Gélivité des sols et fondation des routes

Autor(en): **Ruckli, R.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **69 (1943)**

Heft 4

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-52506

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

69e année — 20 février 1943 — N° 4

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 & Cie, 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.

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*, par R. Ruckli, ingénieur à l'Inspectorat fédéral des travaux publics. — *Association amicale des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne et Société vaudoise des ingénieurs et des architectes : Les manifestations de l'hiver 1942-43 ; Prochaines conférences. — Le transfert de l'Ecole d'ingénieurs dans de nouveaux locaux.* — Bibliographie. — Carnet des concours. — Service de placement.

Gélivité des sols et fondation des routes

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

Le Laboratoire de géotechnique de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne, publia ici-même en 1938, sous la signature de M. le professeur A. Stucky *et de M.* D. Bonnard, *ingénieur, une communication intitulée « Procédés modernes d'étude des sols de fondation des chaussées ».*

Dès lors, avec la collaboration de divers milieux qu'intéresse cette question, il poursuivit ces études, notamment avec l'appui du Service des routes du Département des Travaux publics du canton de Vaud pour lequel il exécuta avec succès les essais de plus de cinquante terrains de fondation. L'intérêt de l'examen préalable des sols en laboratoire n'est, en ce domaine, aujourd'hui plus discuté ; ces déterminations conduisent à des conclusions pratiques indéniables et permettent de choisir convenablement le type de fondation et le genre de revêtement réduisant au minimum les déboires résultant lors des travaux et après leur achèvement de l'effet de l'eau ou du gel.

Le mérite de M. R. Ruckli, *ingénieur, est d'avoir jeté les bases d'une théorie nouvelle de la gélivité des sols et d'être parvenu à expliquer de manière originale le phénomène de gonflement des chaussées par formation de lentilles de glace. Les développements analytiques qu'il donne et les conclusions pratiques qu'il propose sont basées sur de nombreuses observations faites dans la nature et sur des essais exécutés par le Laboratoire de géotechnique. Les lignes qui suivent ne sont qu'une partie du travail de l'auteur qui soutint avec succès récemment à l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne sa thèse de doctorat ès sciences techniques* [1]. *Nos lecteurs voudront bien se reporter pour plus amples détails à la thèse elle-même qui sortira très prochainement de presse* (Réd.).

Introduction.

Le problème de la gélivité des sols peut être en principe considéré comme pratiquement résolu et il est possible aujourd'hui non seulement de reconnaître si un terrain est gélif, mais encore d'indiquer au technicien le moyens d'éviter les dégâts causés par le gel, tout au moins dans la construction de routes nouvelles. Malgré les progrès faits ces dernières années, on n'a cependant guère tenté encore d'appliquer quantitativement au mécanisme des phénomènes de congélation les résultats numériques déterminés d'autre part au laboratoire. En outre, jusqu'à aujourd'hui, les conditions climatériques dans lesquelles se produit la congélation du sol n'ont fait l'objet que de recherches très peu étendues. Le présent travail vise à poursuivre l'étude de ces questions et à apporter une contribution à leur éclaircissement, par des considérations nouvelles.

La congélation du sol est un phénomène naturel complexe qu'on ne pourra certainement jamais saisir dans

[1] La Commission d'examen était composée de M. le professeur *A. Stucky*, directeur de thèse, de M. le Dr *L. Bendel*, ingénieur, de MM. les professeurs *L. Déverin* et *R. Mercier*.

toute sa généralité par une formule mathématique. Il est cependant intéressant et utile pour le situer d'aborder le problème analytiquement en faisant certaines hypothèses simplificatrices. Ce procédé permettra d'établir des comparaisons exemptes d'influences parasites et de mettre en évidence l'effet de différents facteurs, et donnera, tout comme les essais de gel au laboratoire, une image de la réalité. Malgré certaines hésitations, l'auteur a par conséquent voué principalement son attention à cette face du problème ; l'étude théorique devant se borner toutefois au cas simple d'un sous-sol homogène.

L'étude devait faire initialement la part la plus grande aux observations des phénomènes de gélivité sur le terrain. Mais la guerre survenue entre temps a modifié ce projet. La partie théorique a été plus largement développée qu'il n'avait été prévu tout d'abord.

Dans la première partie (chapitres I et II) le problème de la gélivité des sols est traité du point de vue de la mécanique des terres. Sur la base de considérations phénoménologiques, on définit la capacité d'absorption d'eau du sol comme une force d'aspiration, encore hypothétique, considérée comme déterminante pour le gonflement. On y expose ensuite l'essai de mise au point d'une nouvelle méthode pour la détermination de la capacité d'absorption d'eau sur des bases purement mécaniques. Bien que la question de la possibilité de faire apparaître la force d'aspiration sous l'influence d'autres phénomènes que la formation de lentilles de glace n'ait pas pu être suffisamment éclaircie et qu'on ne possède encore aucun résultat définitif, cette méthode a cependant été retenue dans ce travail, car elle peut servir de base à de nouvelles recherches.

La deuxième partie donne la relation entre l'intensité, la durée et la fréquence des périodes de gel, critère très important pour l'estimation du danger de gel ; cette relation a été déterminée sur des bases purement statistiques pour différentes contrées (chapitre III) [1]. Une nouvelle théorie est ensuite établie pour le calcul par approximations de la pénétration du gel en considérant l'absorption d'eau ; la relation entre le temps et la profondeur de pénétration du gel est donnée sous forme d'une équation différentielle (chapitre IV). A l'aide de la force d'aspiration hypothétique définie précédemment, il est possible, au moyen de cette nouvelle théorie, de calculer à l'avance l'aspiration d'eau et le gonflement dans le cas le plus simple d'un terrain homogène (chapitre V).

La troisième partie (chapitre VI) comporte la description des essais effectués sur une route cantonale des environs de Lucerne dans le but de vérifier la théorie. La fin de cette étude donne également les résultats d'essais relatifs à l'influence de différents revêtements de route sur les conditions de température dans le sous-sol.

