement sur une droite mais ils sont en général plus petits que ceux des essais de gel mentionnés plus haut.

##### b) Influence de la hauteur d'aspiration $l$ .

Si la force hypothétique d'aspiration était véritablement une constante du terrain, elle devrait être naturellement indépendante de la hauteur d'aspiration. On constate que ce n'est en réalité pas le cas ; la force d'aspiration diminue pour les petites hauteurs d'aspiration. On pourrait l'expliquer en disant que dans ce cas le système gélatine-«Blaugel» possède un pouvoir absorbant inférieur à celui des forces de cohésion du sol. Devant ce fait d'observation important, la question de principe se pose manifestement de savoir si la méthode du «Blaugel» est bien applicable sous la forme indiquée plus haut.

##### c) Influence de la surcharge extérieure.

Les quelques essais effectués avec une surcharge extérieure montrent qu'elle exerce une certaine influence sur la force d'aspiration. Il n'est pas possible de tirer une loi bien définie des résultats obtenus, la dispersion étant trop grande. Quelques essais confirment la relation entre la pression et le gonflement déjà trouvée par Beskow et Taber, disant que le gonflement diminue si la pression extérieure augmente (fig. 5 a et 5 b).

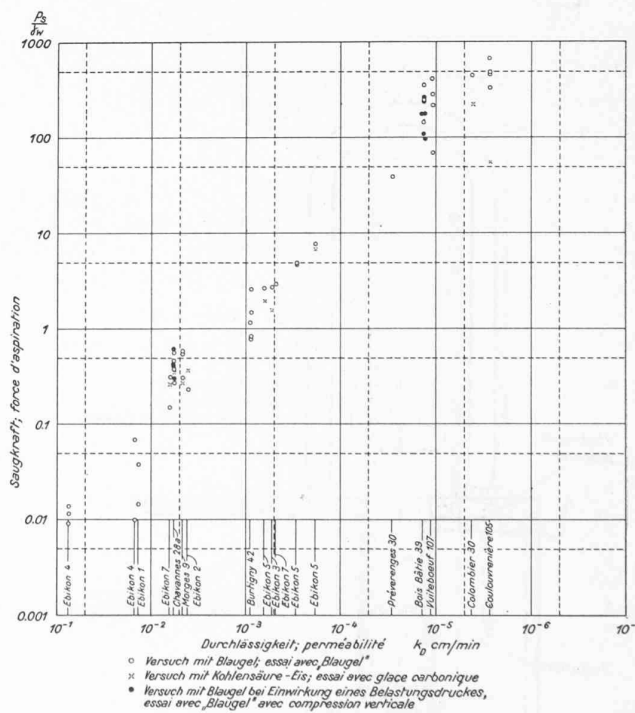


Fig. 12. — Force d'aspiration  $\frac{P_s}{\gamma_w}$  en fonction de la perméabilité  $k_D$ . Résultats des essais de congélation et avec «Blaugel».

$$\frac{P_s}{\gamma_w} \text{ en centimètres.}$$

<sup>1</sup> La plupart de ces essais ont été effectués par MM. Bonjour et Chappuis, ingénieurs, au Laboratoire de géotechnique de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne.

### C. Comparaison entre la méthode du « Blaugel » et les essais de congélation.

#### 1. Description du dispositif d'essai.

La meilleure manière de critiquer les résultats de la méthode du « Blaugel » consiste à les comparer à ceux des essais de congélation. C'est pourquoi nous avons également effectué quelques essais de congélation à titre de contrôle. Etant donné le coût élevé d'une armoire frigorifique semblable à celles que possèdent aujourd'hui plusieurs laboratoires de géotechnique, son acquisition ne put être envisagée en temps voulu ; nous avons donc cherché à nous en tirer avec un appareil meilleur marché, utilisant la glace carbonique comme source de froid, représenté dans la figure 13<sup>1</sup>.

#### 2. Exécution et résultats des essais.

Les essais ont été effectués sur les mêmes échantillons de terrain que pour la méthode du « Blaugel ». Nous avons dû constater à nouveau que des mesures isolées sont trop imprécises pour conduire à des résultats utilisables. C'est pourquoi les essais ont été étendus sur plusieurs jours. La lecture du niveau de l'eau dans le tube avait lieu deux fois par jour. Il ne fut pas possible de maintenir la température constante au-dessus de l'échantillon ; mais on réussit cependant à maintenir ses fluctuations dans des limites admissibles.

<sup>1</sup> L'appareil a été conçu par M. Bonjour, ingénieur au Laboratoire de géotechnique de l'E. I. L., et construit par l'atelier de cet institut.

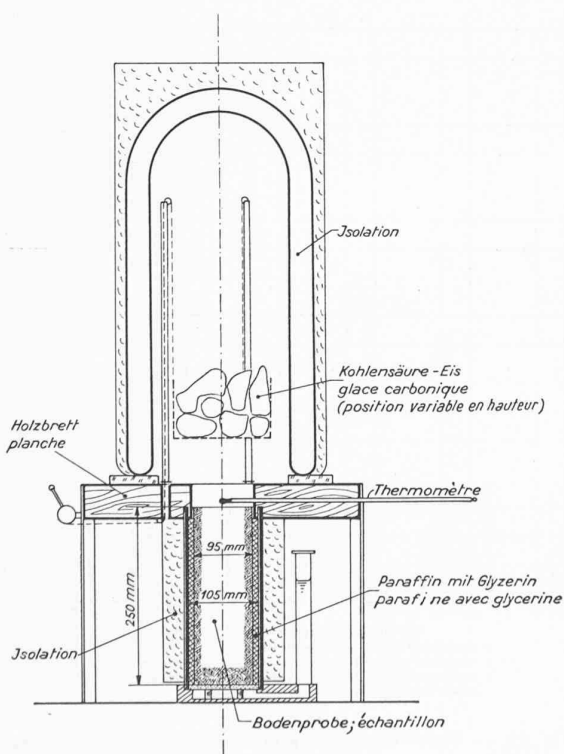


Fig. 13. — Détermination de la force d'aspiration  $\frac{P_s}{\gamma_w}$  par les essais de congélation.

