

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 72 (1946)
Heft: 13

Artikel: Contribution à l'étude expérimentale de la formation de lentilles de glace dans le sol
Autor: Daxelhofer, J.-P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-54628>

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>

Contribution à l'étude expérimentale de la formation de lentilles de glace dans le sol

par J.-P. DAXELHOFER, ingénieur E. I. L.

«... the remarkable phenomenon... of water passing from a region of less than atmospheric pressure in the wet pores of the earth into a place and conditions in the base of columns of ice where it was subject to more than atmospheric pressure... appear to involve considerations of scientific interest and to afford scope for further experimental and theoretical researches¹ ».

JAMES THOMSON, 1871.

La formation de couches de glace pure dans un sol imbibé d'eau est à la base du soulèvement des chaussées, sous l'influence du gel. Les divers phénomènes qui accompagnent le gel de terrains ou de matériaux de construction et produisent une altération de leur caractéristiques physiques et mécaniques initiales sont connus sous le nom de *gélivité*.

Le gel cause de graves et coûteux dégâts chaque année aux revêtements des chaussées modernes. Mais il est aussi la cause de beaucoup de glissements superficiels de talus naturels ou artificiels. Il altère certaines pierres de construction et même certains bétons. De nombreux essais en laboratoire ont été exécutés dans le monde entier pour chercher à isoler les différents facteurs entrant en jeu, afin de pouvoir prendre des précautions contre ces effets nocifs.

S. Taber² est le premier qui ait obtenu expérimentalement

¹ «... le phénomène remarquable... de l'eau passant des pores humides du terrain où règne une pression inférieure à la pression atmosphérique, à la base des colonnes de glace où elle est soumise à une pression supérieure à la pression atmosphérique... semble impliquer des considérations d'un intérêt scientifique et offrir un but à d'ultérieures recherches expérimentales et théoriques ».

² STEPHEN TABER : 1° « Ice forming in clay soils will lift surface weights », *Eng. News Rec.* vol. 80, 1918, 7 février, p. 262. — 2° « Frost heaving » *The Journal of Geology*, vol. XXXVII, 1929, p. 428. — 3° « The mechanics of frost heaving », *id.*, 1930, p. 305.

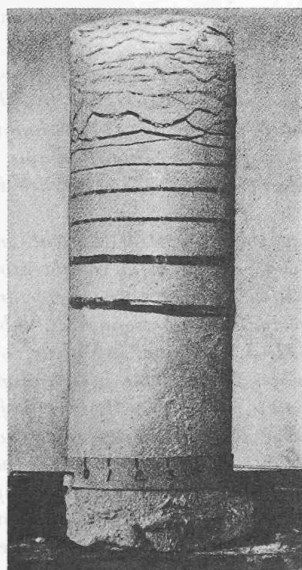


Fig. 1. — Lentilles de glace obtenues par Taber en 1930. L'échantillon était placé dans un cylindre continu en carton.

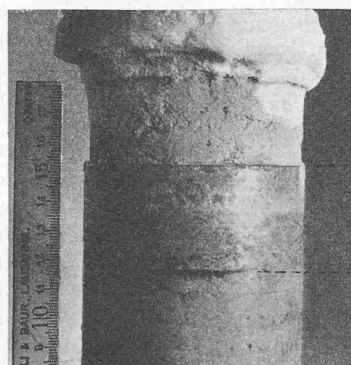


Fig. 2. — Gonflement obtenu au Laboratoire de Lausanne, sur échantillon dit « Pierre morte » placé dans un cylindre continu, lubrifié et transparent.

Teneur en eau : terrain non gelé 28,5 %.
Zone inférieure gelée 177 %. Zone centrale gelée 100 %. Zone supérieure 54,5 %.

des lentilles de glace pure, (phénomène de ségrégation). On connaît diverses règles qui permettent de juger si un terrain est gélif ou non et de nombreux expérimentateurs ont obtenu par la suite des lentilles de glace ou même de corps différents de l'eau. Toutefois les conditions de leur formation sont encore mal connues. Il n'est pas possible de dire où et quand se formera une lentille de glace, ni de prévoir leur épaisseur ou leur nombre.

Taber, déjà, a tenté d'expliquer ce *phénomène discontinu* de la formation de lentilles successives, alors que le gonflement observé est continu.