[1] Alors qu'il nous sera possible de publier ici la plus grande partie des chapitres I, II, IV, V et VI, nous devrons nous borner, faute de place, à résumer en quelques lignes le chapitre III et ses conclusions. (Réd.)

Chapitre I.

Mécanisme du gonflement par le gel.

A. Généralités.

Le phénomène du gonflement et des dégradations sous l'effet du gel n'a retenu l'attention des milieux techniques et scientifiques que depuis l'apparition des méthodes modernes de construction des routes. Il est vrai que certains phénomènes connexes (comme la formation de lentilles de glace) sont connus depuis longtemps dans les pays nordiques, mais c'est dans ces dernières décennies seulement qu'on leur a donné une signification pratique (7) [1].

L'accroissement du trafic automobile, qui exige de bonnes routes même en hiver, oblige les administrations à déblayer constamment les voies de communication. Il en résulte d'une part que le froid pénètre plus facilement dans le sol privé de sa couche de neige isolante, et d'autre part que les dégâts consécutifs sont beaucoup plus visibles qu'autrefois. En outre, les revêtements soignés des routes modernes sont plus sensibles au gel que les anciennes routes empierrées, dont la réfection était également plus facile. Les dégâts dûs au gel ont pris une telle importance par suite de l'accroissement des réseaux routiers que l'étude scientifique du phénomène de la congélation est devenue d'une urgente nécessité. L'Amérique, par exemple, a dépensé chaque année de 1920 à 1925 des millions de dollars pour la réparation de tels dégâts (56).

L'observation montre que si le gel intervient dans certaines conditions, il se produit un soulèvement de la surface de la route. Ce soulèvement peut atteindre quelques centimètres, ou même quelques décimètres ; il dépasse donc ce que la dilatation de l'eau congelée permettrait d'expliquer. Le milieu de la route se soulève généralement plus que les bords, où les tas de neige jouent le rôle d'isolant et amortissent la pénétration du froid. Ce phénomène peut avoir deux conséquences particulièrement fâcheuses : d'une part, sous l'effet de la dilatation, il se produit dans le revêtement des fentes longitudinales qui apparaissent surtout dans le milieu de la chaussée ; d'autre part, au moment du dégel, le sous-sol se ramollit et la résistance de la chaussée en est tellement diminuée que l'empierrement et le revêtement s'effondrent, comme Macadam l'avait déjà signalé (36). Dans les deux cas, la superstructure de la route peut subir de telles dislocations qu'elle doit être remplacée bien avant d'avoir atteint sa limite d'usure normale.

L'examen plus approfondi des effets du gel montre qu'il faut attribuer les gonflements à une augmentation de la quantité d'eau sous-jacente. La teneur en eau de la zone gelée peut atteindre un multiple de la teneur correspondant à la porosité naturelle. Cet excès d'eau est la cause de la diminution de résistance du sous-sol. Le but de la présente étude est précisément d'examiner les dif-

[1] Les chiffres entre parenthèses renvoient aux publications classées sous les numéros correspondants de l'index bibliographique qui sera donné en fin de cette publication.

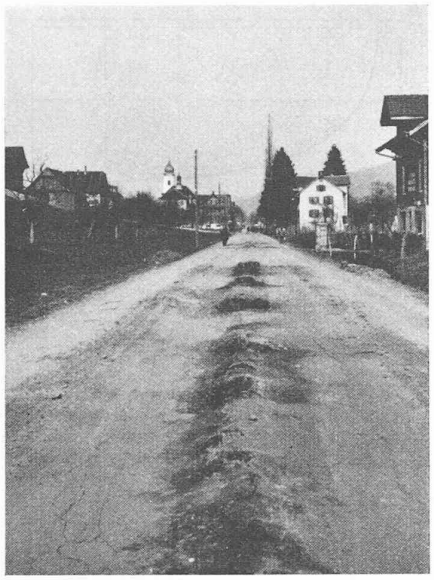

Fig. 1. — Dégâts provoqués par le gel dans un revêtement bitumineux près d'Ebikon. Les traces de roues sont imprimées dans la chaussée dont le milieu est fortement refoulé vers le haut. Etat après l'apparition du dégel.
(Photo O. Enzmann, ing. cant.)

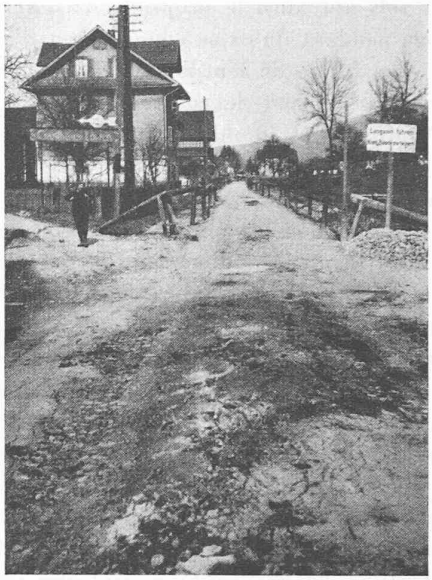

Fig. 2. — Dégâts causés à la route en macadam, dans le village d'Ebikon. Des traverses de chemins de fer ont dû être posées après le dégel, pour permettre la circulation des véhicules.
(Photo O. Enzmann, ing. cant.)

férentes conditions géotechniques, thermiques et climatériques dans lesquelles apparaissent les inconvénients de la gélivité des sols.

Chaque hiver un peu froid, les effets du gel se manifestent sur les routes, mais ils ne sont généralement pas visibles de prime abord et passent souvent presque inaperçus, bien qu'ils puissent provoquer une destruction prématurée du revêtement. L'hiver exceptionnellement froid de 1928-29 a par contre été cause en maints endroits de gonflements si importants que la circulation n'en a pas été rendue seulement difficile et dangereuse, mais carrément impossible, ce qui a eu pour effet d'attirer chez nous l'attention des constructeurs de routes sur la question de la gélivité des sols (fig. 1 et 2).