Les résultats sont reportés dans la figure 12. La concordance entre les essais de congélation et la méthode du « Blaugel » est satisfaisante. Reportées dans un système de coordonnées logarithmiques, les valeurs de  $\frac{P_s}{\gamma_w}$  sont de nouveau situées sur une droite et leur ordre de grandeur correspond aux résultats obtenus par la méthode du « Blaugel ».

Une partie des éprouvettes congelées a montré une formation de lentilles de glace très nettement développée (fig. 14).

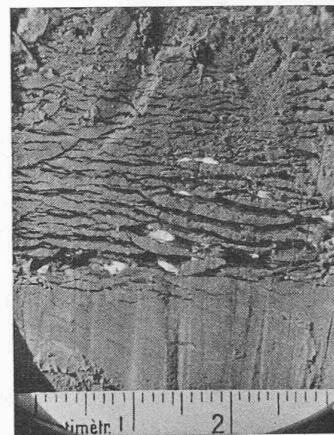


Fig. 14. — Coupe verticale d'un échantillon après l'essai de congélation ; lentilles de glace bien développées.

#### 3. Conclusions.

Les essais effectués jusqu'ici sont trop peu nombreux et leur méthodologie encore trop peu développée pour qu'on puisse porter un jugement définitif sur le principe consistant à remplacer la congélation par un autre procédé pour faire apparaître la force d'aspiration. Le fait que la hauteur d'aspiration influe sur la grandeur de la force d'aspiration parle en défaveur de la méthode.

Mais il vaudrait sûrement la peine de poursuivre les recherches dans la voie déjà tracée, en considérant les essais effectués jusqu'ici comme des travaux préliminaires. Il faudrait dans ce cas commencer par mettre au point de façon plus précise la question de l'influence de la capacité d'absorption d'eau de la gélatine et du « Blaugel ».

L'idée d'utiliser d'autres phénomènes physiques que la formation des cristaux de glace pour déterminer la valeur de la force d'aspiration n'est pas nouvelle puisque Beskow lui-même a fait appel en l'occurrence aux forces de capillarité. On est donc tenté d'utiliser également d'autres phénomènes que la capillarité pour faire jouer la force d'aspiration. Si l'hypothèse émise se révélait juste, il devrait être également possible de produire le même effet avec d'autres substances. Seules peuvent entrer en considération celles dont le pouvoir absorbant est notablement plus élevé que celui du système « Blaugel »-gélatine ; des essais plus étendus devraient être orientés tout d'abord dans cette direction.

Mais il ne doit pas être facile de trouver une matière qui convienne parfaitement à ces essais ; une étude plus



approfondie de la question sort du cadre du présent travail et nous devons laisser de côté certains essais de détail plus poussés. Etant donné l'imprécision des résultats de la méthode du « Blaugel », il paraît indiqué de s'en tenir encore pour le moment aux essais de congélation pour déterminer la force d'aspiration.

L'exécution des essais de congélation a montré que l'appareil utilisé pouvait être encore perfectionné et le Laboratoire de géotechnique de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne vient de faire l'acquisition d'une grande armoire frigorifique avec tous les accessoires indispensables à la continuation de ces études.

### CHAPITRE III.

#### Les conditions météorologiques en Suisse au point de vue du gel.

Comme indiqué précédemment, la place nous manque pour reproduire ici ce chapitre in extenso; en voici un bref résumé qui permettra de saisir le sens donné aux recherches de l'auteur en cette matière et facilitera la compréhension de la suite de son exposé. (Réd.)

L'étude statistique des observations journalières de la température effectuées durant trente ans en diverses stations suisses, a permis de rechercher la loi qui lie la durée et la fréquence des périodes de froid et l'intensité de celui-ci. On entend par période de froid une suite ininterrompue de  $T_i$  jours, pour lesquels la température moyenne de l'air  $\Theta_m$  est inférieure à  $0^\circ$ . L'intensité du froid pendant cette période est définie par :

$$\Theta_{T_i} = \frac{\sum \Theta_m}{T_i}.$$

A l'aide de la théorie des corrélations, on montre que la relation entre l'intensité  $\Theta_{T_i}$  et la durée  $T_i$  est imprécise et qu'elle peut être représentée par une équation linéaire de la forme

$$\Theta_{T_i} = a_2 + b_2 T_i \mp s$$

Les constantes  $a_2$  et  $b_2$  ainsi que la dispersion  $s$  dépendent avant tout de l'altitude de la station. C'est ce que montre le tableau suivant :

Stations	Davos	Oberiberg	Berne	Zürich	Neuchâtel	Genève	Bâle
Altitudes	1561	1090	572	495	487	405	318
$a_2$ °C	-4,54	-3,60	-2,53	-1,76	-1,74	-1,46	-1,39
$b_2$ °C	-0,029	-0,074	-0,077	-0,129	-0,111	-0,126	-0,150
$s$ °C	3,24	2,89	2,09	1,81	1,53	1,33	1,55

L'étude statistique a également permis de trouver une relation entre la durée et la fréquence des périodes de froid. Si  $n_i$  est le nombre des périodes de froid d'une durée de  $T_i$  jours pendant le laps de temps considéré

(par exemple  $q = 30$  ans), la probabilité  $P_i$  qu'une telle période de froid apparaisse chaque hiver est :  $P_i = \frac{n_i}{q}$ .