Nous avons eu la chance de pouvoir provoquer la formation de ces lentilles dans quelques cas particuliers. Il est donc désormais possible de déterminer les conditions de leur formation et un pas important a été fait dans l'étude de ce phénomène complexe. Ce résultat a pu être obtenu grâce à un nouveau dispositif expérimental. C'est la raison pour

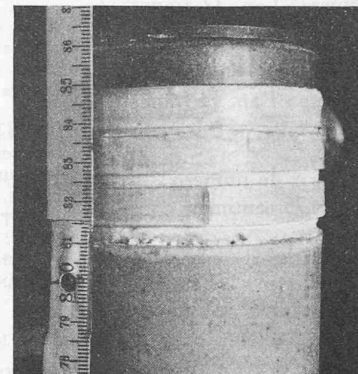


Fig. 3. — Essai sur poudre de quartz placée dans un cylindre composé d'anneaux superposés de 1 cm de hauteur. Noter la fissure. Epaisseur initiale 3 cm, finale ~ 4 cm

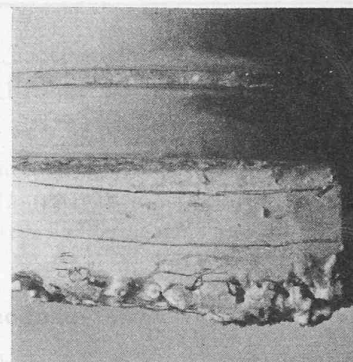


Fig. 4. — Détail de la figure 3. Noter les lentilles de glace et l'irrégularité de la surface d'arrachement correspondant à la fissure.

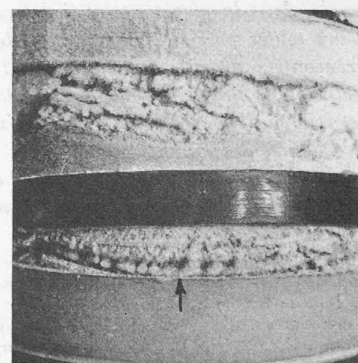


Fig. 5. — Gonflement sur « Pierre morte ». Epaisseur des anneaux 1 cm. La flèche situe une fissure dans laquelle croissent des cristaux de givre.

laquelle il nous semble utile de décrire l'appareillage le plus souvent utilisé pour ces essais de gélimité sur les terrains et le nouvel essai qui permet l'observation facile des phénomènes.

Tous les essais effectués depuis Taber ont porté essentiellement sur des cylindres de terrain, dont l'une des bases, généralement la base supérieure est soumise au froid, l'autre étant maintenue à une température supérieure à 0° variable suivant les cas. La base inférieure baigne généralement dans l'eau, afin d'assurer l'alimentation des lentilles en formation. Le cylindre de terrain est contenu dans un tube continu ou discontinu (anneaux) en carton imperméable ou en verre (fig. 1 à 5). Les cylindres continus doivent être lubrifiés par un corps incongelable. Ils présentent l'avantage de maintenir le terrain dans un état de sollicitations capillaires constant. Ce n'est pas le cas si l'on utilise des anneaux superposés.

Dès qu'un anneau se soulève par suite du gonflement du terrain qu'il contient, une sollicitation latérale intervient, qui s'ajoute aux sollicitations précédentes.

Ces sollicitations supplémentaires paraissent troubler le phénomène et donnent naissance à des fissures horizontales en correspondance des anneaux, si bien qu'à la fin de l'expérience, il est difficile d'affirmer que des lentilles de glace ne se sont pas produites dans ces fissures préexistantes (fig. 2, 3, 5).

Un autre inconvénient de ce système d'essai est la difficulté que représente le remplissage homogène des cylindres. Le plus souvent le cylindre ou la pile d'anneaux est rempli avec soin par couches successives et le terrain pulvérulent est saturé ensuite par ascension capillaire, afin d'éliminer le plus possible la présence de bulles d'air à l'intérieur du cylindre d'essai. Dès que l'on opère avec des sols fins argileux, la saturation se fait extrêmement lentement et peut durer plusieurs semaines. Il n'est pas exclu que ce système ne provoque des discontinuités à l'intérieur du cylindre. Enfin, si l'on opère sur des échantillons comprimés, l'état de sollicitation se modifie lorsque l'échantillon est placé en contact avec une nappe d'eau.

L'observation des gonflements et de la formation éventuelle de lentilles de glace pure ne peut guère se faire que d'une façon *discontinue*. Ces essais durent longtemps (plusieurs jours). L'échantillon est placé dans une chambre froide où l'observation n'est ni commode, ni confortable. Si on le sort pour l'examiner, ou prendre des mesures, on modifie beaucoup les conditions thermiques. En général, le récipient

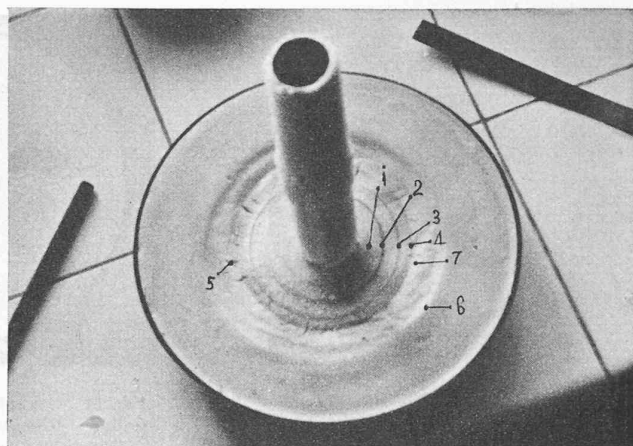


Fig. 6. — Vue générale du nouveau dispositif expérimental.