B. Formation de lentilles de glace avec absorption d'eau.

La glace peut se présenter dans le sol sous quatre fprmes : la glace superficielle lisse, la glace superficielle en fibres ou en aiguilles, la terre congelée homogène et la terre congelée hétérogène où la glace est sous forme de lentilles ou de rubans.

La terre congelée hétérogène a seule de l'importance dans le phénomène du gonflement par le gel ; il convient de nous y arrêter plus longuement.

Si l'on examine l'infrastructure de la route à l'endroit du gonflement, on voit que le sol a perdu sa stratification primitive ; il est entremêlé de lentilles de glace plus ou moins horizontales. Celles-ci sont constituées par de la glace propre, transparente, souvent imprégnée de petites bulles d'air ; elles peuvent parfois revêtir un aspect fibreux. Leur épaisseur peut aller de l'ordre du millimètre à plusieurs centimètres. Beskow rapporte qu'il a trouvé dans le sous-sol des lentilles de glace très épaisses, de 20 et même une fois 35 cm d'épaisseur (7). La distance entre les lentilles peut également varier du millimètre à quelques centimètres.

La formation des lentilles de glace dans la zone gelée est liée à l'augmentation de la teneur en eau ; ce fait peut être établi aussi bien sur le terrain qu'au laboratoire (fig. 3 *a* et 3 *b*).

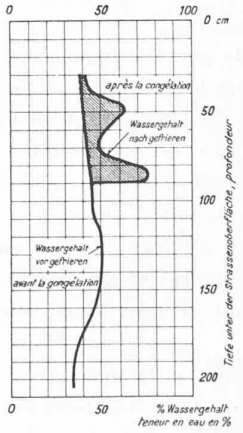

Fig. 3 *a*. — Teneur en eau avant et après le gel d'après des observations faites sur place par Beskow.

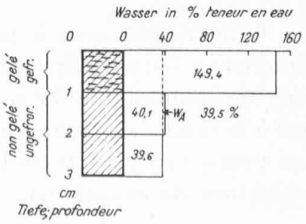

Fig. 3 *b*. — Teneur en eau avant et après le gel d'après les essais de Laboratoire de Dücker.

Certains sols ont ainsi la propriété d'aspirer de l'eau du voisnage pendant qu'ils se congèlent et d'accumuler cette eau sous forme de lentilles de glace. Ces terrains sont réputés gélifs par le constructeur de routes. Ils peuvent être reconnus comme tels au moyen des critères de gélivité connus (58).

L'eau accumulée peut avoir deux origines. Si elle provient des pores des couches inférieures du sol, sans qu'elle puisse y être remplacée d'une façon quelconque, on parle d'un système fermé. Malgré l'accumulation d'eau dans la zone gelée, il ne se produit pas de gonflement à la surface, parce que les couches inférieures subissent en même temps une diminution de volume correspondant à la quantité d'eau qui s'est déplacée. (La dilatation due à la congélation de l'eau est ici négligée). L'eau souterraine se répartit simplement d'une manière différente, mais sa quantité totale ne change pas.

Dans un système ouvert, l'eau absorbée par la formation des lentilles de glace est au contraire remplacée ; c'est le processus classique du gonflement par le gel (fig. 4). Il est caractérisé par un courant ascendant de

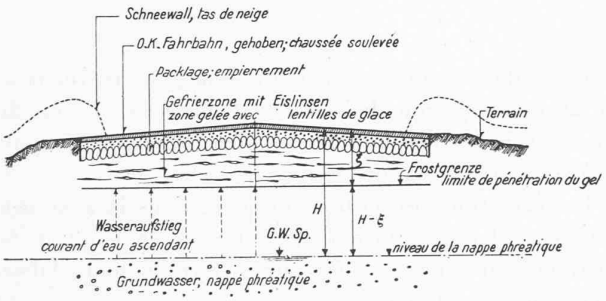

Fig. 4. — Coupe transversale d'une route soumise au gel.

l'eau souterraine vers la zone de gel. Pour que ce cas se produise il est bien entendu que le sol doit contenir de l'eau de capillarité au début de la congélation, sinon un mouvement ascensionnel de l'eau est impossible. Certains auteurs (27) sont maintenant d'avis que la réserve d'eau ne provient pas nécessairement d'une nappe souterraine ; des écoulements superficiels locaux, trouvant un passage vers le sous-sol par des fentes et des trous, peuvent y former des poches d'eau et provoquer souvent des dégâts sous l'effet du gel.

Les lentilles de glace peuvent se former aussi bien dans des terrains cohérents que dans des terrains pulvérulents. Pour ceux-ci, Dücker (13) a trouvé que la grosseur maximum des grains ne dépassait pas 0,05 - 0,02 mm pour un échantillon dont les grains ont un diamètre uniforme.

Les lentilles de glace sont toujours disposées à peu près parallèlement aux isothermes ; dans l'infrastructure des routes, elles sont donc horizontales (63). Le soulèvement de la surface est égal à la somme des épaisseurs des lentilles mesurées sur une même verticale. Dans les terrains à grain fin, la température de congélation de

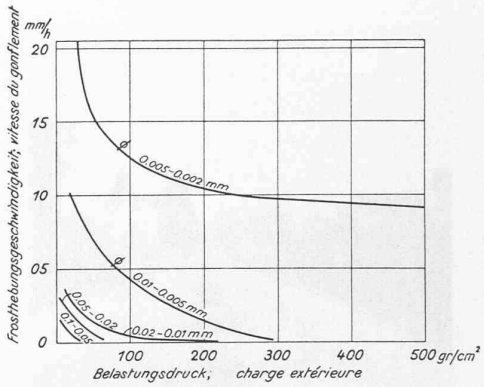

Fig. 5 *a*. — Vitesses de gonflement en fontion de la charge extérieure (d'après Beskow). Echantillons composés de grains de diamètre uniforme.