En faisant la somme des probabilités des différentes périodes supérieures à  $T_i$  jours, on obtient :

$$d_i = \frac{\sum_{T=T_i}^{\infty} n_i}{q}.$$

$d_i$  représente la probabilité qu'une période de froid plus longue que  $T_i$  jours se produise chaque hiver. En reportant  $d_i$  en fonction de  $T_i$  pour chaque station, on obtient une famille de courbes de caractère hyperbolique (fig. 20) dont les asymptotes coïncident avec les axes de coordonnées. Pour les stations à basse altitude, les courbes tendent à se rapprocher des axes, tandis que pour les hautes altitudes elles sont plus tendues et s'éloignent des axes.

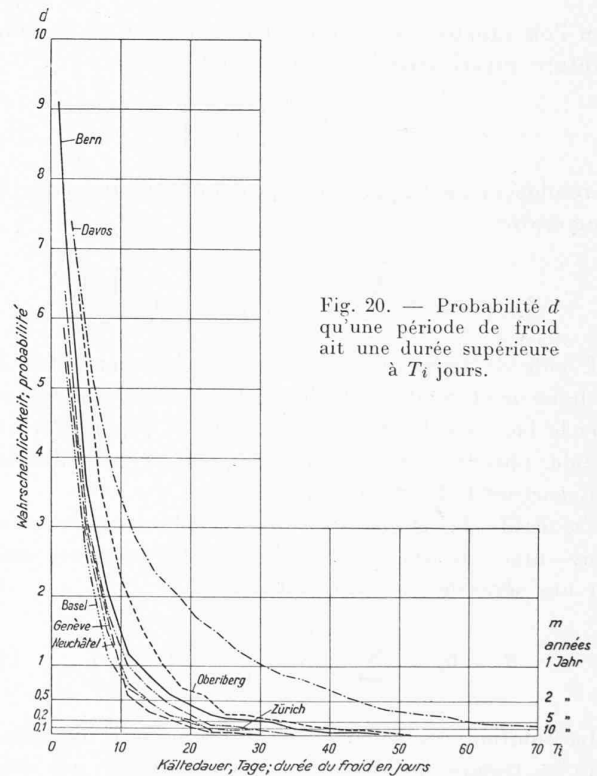


Fig. 20. — Probabilité  $d$  qu'une période de froid ait une durée supérieure à  $T_i$  jours.

### CHAPITRE IV.

#### Théorie de la congélation du sol.

##### A. Généralités sur la répartition des températures dans les couches supérieures du sol.

Les variations de température journalières et saisonnières ne se manifestent pas seulement dans l'atmosphère, mais aussi dans le sol, dans les couches supérieures duquel on peut également constater des fluctuations quotidiennes et annuelles. Si la variation de la température dans le temps est donnée à la surface sous forme d'une fonction périodique, elle peut être calculée à une pro-

fondeur quelconque si l'on suppose que le sol est homogène, illimité en étendue et en profondeur, et que l'oscillation dure assez longtemps. Le calcul se fonde sur l'équation différentielle générale de la transmission de la chaleur.

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2}$$

où  $\delta$  représente la température,  $t$  le temps,  $x$  la profondeur et  $a$  une constante, appelée coefficient de transmission des températures.

$a$  est lié

à la conductibilité thermique  $\lambda$  [ $\text{cal} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]

à la chaleur spécifique  $c$  [ $\text{cal} \cdot \text{gr}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ]

et au poids spécifique  $\gamma$  [ $\text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]

par la relation suivante :

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma} \quad [\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}].$$

Si l'on suppose une variation harmonique de la température superficielle  $\delta_s$ , de la forme

$$\delta_s = \delta_{SM} \cdot \sin \left[ \frac{2\pi}{T} \cdot t \right]$$

la résolution de l'équation différentielle donne pour la température

$$\delta_{xt} = \delta_{SM} \cdot e^{-x\sqrt{\frac{\pi}{aT}}} \cdot \sin \left[ \frac{2\pi}{T} t - x\sqrt{\frac{\pi}{aT}} \right]$$

L'onde de température s'amortit rapidement avec la profondeur et subit un déphasage croissant linéairement vers le bas ; en d'autres termes, plus la profondeur est grande, plus les variations de température superficielles sont perçues faiblement et tardivement.

En réalité, la température superficielle ne peut pas se représenter par une seule oscillation harmonique, mais par une série de sinus, de la forme

$$\delta_s = \delta_o + \sum_{m=1}^{\infty} \delta_m \cdot \sin \left[ \frac{2m\pi}{T} t + \alpha_m \right]. \quad (1)$$

La solution comporte également une série de sinus, dont les termes ont chacun la même structure que dans l'hypothèse d'une oscillation fondamentale simple.

$$\delta_{xt} = \delta_o + \sum_{m=1}^{\infty} \delta_m \cdot e^{-x\sqrt{\frac{m\pi}{aT}}} \cdot \sin \left[ \frac{2m\pi}{T} t + \alpha_m - x\sqrt{\frac{m\pi}{aT}} \right] \quad (2)$$

où  $m$  représente le numéro d'ordre d'une harmonique quelconque.

Si la variation de température est connue par une série de mesures faites à intervalles réguliers, on peut calculer au moyen de l'analyse harmonique le coefficient de transmission  $a$  ; connaissant le poids et la chaleur spécifique du sol, on en déduit le coefficient de conductibilité  $\lambda$ . Ces coefficients dépendent fortement de la teneur en eau du terrain (voir tableaux 5 et 6).

Tableau N° 5.

Coefficient de conductibilité thermique  $\lambda$  et de transmission des températures  $a$ .

$\lambda$  en  $\text{cal/cm h } ^\circ\text{C}$ ,  $a$  en  $\text{cm}^2/\text{h}$ .

D'après Beskow.

Terrains	$a = \frac{\lambda}{C}$	capacité thermique $C$	Coefficient de conductibilité $\lambda = Ca$
Gravier 3-8 cm, sec . . . . .	—	—	3,26
Sable, sec . . . . .	—	—	2,16— 3,6
Sable, humide (eau 6,5 % en poids) . . . . .	—	—	9,73
Limon, sec . . . . .	12,3 25,9	—	5,4 —10,43
Sable humide( en terrain purement sablonneux) à 60-90 cm de profondeur (Kurwien) . . . . .	a) 22,2 b) 22,6	0,274 0,258	6,05 5,84
Sol sablonneux, légèrement limoneux, humidité modérée, à 50-60 cm de profondeur (Eberswalde) . . . . .	a) 18,7—19,2 b) 20,9—24,6	0,346 0,373	6,48— 6,66 7,85— 9,22
Idem. très humide (saturation capillaire) profondeur 60-90 cm . . . . .	a) 21,6 b) 37,8	0,449 0,378	9,65 14,30
Sable limoneux, humide, saturation capillaire, profondeur 60-90 cm (Fritzen) . . . . .	a) 27,7 b) 28,6	0,342 0,549	9,55 15,65
Béton . . . . .	20,0	0,5	10,0
Eau . . . . .	5,04	1,0	5,04
Glace . . . . .	58,4	0,45	19,4

Tableau N° 6.

Influence du gel sur la valeur de la capacité thermique (d'après Beskow).

Teneur en eau		Capacité calorifique		Rapport $\frac{C_f}{C_g}$
avant le gel	après le gel	$C_f$ (humide) $\text{cal/cm}^3$	$C_g$ (gelé) $\text{cal/cm}^3$	
30 %	30 %	0,685	0,518	1,32
35 %	35 %	0,7075	0,508	1,39
40 %	40 %	0,730	0,507	1,44
30 %	20 % glace 20 % eau 60 % terrain	0,685	0,62	1,103
30 %	40 % glace 15 % eau 45 % terrain	0,685	0,5775	1,185
30 %	60 % glace 10 % eau 30 % terrain	0,685	0,535	1,280
Limite 40 %	100 % glace	0,730	0,450	1,62

## B. Calcul de la pénétration du gel en tenant compte de l'absorption d'eau.

Pour calculer la pénétration du gel dans le sol, il n'est malheureusement pas possible de faire usage de la théorie générale de la transmission de la chaleur, indiquée au paragraphe précédent. Quand la température atteint  $0^\circ$ , des conditions physiques toutes différentes apparaissent, l'eau cédant de la chaleur au moment de sa congélation (79,15 cal. par gramme d'eau). L'énergie ainsi libérée amortit et retarde la variation de température dans un sol mouillé ou humide.

C'est à Neumann (20 ; 71) qu'on doit la première expression mathématique exacte de la pénétration du gel dans le sol. La théorie qu'il en a donnée se borne au cas d'un milieu humide isotrope, à température initiale constante uniforme et positive. Le phénomène thermique est déclenché par la chute brusque de la température superficielle, qui prend une nouvelle valeur constante mais négative. Mais cette théorie n'est applicable qu'au cas d'une eau souterraine immobile, et ne convient donc pas à celui de la formation de lentilles de glace.

Pour l'étude théorique de la congélation d'un sol non homogène, il faut commencer par étendre la théorie, en considérant la formation des lentilles de glace, qui provoque une absorption d'eau ; c'est ce que nous allons faire aux paragraphes suivants.

### 1. Hypothèses.

Nous admettrons dans la suite que l'absorption d'eau est provoquée par la force d'aspiration définie au chapitre II. De plus, nous supposons également qu'au point de vue granulation, le sol constitue un milieu homogène, mais qu'il contient de l'eau souterraine avec un niveau libre. Ce niveau théorique de la nappe phréatique, sur lequel la pression est égale à la pression atmosphérique, est supposé à la profondeur  $H$  par rapport à la surface du sol. La couche de terre située au-dessus de ce niveau est saturée d'eau de capillarité ; la hauteur d'ascension capillaire  $K$  doit donc être plus grande que la profondeur  $H$  de la nappe. Nous nous trouvons ainsi en présence d'un système à une seule dimension, dont l'axe des  $X$  est perpendiculaire à la surface du sol. Au point de vue thermique, nous supposons qu'avant le début du refroidissement, la température du sol était constante dans toute la masse, et égale à  $+\delta_{II}$  degrés. Au temps  $t = 0$ , le phénomène de la congélation est déclenché par le fait que la température superficielle tombe brusquement au-dessous de  $0^\circ$  et se maintient à la valeur  $-\delta_I$  degrés. Les conditions aux limites sont ainsi :

$$\text{Pour } t < 0 : \delta_x = \delta_{II} = \text{const.} \quad 0 \leq x \leq \infty$$

$$\text{Pour } t = 0 : \delta_o = -\delta_I \quad x = 0$$

$$\delta_x = \delta_{II} \quad 0 \leq x \leq \infty$$

$$\text{Pour } t > 0 : \delta_o = -\delta_I \quad x = 0$$

$$\delta_x = f(x, t) < \delta_{II}$$

$$\delta_x = 0 \quad x = \xi$$

On cherche la profondeur  $\xi$  de la zone de gel en fonction du temps  $t$ .