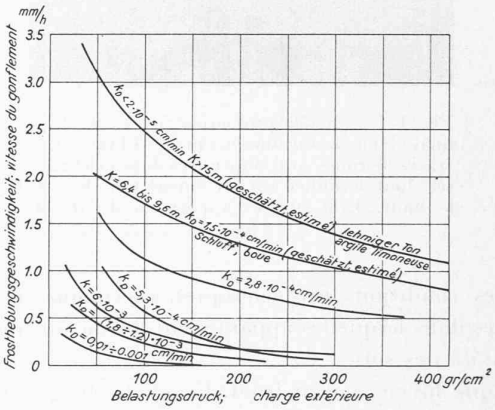

Fig. 5 *b*. — Vitesses de gonflement en fonction de la charge extérieure (d'après Beskow). Sols naturels et compositions artificielles.

l'eau s'abaisse ; c'est pourquoi souvent, entre les lentilles de glace, les terrains cohérents ne sont pas gelés. La formation des lentilles est ralentie par une augmentation de la surcharge extérieure (7) (63) (fig. 5 *a* et 5 *b*). Dans les terrains pulvérulents le gonflement croît avec la diminution du diamètre des grains, comme le montre le figure 6.

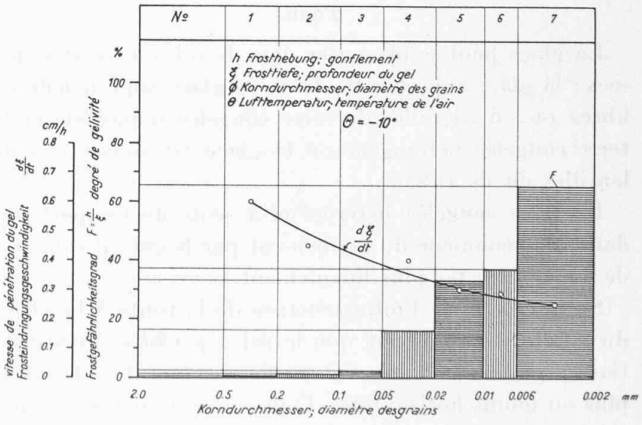

Fig. 6. — Vitesse de pénétration du gel $\frac{d\xi}{dt}$ et degré de gélévité F en fonction de la composition granulométrique du terrain (dessiné d'après des essais de Dücker).

C. Causes de l'absorption d'eau.

Il règne encore aujourd'hui diverses opinions sur les causes de l'absorption d'eau. La plus connue est celle qui fait appel aux forces de capillarité pures et simples. Une deuxième opinion l'attribue à une force dite de cristallisation. Une troisième met en cause des phénomènes de cohésion et d'absorption moléculaires ; cette dernière théorie fera l'objet d'un examen approfondi, dans le cadre de la présente étude.

1. *Théorie des forces de capillarité.*

A cause de sa simplicité, la théorie de la capillarité a été la première invoquée dans l'application du calcul au problème de la congélation des sols ; c'est ce qu'ont fait Kögler et Scheidig à Freiberg (28) pour établir leur critère de gélivité, reprenant en cela les idées de Beskow. D'après cette théorie, l'absorption d'eau pour la formation de lentilles de glace est un phénomène semblable à l'évaporation de l'eau à la surface d'un terrain saturé d'eau de capillarité. L'agent moteur est la pression capillaire, admise égale à la hauteur d'ascension capillaire, qui doit vaincre la résistance à l'écoulement suivant la loi de Darcy (7) (28). Nous n'en dirons pas davantage sur les difficultés que présentent la définition et la mesure de la hauteur d'ascension capillaire.

Si les conditions thermiques sont telles que toute l'eau absorbée peut se congeler, il n'y a aucune différence quantitative entre ce phénomène et celui de l'évaporation, pour autant que l'évaporation soit également assez intense pour compenser l'absorption maximum (7).

Si claire et si simple que soit cette explication de l'absorption d'eau, on peut cependant lui faire une sérieuse objection. Dans l'évaporation, on constate bien la présence d'un ménisque libre, qui donne naissance à la pression capillaire (en réalité dépression) ; la tension superficielle de l'eau peut agir librement. Il en va différemment de la congélation. Puisqu'on admet qu'elle se produit dans une zone saturée d'eau, il faut bien supposer que dans les pores et cavités du sol, l'eau et la glace sont directement en contact. Il est par conséquent difficile d'imaginer comment un ménisque libre et une pression capillaire pourraient s'établir. Taber avait déjà signalé cette difficulté (64).

2. *Théorie des forces de cristallisation.*

Dans les essais de congélation en système fermé, l'afflux de l'eau vers les lentilles de glace provoque dans les couches non gelées un certain retrait, accompagné de fissures de traction. Taber compare ce retrait à celui de l'argile desséchée par capillarité. On sait que dans ce cas on peut en déduire, d'après Terzaghi (65), la valeur de la pression capillaire sur la base de la pression œdométrique équivalente (58). La grandeur du retrait donnerait de même une mesure de la force par laquelle l'eau est expulsée de l'argile par les cristaux de glace en formation, pour arriver aux lentilles de glace. C'est cette force, dite de cristallisation qui, d'après Casagrande (9) interviendrait dans la congélation du sol.

Le fait qu'un cristal peut croître sous l'effet d'une pression extérieure, comme il s'en produit dans l'infrastructure d'une route sous le poids des couches supérieures, a conduit également à parler d'une pression ou d'une force de cristallisation. Kögler et Scheidig (28) signalent cette question, mais sans prendre position.

Dücker rapporte d'intéressants essais de congélation effectués au laboratoire sur de petits échantillons de terrains, et croit pouvoir en conclure à une confirmation de la théorie des forces de cristallisation (14).

Pour réfuter l'idée de Beskow suivant laquelle la vitesse de croissance des gonflements serait indépendante de la température de congélation, Dücker effectua des essais sur un limon gélif à des températures de —2° à —20° C ; pendant chaque essai, la température de congélation était maintenue constante. Il trouva pour chaque température une vitesse de gonflement bien déterminée, qui augmente avec l'abaissement de la température pour atteindre un maximum vers —15° à —16° C, et diminue ensuite pour des températures plus basses. Ce résultat est représenté graphiquement sur la figure 7.