Appelons  $\delta_1$  la température dans la zone gelée et  $\delta_2$  la température dans la zone non gelée.

$$\delta_1 < 0 \quad 0 \leq x \leq \xi$$

$$\delta_2 > 0 \quad \xi \leq x \leq \infty$$

Une solution exacte du problème n'a déjà pas pu être trouvée dans le cas simple étudié par Neumann ; une étude exacte de notre cas paraît donc hors de question, et il faudra chercher la solution par une méthode d'approximations.

Terzaghi et Fröhlich ont montré (66) que certains phénomènes, dont l'équation différentielle est du même type que celle de la transmission de la chaleur, peuvent être représentés analytiquement avec une très grande approximation, si l'on remplace les fonctions, dans notre cas  $\delta = f(x)$ <sup>1</sup> par des paraboles, en considérant le temps comme paramètre. Les paraboles doivent être choisies de manière à coïncider le mieux possible avec les courbes représentant réellement la fonction.

Quand le milieu considéré se refroidit de  $\delta_{II}$  à  $\delta_I$ , l'axe de la parabole doit être placé parallèlement à la surface, la tangente au sommet coïncidant avec la droite  $\delta_{II} = \text{const.}$  et les sommet  $S$  se déplaçant sur cette droite vers l'intérieur de la masse au fur et à mesure que le temps croît (fig. 26).

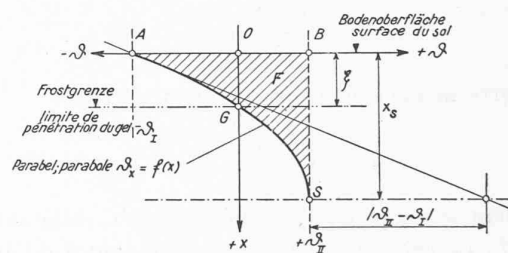


Fig. 26. — Tautochrone des températures du sol, dans l'hypothèse d'une courbe parabolique, sans tenir compte de la discontinuité à la limite de pénétration du gel.

Soit  $x_s$  la profondeur du sommet  $S$  de la parabole. En vertu d'une propriété connue de la parabole, le gradient de température à la surface ( $x = 0$ ) est donné par :

$$\frac{\partial \delta}{\partial x}_{x=0} = \frac{2(\delta_{II} - \delta_I)}{x_s} \quad (3)$$

La tautochrone  $\delta = f(x)$  coupe l'axe des ordonnées à la profondeur  $\xi$ , où la température est égale à  $0^\circ$ . Entre la profondeur  $x_s$  du sommet  $S$  et celle de la zone de gel  $\xi$  existe, à cause de la forme parabolique de la courbe des températures, la relation suivante :

$$\xi = x_s \left[ 1 - \sqrt{\frac{\delta_{II}}{\delta_{II} - \delta_I}} \right] \quad (4)$$

En posant pour abrégier l'écriture

<sup>1</sup> Ces courbes portent en météorologie le nom de « tautochrones ». Nous adopterons la même désignation.



et

$$\mu = 1 - v$$

nous obtenons :

$$\xi = x_s (1 - v)$$

ou

$$\xi = x_s \cdot \mu \quad (4a)$$

Pour étudier la variation de la parabole dans le temps, considérons un prisme vertical de section 1 et de hauteur  $dx$ , à la profondeur  $x$ . La température initiale était  $\delta_{II}$  et au temps  $t$   $\delta_t$ ; compte tenu de la chaleur spécifique  $c$  et du poids spécifique  $\gamma$ , la perte de chaleur consécutive à l'abaissement de  $\delta_{II}$  à  $\delta_t$  vaut

$$dq = c\gamma \cdot 1 \cdot (\delta_{II} - \delta_t) \cdot dx.$$

Au temps  $t$ , le refroidissement est parvenu jusqu'à la profondeur  $x_s$  du sommet  $S$  de la parabole, et la perte de chaleur de tout le prisme de terre de section 1 vaut

$$q = \int_0^{x_s} dq = c\gamma \left( \delta_{II} \cdot x_s - \int_0^{x_s} \delta \cdot dx \right).$$

L'expression entre parenthèses ne représente pas autre chose que la surface hachurée  $ABSGA$  de la figure 26 et nous pouvons écrire

$$q = c\gamma \cdot F \quad (5).$$

Etant donné la forme parabolique, on a :

$$F = \frac{x_s \cdot (\delta_{II} - \delta_I)}{3}$$

et la perte de chaleur du prisme peut s'écrire

$$q = c\gamma \frac{x_s \cdot (\delta_{II} - \delta_I)}{3}. \quad (5a)$$

Pendant le temps  $dt$ ,  $x_s$  augmente de  $dx_s$  et la surface  $F$  de  $dF$ . La perte de chaleur correspondant à cet intervalle de temps est

$$dq = c\gamma \frac{(\delta_{II} - \delta_I)}{3} \cdot dx_s. \quad (6)$$

Cette chaleur est transmise à l'extérieur. Immédiatement sous la surface, elle est proportionnelle à la conductibilité  $\lambda$  et au gradient de la température

$$dq = \lambda \frac{\partial \delta}{\partial x_{x=0}} \cdot dt. \quad (7)$$

Les équations (6) et (7) représentent toutes deux la quantité de chaleur qui s'écoule pendant le temps  $dt$ ; leurs seconds membres peuvent être égaux. Compte tenu de l'équation (3), on a :

$$c\gamma \frac{\delta_{II} - \delta_I}{3} \cdot dx_s = \lambda \frac{2(\delta_{II} - \delta_I)}{x_s} \cdot dt$$

$$\int_0^{x_s} x_s \cdot dx_s = \frac{6\lambda}{c\gamma} \cdot \int dt$$

$$x_s = \sqrt{\frac{12 \cdot \lambda \cdot t}{c\gamma}} = \sqrt{12at}. \quad (8)$$

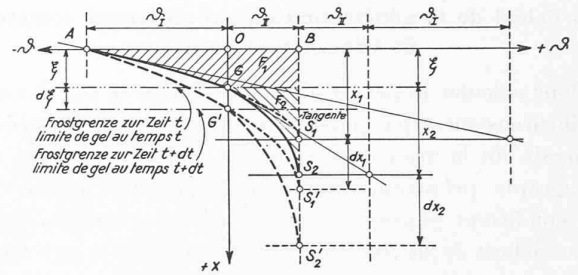


Fig. 27. — Tautochrone des températures du sol, dans l'hypothèse d'une courbe parabolique, en tenant compte de la discontinuité à la limite de pénétration du gel.

Nous avons ainsi donné les bases de la méthode d'approximation.

## 2. Etablissement de l'équation différentielle de la propagation du gel dans le sol.

Pendant la pénétration du gel dans le sol humide, le tronçon  $A-G$  de la parabole de la figure 27 représente la courbe des températures dans la zone gelée. A partir de là, au lieu de la courbe  $G-S_1$ , elle suit la parabole  $G-S_2$  dont le sommet  $S_2$  est à la profondeur  $x_2$  au-dessous de la limite de gel. Le tautochrone présente à la profondeur  $\xi$  un point anguleux, provoqué par le dégagement de chaleur intervenant à cet endroit.

La chaleur dégagée au niveau inférieur de la zone de gel provient de deux sources. Elle provient d'une part, de la congélation de l'eau des pores, et d'autre part, de la congélation de l'eau aspirée par les lentilles de glace en formation. La chaleur libérée par le refroidissement des zones gelée et non gelée, ainsi que la chaleur de congélation, sont transmises à l'extérieur par la surface du sol. Considérons séparément les différentes parties de ce flux de chaleur :

*Chaleur libérée par le refroidissement de la zone gelée.*

D'après l'équation (5), la chaleur libérée jusqu'au temps  $t$  par la zone gelée est égale à  $c_1 \gamma_1 F_1$  (fig. 27).

Tenant compte de la forme parabolique de la tautochrone, nous pouvons écrire

$$F_1 = \frac{1}{3} (\delta_{II} - \delta_I) \cdot x_1 - \frac{1}{3} \delta_{II} \cdot v \cdot x_1$$

$$F_1 = \frac{\delta_{II} (1 - v) - \delta_I}{3} \cdot x_1$$

et à l'aide de l'équation (4a)

$$F_1 = \frac{\mu \cdot \delta_{II} - \delta_I}{3\mu} \cdot \xi.$$

Il en résulte

$$dF_1 = \frac{\mu \delta_{II} - \delta_I}{3\mu} \cdot d\xi. \quad (9)$$

La quantité de chaleur dégagée dans la zone gelée pendant le temps  $dt$  est ainsi

$$dq_1 = c_1 \gamma_1 \frac{\mu \delta_{II} - \delta_I}{3\mu} \cdot d\xi. \quad (10)$$

Chaleur libérée par le refroidissement de la zone non gelée.

De la figure 27, nous tirons :

$$F_{2_1} = \frac{1}{3} \delta_{II} \cdot x_2$$

$$F_{2_1+dt} = (x_2 + dx_2 - d\xi) \frac{\delta_{II}}{3}$$

et

$$dF_2 = \frac{\delta_{II}}{3} \cdot (dx_2 - d\xi).$$

La quantité de chaleur dégagée dans la zone non gelée pendant le temps  $dt$  est ainsi :

$$dq_2 = c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} \cdot (dx_2 - d\xi) \quad (11)$$

Chaleur de solidification libérée par la congélation de l'eau des pores.

Si  $n$  est le volume des pores complètement saturé d'eau et  $\sigma$  la chaleur de solidification de l'eau, la quantité de chaleur libérée pendant le temps  $dt$ , rapportée à l'unité de surface horizontale vaut :

$$dq_n = \sigma \cdot n \cdot d\xi \quad (12)$$

$d\xi$  est l'augmentation de profondeur de la zone de gel pendant le temps  $dt$ .

Chaleur de solidification de l'eau d'aspiration.

La vitesse  $v$  de l'eau aspirée par les lentilles de glace est, comme on l'a vu au chapitre II, fonction de la profondeur de gel  $\xi$ .

$$v = f(\xi).$$

La chaleur de solidification libérée pendant le temps  $dt$  est ainsi :

$$dq_v = \sigma \cdot v \cdot dt. \quad (13)$$

La somme de ces quatre termes représente la chaleur totale libérée par le processus de la congélation et transmise à l'extérieur par la surface.

$$dq = c_1 \gamma_1 \cdot dF_1 + c_2 \gamma_2 \cdot dF_2 + n \cdot \sigma \cdot d\xi + \sigma \cdot v \cdot dt. \quad (14)$$

D'après la loi de Biot-Fourier sur la transmission de la chaleur, ce flux est proportionnel au gradient de température à la surface. Comme on le voit facilement dans la figure 27 pour une tautochrone de forme parabolique, ce gradient est égal à

$$\frac{\partial \delta_1}{\partial x_{x=0}} = \frac{2(\delta_{II} - \delta_I)}{x_1} = \frac{2\mu(\delta_{II} - \delta_I)}{\xi}. \quad (15)$$