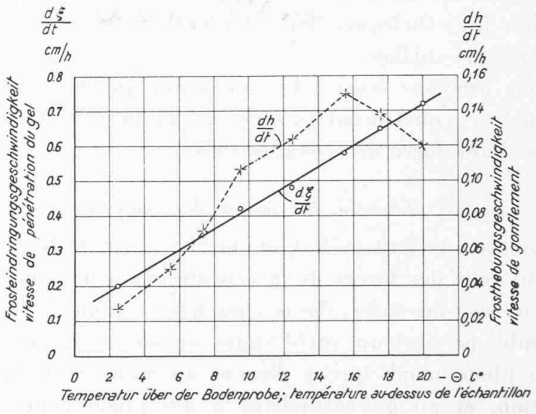

Fig. 7. — Vitesse de pénétration du gel $\frac{d\xi}{dt}$ et vitesse de gonflement $\frac{dh}{dt}$ en fonction de la température Θ pour un limon (dessiné d'après des essais de Dücker).

Sur la base de ces essais soignés et certainement exacts, Dücker arrive à la conclusion que dans le cas d'une pénétration normale du gel dans le sol, le gonflement observé dans les terrains gélifs et l'accroissement de la teneur en glace dépendent de la température de congélation. Dücker explique les résultats divergents de Beskow par le fait que chez Beskow, la durée de l'essai n'était que de 15 à 30 minutes pour chaque température, temps trop court à son avis pour influencer la vitesse de cristallisation.

Bien que cette conception paraisse tout d'abord évidente, on peut lui faire certaines objections. Dans la plupart des essais de Dücker, l'état de régime s'est établi au bout de 10 à 20 minutes, parfois même plus tôt. Si le

système réagit ici avec une telle rapidité au changement des conditions extérieures, on ne s'explique pas très bien pourquoi chez Beskow de fortes variations de température d'une durée de 30 minutes n'auraient pas suffi à influencer la vitesse de gonflement.

L'introduction de la notion de température de congélation n'est elle-même pas absolument satisfaisante. Il faut entendre sous cette désignation la température de l'air au-dessus de l'échantillon, ou éventuellement celle de la surface de l'échantillon. Cette température ne règne pas dans toute la zone de congélation où elle doit croître régulièrement à partir de la surface pour atteindre environ 0° C sur le bord opposé de la zone de gel, suivant la loi de propagation de la chaleur.

A la limite de la zone elle-même, la congélation se produit donc aux environs de 0° C indépendamment de la température superficielle. Par contre le gradient de température au voisinage de cette limite dépend de la température dite de congélation, ou superficielle ; il convient de remarquer qu'il diminue si la profondeur de pénétration du gel augmente. La même observation est valable pour la vitesse de pénétration du gel. On peut donc se demander si la vitesse de gonflement des essais de Dücker ne dépend pas du gradient de température, plutôt que de la température superficielle ou d'une force de cristallisation hypothétique, dépendant elle-même de la température de surface.

Nous arrivons ainsi à la conclusion que les essais de Dücker ne constituent pas encore la preuve de l'existence d'une force de cristallisation.

3. *Théorie des forces de cohésion.*

Comme on vient de le voir, ni la théorie de la capillarité ni celle des forces de la cristallisation ne sont absolument satisfaisantes. Nous chercherons donc à aborder le problème sous un autre angle, en analysant les différents phénomènes qui se passent au moment de la congélation, et en les rattachant à des phénomènes physiques bien connus. Il faut pour cela bien connaître d'abord les données, et ensuite, si possible, les exprimer par des formules mathématiques. Nous chercherons alors dans une synthèse de ces éléments à établir une théorie du processus de la congélation.

a) *Naissance des cristaux. Formation de germes cristallins.*

La cristallisation de solutions ou de corps en fusion commence par la formation de ce qu'on appelle des « germes cristallins », à partir desquels les cristaux se développent jusqu'à ce qu'ils se soudent à d'autres ou atteignent une surface limite extérieure. Les essais montrent que dans des solutions peu sursaturées ou des métaux fondus refroidis à une température faiblement inférieure au point de fusion (34) (42), les germes se forment lentement ; ils se forment au contraire rapidement dans les conditions inverses.

Le sol dont les capillaires sont saturés d'eau constitue un système dispersé formé d'un minéral discontinu et d'eau, dont le second élément entre seul en cause pour la cristallisation. On peut bien admettre que pendant le refroidissement, la formation des cristaux de glace suit des lois analogues à celles qui ont été rappelées ci-dessus pour les solutions et les matières en fusion. Un refroidissement lent produira dans notre cas une formation faible et lente de germes cristallins, un refroidissement brusque, au contraire, une formation de germes rapide et intense.

Pour la formation des cristaux de glace dans le sol, les propriétés physiques suivantes sont également d'une importance capitale : Si la finesse de la phase dispersée augmente, la surface totale des grains par unité de volume augmente aussi ; la surface de contact entre ces grains et l'eau augmente par conséquent. Les deux phases en présence dans notre dispersion ne restent pas inertes ; il se produit des réactions de contact observées dans les phénomènes d'adsorption qu'on peut rattacher à la notion de capillarité dans son sens le plus large.

Dans la formation des lentilles de glace, un des effets les plus importants de l'énergie superficielle est l'abaissement du point de congélation de l'eau dans les terrains à grain fin, comme l'ont établi différents expérimentateurs (7). Si la dimension des pores n'est pas trop grande par rapport à celle des pellicules d'eau, la tension de l'eau d'imbibition augmente et le point de congélation s'abaisse. La formation de germes cristallins débutera en premier lieu dans les pores de grandes dimensions, où la tension de l'eau est faible ou même nulle.

Dans les terrains homogènes, les cristaux prendront naissance en des points placés dans les mêmes conditions thermiques. Le lieu géométrique des points de même température est l'isotherme, que dans les routes on peut admettre plus ou moins horizontale si on néglige l'influence de l'isolation résultant des tas de neige sur les côtés. Il en est de même, naturellement, pour le lieu géométrique des points de même gradient de température. Ainsi la glace a tendance à se former d'emblée en couches horizontales. Cette tendance peut être encore accentuée si les différentes couches du terrain sont elles-mêmes horizontales.

b) *Croissance des cristaux dans le sol. Formation des lentilles de glace.*

Quand un germe cristallin s'est formé dans un pore, si la chute de température est suffisante, il s'accroît aux dépens de l'eau d'imbibition du voisinage et atteint finalement la pellicule qui entoure le pore. Cette pellicule ayant un point de congélation inférieur à celui de l'eau libre, elle n'est pas gelée. En cédant de la chaleur, le cristal est capable d'arracher des molécules d'eau faiblement liées à la surface de la pellicule, et de se les incorporer. A toute pression extérieure correspond une épaisseur de pellicule déterminée, et l'eau soustraite de la pellicule doit être remplacée par l'eau libre environnante (qui n'est donc pas soumise à la tension superficielle) de manière à rétablir l'équilibre entre les forces d'adsorption

et les forces extérieures. Il s'établit un courant moléculaire à partir des pores non gelés, c'est-à-dire à partir du bas, vers les cristaux de glace qui se développent. Le courant subséquent de l'eau libre vers la pellicule est donc une conséquence de la cohésion moléculaire de cette pellicule.

Les conditions de formation et de croissance des cristaux de glace étant les mêmes sur chaque surface isothermique, il en résulte que dans les sols à grains fins, dont le point de congélation dans les pores est suffisamment abaissé, il ne se forme pas des cristaux isolés uniformément répartis dans l'espace, mais des couches horizontales de petits cristaux juxtaposés, qui donnent lieu, en se développant en hauteur, à de vraies couches de glace, les lentilles.

L'observation montre que les lentilles de glace peuvent aussi croître sous l'effet d'une pression extérieure, produite le plus souvent par le poids de la couche de terre située au-dessus ; il en résulte, comme on le sait, des gonflements à la surface des routes. Comme nous l'avons déjà exposé, on a cherché à expliquer cette croissance des cristaux par le jeu des forces dites de cristallisation. Nos considérations sur la répartition des tensions dans les pores et les pellicules nous conduisent bien plutôt à rechercher la cause de ces gonflements dans les forces moléculaires, idée qui avait été déjà émise depuis longtemps en partant d'un autre point de vue par Liesegang et Correns, et contrôlée par des essais intéressants (35) et (11).

Correns a montré que la croissance de cristaux d'alun chargés d'un poids dans leur eau-mère dépend de l'énergie superficielle libre des surfaces de contact des trois corps en présence : cristal, solution et récipient. Si le fond du récipient est en verre, le cristal croît en soulevant le poids dont il est chargé ; si l'on change les conditions énergétiques des surfaces limites en remplaçant le verre du fond par de la moscovite, la croissance s'arrête. Dans cette expérience, le soulèvement du poids peut être attribué incontestablement à l'énergie des surfaces limites.

Après avoir décrit qualitativement la formation des lentilles de glace, il nous reste à examiner la question de la rapidité de formation des germes cristallins et des gonflements qui en résultent. La congélation de l'eau libère 79,15 calories, c'est-à-dire environ 80 calories par gramme. A partir des lentilles de glace en formation consécutivement à la chute de température, cette chaleur doit être évacuée à la surface du sol et de là dans l'ambiance ; cette condition thermique fixe une limite supérieure à la vitesse de croissance des lentilles. Comme nous le montrerons au paragraphe suivant, cette vitesse est également limitée par des conditions hydrauliques et géotechniques, qui ne permettent pas aux lentilles de trouver pour leur croissance une quantité d'eau illimitée.

c) *Absorption d'eau.*

Le développement du processus de la congélation n'est pas fixé de manière absolue par les conditions thermiques. Les forces de cohésion obligent le film ou pellicule à remplacer l'eau qui lui a été soustraite. Cette absorption ou aspiration subséquente implique une dépression dans les pores, et l'eau doit être mise en traction.

L'apparition de tractions dans l'eau n'est possible qu'à l'intérieur d'éléments de volume assez petits pour que les forces moléculaires y soient prépondérantes et que les forces de masse familières à l'ingénieur n'y jouent plus qu'un rôle secondaire.

Le processus de l'absorption d'eau est un phénomène complexe qui dépend à la fois de facteurs géologiques et géotechniques et des propriétés chimiques et pétrographiques de la matière. Une analyse tenant compte de toutes ces influences nous conduirait trop loin et n'aboutirait probablement pas à un résultat pratique appréciable. Il semble plus utile de considérer la capacité d'absorption ou la force d'aspiration comme une caractéristique du sol. Si l'on réussit à fixer la valeur de cette constante, il sera possible d'effectuer un calcul, au moins dans un cas idéal, en admettant notre première hypothèse sur la relation entre la croissance des lentilles de glace et les conditions de température. La notion de capacité d'absorption engloberait aussi celle que Beskow et Keil appellent « capacité de migration de l'eau » (« Mobilisierbarkeit des Wassers ») (7) (26).

La théorie du gonflement doit donc considérer isolément deux phénomènes :

La formation des germes cristallins et la croissance des lentilles de glace sur la base des conditions thermiques, l'eau nécessaire étant prise à la pellicule qui entoure la couche de glace, et

Le remplacement de l'eau soustraite par l'action de contraintes de traction apparaissant dans les pores. Ce phénomène dépend des propriétés du sol. Le problème consiste à déterminer la valeur de la capacité d'absorption ou de la force d'aspiration.

Chapitre II.

Définition et détermination de la capacité d'absorption d'eau.