En posant

$$dq = \lambda_1 \cdot \frac{\partial \delta_1}{\partial x_{x=0}} \cdot dt$$

on trouve au moyen des équations (14) et (15)

$$2\lambda_1 \frac{\mu(\delta_{II} - \delta_I)}{\xi} \cdot dt = c_1 \gamma_1 \frac{\mu \delta_{II} - \delta_I}{3\mu} \cdot d\xi + c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} (dx_2 - d\xi) + n \cdot \sigma \cdot d\xi + \sigma \cdot v \cdot dt$$

ou

$$[2\lambda_1 \mu (\delta_{II} - \delta_I)] dt = c_1 \gamma_1 \frac{\mu \delta_{II} - \delta_I}{3\mu} \cdot \xi \cdot d\xi + c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} \cdot \xi \cdot dx_2 - c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} \cdot \xi \cdot d\xi + n \cdot \sigma \cdot \xi \cdot d\xi + \sigma \cdot v \cdot \xi \cdot dt. \quad (16)$$

L'équation (16) renferme la variable  $dx_2$ ; celle-ci est liée à  $x_2$  par la condition de continuité, car la quantité de chaleur  $dq_2$  libérée dans l'intervalle de temps  $dt$  doit être transmise à travers la couche limite de la zone de gel. L'équation (11) permet d'écrire :

$$dq_2 = c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} [dx_2 - d\xi] = \lambda_2 \frac{\partial \delta_2}{\partial x_{x=\xi}} \cdot dt$$

et puisque

$$\frac{\partial \delta}{\partial x_{x=\xi}} = \frac{2\delta_{II}}{x_2}$$

on a :

$$c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} \cdot [dx_2 - d\xi] = \lambda_2 \frac{2\delta_{II}}{x_2} \cdot dt.$$

La relation entre  $dx_2$  et  $d\xi$  n'est pas connue. Sur la base des observations, on peut cependant admettre que  $d\xi$  n'est en général qu'une fraction de  $dx_2$  et peut être négligé dans le cas d'une pénétration très lente du froid.

Faisons maintenant l'hypothèse, pas tout à fait rigoureuse, que  $d\xi$  est proportionnel à  $dx_2$ , et écrivons :

$$d\xi = m \cdot dx_2.$$

Nous reviendrons plus tard sur la valeur du facteur de proportionnalité  $m$ .

$$c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} \cdot dx_2 [1 - m] = \lambda_2 \frac{2\delta_{II}}{x_2} \cdot dt$$

$$dx_2 = \frac{6}{1 - m} \frac{\lambda_2}{c_2 \gamma_2} \cdot \frac{dt}{x_2}. \quad (17)$$

En combinant (17) avec (16), on a :

$$[2\lambda_1 \mu (\delta_{II} - \delta_I)] \cdot dt = c_1 \gamma_1 \frac{\mu \delta_{II} - \delta_I}{3\mu} \cdot \xi \cdot d\xi - c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} \xi \cdot d\xi + \frac{2\lambda_2 \delta_{II}}{1 - m} \frac{\xi}{x_2} dt + n \cdot \sigma \cdot \xi \cdot d\xi + \sigma \cdot v \cdot \xi \cdot dt. \quad (18)$$

La résolution algébrique de cette équation donne

$$d\xi = \frac{2\lambda_1 \cdot \mu (\delta_{II} - \delta_I) - 2\delta_{II} \frac{\lambda_2}{1 - m} \cdot \frac{\xi}{x_2} - \sigma v \xi}{(c_1 \gamma_1 \frac{\mu \delta_{II} - \delta_I}{3\mu} - c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} + n \sigma) \cdot \xi} \cdot dt \quad (19)$$

expression dans laquelle  $dx_2$  a maintenant disparu.

$x_2$  est la profondeur au-dessous de la limite de gel de la zone qui subit au temps  $t$  les effets du refroidissement. En intégrant l'équation (19) on trouve ici comme pour l'équation (8)

$$x_2 = \sqrt{\frac{12 a_2 t}{1 - m}}. \quad (8a)$$

En introduisant la valeur (8a) dans l'équation (19) et en modifiant un peu l'écriture, on obtient comme relation entre la profondeur de gel  $\xi$  et le temps  $t$

$$d\xi = \frac{2\lambda_1 \mu (\delta_{II} - \delta_I)}{c_1 \gamma_1 \frac{\mu \delta_{II} - \delta_I}{3\mu} - c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} + n \cdot \sigma} \cdot \frac{1}{\xi} \cdot dt$$

$$- \frac{\sigma}{c_1 \gamma_1 \frac{\mu \delta_{II} - \delta_I}{3\mu} - c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} + n \cdot \sigma} \cdot v \cdot dt \quad (20)$$

$$- \frac{\lambda_2 \delta_{II}}{\sqrt{3a_2(1-m)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot dt.$$

Si nous appelons  $A$ ,  $B$  et  $C$  les trois facteurs constants, l'équation différentielle s'écrit :

$$d\xi = A \cdot \frac{1}{\xi} \cdot dt - B \cdot v \cdot dt - C \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot dt \quad (20 a)$$

ou, en posant  $\frac{d\xi}{dt} = \xi'$

$$\xi' = \frac{A}{\xi} - Bv - \frac{C}{\sqrt{t}} \quad (20 b)$$

dans laquelle  $v = f(\xi)$ .

$$A = \frac{\lambda_1 \mu (\delta_{II} - \delta_I)}{c_1 \gamma_1 \frac{\mu \delta_{II} - \delta_I}{3\mu} - c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} + n \sigma}$$

$$B = \frac{\sigma}{c_1 \gamma_1 \frac{\mu \delta_{II} - \delta_I}{3\mu} - c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} + n \sigma}$$

$$C = \frac{\lambda_2 \delta_{II}}{\sqrt{3a_2(1-m)} \cdot \left\{ c_1 \gamma_1 \frac{\mu \delta_{II} - \delta_I}{3\mu} - c_2 \gamma_2 \frac{\delta_{II}}{3} + n \sigma \right\}}$$

On ne peut trouver de solution générale de l'équation différentielle de la pénétration du gel dans le sol (20 b) que dans le cas où la loi d'absorption d'eau  $v = f(\xi)$  est connue. Nous ne nous étendrons pas plus longuement sur les difficultés à vaincre au point de vue mathématique. La solution pratique est donnée au chapitre V.