A. Notion de force d'aspiration.

1. *Généralités.*

Nous avons montré dans le chapitre précédent que le sol est capable, grâce aux forces moléculaires agissant dans les pellicules, de faire monter de l'eau du bas vers les lentilles de glace, et de vaincre les pertes de charge. Il est commode de se représenter la somme de ces forces moléculaires comme une force résultante unique, agissant sur une section à peu près horizontale. Son effet étant de produire un courant, elle doit constituer une pression ou une dépression, au sens de l'hydraulique et du mouvement des eaux souterraines ; on peut avec Siedeck lui donner le nom de force d'aspiration (56).

Il s'agit maintenant de savoir de quoi dépend cette

force d'aspiration ou cette capacité d'absorption encore hypothétique. Puisqu'elle est la résultante de réactions superficielles moléculaires, la surface totale des particules du terrain influencera sa valeur ; elle dépendra donc à première vue de la composition granulométrique du sol. On peut, en outre, admettre que c'est une caractéristique du sol, analogue à la perméabilité ou à la hauteur d'ascension capillaire.

Comme il a été dit au chapitre I au sujet des forces de cristallisation, les essais de Dücker ont montré que l'absorption d'eau dépend de la température de congélation (fig. 7). La force d'aspiration devrait donc aussi dépendre de la température, ce qui serait incompatible avec l'image que nous nous sommes faite de la nature de cette force.

On pourrait expliquer cette contradiction en admettant que la force agissante est bien constante, et que l'absorption d'eau dépend de la température pour d'autres raisons. Si nous considérons plus spécialement le début de la congélation, nous trouvons effectivement des raisons d'admettre cette hypothèse.

Le calcul de la force d'aspiration sur la base d'essais de gel suppose que l'absorption d'eau se fait de manière uniforme sur la section transversale du prisme vertical considéré dans le terrain, ce qui n'est possible dans la région située immédiatement au-dessous de la limite de gel, que dans le cas où les lentilles de glace (dont le rôle, au point de vue hydrodynamique correspond à des, « puits ») sont réparties uniformément sur la section. Or nous avons vu au chapitre précédent que dans le cas de refroidissement lent, la formation de germes cristallins est faible. C'est ce qu'on observe dans des essais de gel à température pas trop basse, où le gradient de température et par conséquent la vitesse de refroidissement sont faibles. Il se forme alors un nombre restreint de centres de cristallisation ; le nombre des « puits » tombant sur la section est faible, comme, par conséquent, la quantité d'eau aspirée, rapportée à la section totale. A des températures plus basses, correspondant à des gradients de température plus élevés et à un refroidissement plus rapide, la formation de germes est plus intense, la répartition des germes à la surface est plus dense. Dans le cas optimum, tous les cristaux élémentaires se soudent en une seule lentille et la force d'aspiration agit sur toute la section. La capacité d'absorption atteint sa valeur maximum. A température de congélation modérée, nous avons une faible densité des « puits », à basse température une forte densité, et dans le cas extrême, ces puits forment une couche perméable étendue. Notre hypothèse de calcul de la force d'aspiration s'applique seulement au cas extrême d'une distribution continue de lentilles sur toute la section horizontale.

Mais que se passe-t-il si la température de congélation est maintenue encore plus basse ? Du fait des forts gradients de température, le refroidissement est si rapide que les germes cristallins se forment bien en grand nombre, mais l'eau n'a pas le temps d'émigrer ; l'absorption et le gonflement diminuent.

Nous arrivons ainsi à la conclusion que les résultats des essais de Dücker peuvent aussi s'expliquer dans l'hypothèse d'une force d'aspiration indépendante de la température de congélation. La température n'aurait pas d'influence sur la force d'aspiration elle-même, mais seulement sur la grandeur de la surface où cette force peut agir.

2. *Détermination de la force d'aspiration sur la base d'essais de gel.*

Les essais en vue de la détermination de la gélivité du terrain réalisés par différents auteurs, ont consisté le plus souvent à déterminer le gonflement de petits échantillons de terrain dont la base trempait dans un récipient dont l'eau pouvait être aspirée par les lentilles de glace dans la partie supérieure de l'éprouvette. Si la perméabilité k_D est connue par ailleurs, la force d'aspiration hypothétique que nous appellerons P_s peut se calculer comme suit sur la base des essais :

La quantité d'eau V correspondant à une hauteur de gonflement h est égale, compte tenu de la dilatation de la glace, à

$$V = \frac{h \,.\, F}{1{,}09}$$

où F représente la section de l'échantillon.

En divisant la quantité d'eau V par la durée t de l'essai, on obtient le débit par unité de temps Q :

$$Q = \frac{h \,.\, F}{1{,}09 \,.\, t}$$

ou le débit spécifique

$$v = q = \frac{Q}{F} = \frac{h}{1{,}09 \,.\, t}.$$

v est la vitesse de passage de ce courant.

Si l'on admet la loi de Darcy, il vient :

$$v = k_D \,.\, J$$

La perte de charge J est liée à la force d'aspiration, respectivement à la sous-pression P_s; si l'on désigne par l la distance des lentilles de glace à la nappe préatique et γ_w le poids spécifique de l'eau

$$J = \frac{P_s}{\gamma_w \,.\, l}$$

où il faut remarquer que l'on ne doit pas tenir compte de la différence de pression due au poids propre, cette force étant équilibrée par les forces de capillarité et et autres forces d'absorption avant la formation des lentilles déjà.

Il vient ainsi :

$$v = k_D \,.\, \frac{P_s}{\gamma_w \,.\, l} \qquad (1)$$

ou

$$\frac{P_s}{\gamma_w} = \frac{v \,.\, l}{k_D} = \frac{h \,.\, l}{1{,}09 \,.\, t \,.\, k_D} \qquad (2)$$

A l'aide de cette équation, on peut calculer la force d'aspiration P_s dès qu'on connaît la hauteur de gonflement déterminée par les essais. C'est ce que nous avons fait pour une série d'essais publiés par Dücker. Pour classer les résultats, nous avons cherché à les exprimer en fonction d'autres propriétés géotechniques de chaque échantillon. La perméabilité k_D s'y prête particulièrement bien ; nous avons reporté graphiquement à l'échelle logarithmique la valeur calculée de $\frac{P_s}{\gamma_w}$ en ordonnée et celle de la perméabilité k_D en abcisse (fig. 8).

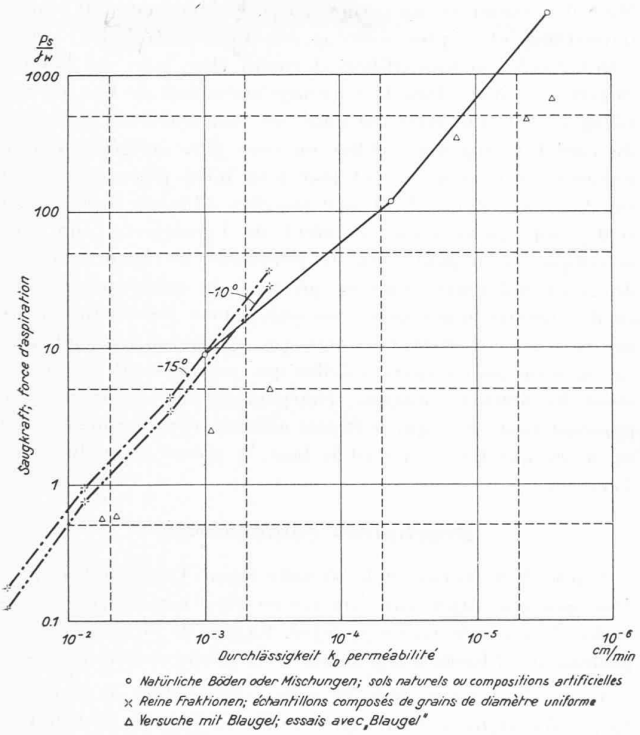

Fig. 8. — Détermination de la force d'aspiration $\frac{P_s}{\gamma_w}$ d'après les essais de congélation de Dücker. $\frac{P_s}{\gamma_w}$ en centimètres.

Les points ainsi obtenus se trouvent à peu près sur une droite. Il y a donc une relation plus ou moins fixe entre ces deux grandeurs, ce qui nous pousse à admettre que la force d'aspiration est une caractéristique du terrain. L'échelle logarithmique produit une importante déformation du dessin et pour de petites valeurs de k_D, on peut avoir de notables dispersions que le graphique ne montre pas suffisamment. On ne peut donc pas compter que pour toute valeur donnée de la perméabilité on puisse déterminer aussi exactement la force d'aspiration. La composition chimique, la stratification, la composition granulométrique et d'autres contingences peuvent également intervenir et modifier la relation simple entre P_s et k_D. Comme d'autres caractéristiques des terrains, la valeur de la force d'aspiration ne peut être déterminée que par voie expérimentale de cas en cas. Le graphique de la figure 8 n'en donne qu'une image générale.

Cette méthode de détermination de la force d'aspiration est purement phénoménologique et ne présume rien de la nature de cette force. La comparaison des effets du gel observés dans la nature et de ceux évalués par le calcul en admettant l'action d'une force d'aspiration montrera si notre définition a réellement un sens physique.

(A suivre).

ASSOCIATION AMICALE DES ANCIENS ÉLÈVES DE L'ÉCOLE D'INGÉNIEURS DE LAUSANNE ET SOCIÉTÉ VAUDOISE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

Les manifestations de l'hiver 1942-43.

C'est à l'Association amicale des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs, que préside actuellement M. le professeur *P. Oguey*, qu'incombe cet hiver l'organisation des manifestations de nos groupements techniques.

Parmi les conférences et les excursions ayant déjà eu lieu, il en est certaines qui méritent mention dans notre périodique. Citons pour mémoire la visite des installations récemment modernisées de l'*Usine à gaz de Lausanne*, visite qui, quoique ne comportant aucun exposé technique, fut particulièrement intéressante étant donné les problèmes compliqués qui ont dû être résolus par les dirigeants de notre industrie gazière pour faire face au manque de houille. Notre collègue M. *Logoz*, directeur de l'Usine, ainsi que ses collaborateurs, eurent ainsi l'occasion d'indiquer à un public particulièrement nombreux et compréhensif, avec quel succès, mais aussi quelles difficultés, on était parvenu à mettre au point la distillation du bois et la récupération de nombreux sous-produits.

* * *

Plus récemment, nos associations répondaient à l'invitation de M. *Ed. Meystre*, ingénieur, directeur de la Compagnie générale de navigation. Celui-ci présenta à nos milieux techniques le bateau « Léman », achevé cette automne dans les chantiers d'Ouchy et dont la machinerie est originale à plus d'un titre. Il s'agit en effet d'une unité propulsée non plus par des roues à aubes mais par deux hélices actionnées par moteur Diesel ; la marche étant réglée de la passerelle en actionnant à distance l'inclinaison des pales. Nos lecteurs trouveront ici-même prochainement la description du « Léman », texte que veut bien rédiger pour le *Bulletin* M. Meystre lui-même.

* * *

Dès lors, deux conférences d'un caractère plus académique ont remporté le plus franc succès. Depuis de nombreux mois déjà, le Laboratoire d'électricité de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne et plus particulièrement son directeur, M. le professeur *E. Juillard*, poursuit avec la collaboration de la maison Paillard de Sainte-Croix de très intéressantes recherches visant à perfectionner les appareils projecteurs et les appareils de prise de vue de cinéma sonore. De très grands progrès ont ainsi été réalisés plus spécialement en ce qui concerne l'appareil pour projection de films sonores de 16 mm. M. le professeur Juillard s'était, il y a quelques années déjà, au sein de nos associations, fait remarquer par la clarté et la simplicité avec lesquelles il était parvenu à exposer à un public non spécialisé les problèmes les plus complexes de la radio-technique. Cette fois encore il remporta un très grand