*Evaluation du rapport  $m$  de l'équation (17).*

L'équation  $d\xi = m \cdot dx_2$   
donne par intégration

$$\xi = mx_2 \quad \text{ou} \quad m = \frac{\xi}{x_2}.$$

On peut évaluer la valeur de  $m$  en calculant la profondeur  $x_2$  d'après l'équation (8) et ceci, par exemple, pour les périodes de froid de 30, 60 et 90 jours. Au moyen de la relation

$$x_2 = x'_2 - \xi$$

où  $x'_2$  représente la profondeur du sommet  $S_2$  de la parabole, on calcule  $m$  pour différentes valeurs arbitraires de  $\xi$  max. par exemple 40, 80 et 120 cm. On trouve pour  $a = 20 \text{ cm}^2/\text{h}$ , compte tenu de l'équation (8).

$\xi$ max.	T = 30 jours		T = 60 jours		T = 90 jours	
	$m$	$1-m$	$m$	$1-m$	$m$	$1-m$
40 cm	0,11	0,89	0,07	0,93	0,06	0,94
80 »	0,24	0,76	0,16	0,84	0,13	0,87
120 »	0,41	0,59	0,26	0,74	0,20	0,80

La valeur de  $m$  varie pratiquement de 0,1 à 0,3 et peut être admise en moyenne égale à 0,2. (A suivre).

## SOCIÉTÉ GENEVOISE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES SECTION S. I. A.

### Rapport du président sur l'exercice 1942.

Présenté à l'Assemblée générale du 18 février 1943.

Messieurs et chers collègues,

J'ai l'honneur de vous présenter le rapport annuel relatif à l'activité de notre Section au cours de l'exercice 1942.

L'état nominatif de nos membres a subi divers changements ; nous avons eu le plaisir d'accueillir 10 nouveaux collègues : 1 architecte, M. Georges Peloux ; 3 ingénieurs civils, MM. Henri Copponex, Robert Moor et Albert Stévenin ; 1 ingénieur-électricien, M. Vladislav Kunz ; 5 ingénieurs-mécaniciens, MM. Pierre Bourcart, André Eyenberger, Jean Lieber, Fernand Turretini et Henry-Félix Weber.

En revanche, nous avons eu le vif regret d'enregistrer le décès de M. Charles Weibel, architecte, l'un de nos doyens, membre émérite et ancien président, dont l'éloge funèbre a été fait au cours d'une précédente séance.

Trois de nos membres ont demandé leur transfert dans d'autres sections : M. Jules Bruttin, ingénieur civil à la Section fribourgeoise ; MM. Raymond Cuénod, ingénieur-électricien et Edouard Volet, ingénieur-mécanicien à la Section vaudoise.

Enfin nous avons compte trois démissions : celle de M. Léopold Maurice, ingénieur civil ; Georges-L. Rigateau, architecte et Robert Sudan, ingénieur civil.

Ces diverses mutations se traduisent par une légère augmentation des membres de notre Section, dont l'effectif passe de 169 membres au 31 décembre 1941 à 173 à fin 1942, soit : 46 architectes (dont 1 membre cantonal), 48 ingénieurs civils, 23 ingénieurs-électriciens, 45 ingénieurs-mécaniciens, 5 ingénieurs ruraux et topographes, 6 ingénieurs chimistes et divers. Le groupe des ingénieurs bénéficie seul de cet accroissement, tandis que le nombre des architectes reste stationnaire. Cette constatation nous engage à envisager une action en vue du recrutement de forces nouvelles pour notre groupe d'architectes.

Durant l'année 1942 la Section a tenu 9 séances, dont deux extraordinaires : la première de celles-ci a été consacrée à la discussion de la fondation, décidée par le Conseil d'Etat, d'une école supérieure d'architecture ; la seconde fut nécessaire pour étudier le projet de loi cantonal sur l'exercice des professions d'ingénieur et d'architecte, dont le texte avait été modifié par la commission qui en est l'auteur.

Quant à nos séances ordinaires elles ont pu, cette année encore, être précédées d'un dîner familial, malgré la dureté des temps. Nous avons eu le plaisir d'entendre les communications suivantes :

M. le professeur Jacques Pirenne, « Constructeurs et constructions dans l'Egypte ancienne ». — M. Henri Berthoud, ingénieur, « Les améliorations foncières ». — M. Laurent Pagan, ingénieur, « Systèmes de télécommande pour réseaux de distribution d'énergie électrique ». — M. Robert Juvet, directeur de la Chambre de commerce, « Problèmes économiques genevois ». — M. Louis Blondel, architecte, « Quelques quartiers de Genève au moyen âge ». — M. Pierre Grandchamp, ingénieur, « Notes de voyage et organisation du cadastre en Colombie ». — M. Jean Stengelin, architecte, « Architectures tessinoises ».

Notre reconnaissance va aux auteurs de ces conférences qui ont répondu à l'appel de votre président avec la meilleure grâce et beaucoup de dévouement.