1, 2, 3, 4 : lentilles successives à 8 mm, 15-16 mm, 22 mm et 39 mm du tube (largeur de la 2^{me} lentille = 1 mm). — 5 : fissure de retrait radiale. — 6 : limite d'influence. — 7 : limite du gel à 31 mm de la paroi extérieure du tube.

(cylindre ou anneau) n'est pas constitué par un matériau transparent, ou, si c'est le cas, il est très facilement couvert de givre ou de glace qui empêche ou gêne l'observation. On peut repérer facilement la position des diverses lentilles, la profondeur atteinte par le gel et les gonflements qui sont les principaux éléments entrant en jeu, pour la détermination des coefficients de gélimité. Mais il est très difficile, sinon impossible, d'examiner en détail la formation et la croissance d'une lentille. *Seul l'état final est parfaitement net et bien déterminé* parce qu'en général l'échantillon est scié suivant un diamètre. Les essais, par suite du dispositif expérimental lui-même ne peuvent guère porter que sur des terrains dont la teneur en eau est dans le voisinage ou légèrement supérieure à la limite de liquidité. Il est clair que si l'on voulait utiliser le même dispositif expérimental pour des terrains fluides ou des suspensions, la décantation d'une part et la consolidation du sédiment d'autre part produiraient une hétérogénéité dans l'échantillon¹.

¹ En réalité les terrains de fondation des routes ne sont pas fluides — sauf au dégel s'ils sont gélifs — mais il est intéressant de pouvoir faire des essais avec des teneurs en eau très variables et examiner ce qui se passe dans les cas limites.

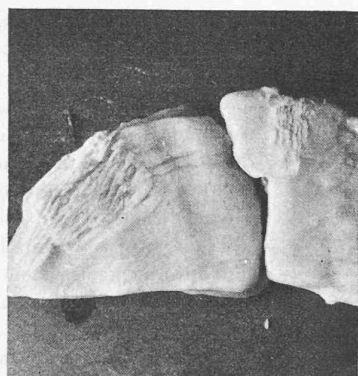


Fig. 7. — Essai de congélation d'une suspension de bentonite contenant des corps hétérogènes gélifs déjà feuilletés.

À gauche, l'échantillon placé parallèlement aux isothermes a gonflé de 6 mm à 14,5 mm. L'échantillon de droite placé radialement a marqué un très faible gonflement, 6 mm à 7,5 mm.

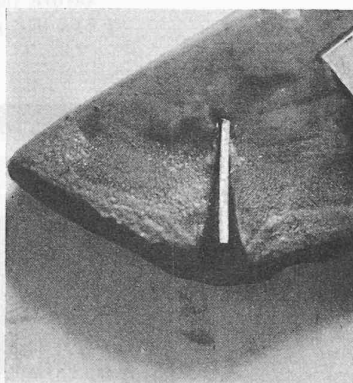


Fig. 8. — Influence d'une lame métallique (aluminium, bon conducteur) placée radialement. Noter la déformation des isothermes, les parties noires sont de la glace pure.

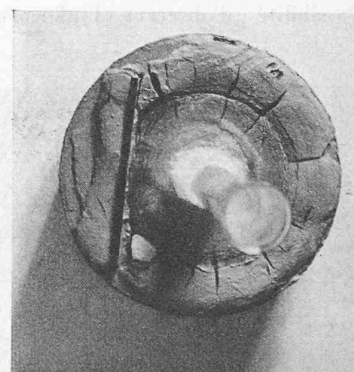


Fig. 9. — Le gel a repoussé la lame métallique. Noter le glissement produit au-delà. Les lentilles sont déformées dans son voisinage et sont parallèles à la lame. Fissures de retrait radiales.

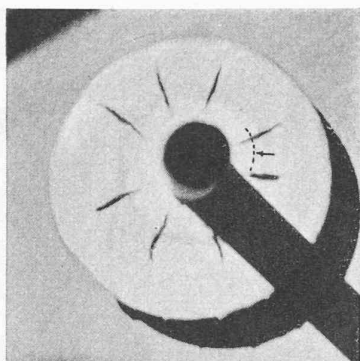


Fig. 10. — « Pierre morte ». Fissures de retrait radiales et centrifuges. Lentilles à 11 mm du tube ; limite du gel à 15,5 mm.

$$W_L = 22,3 \% \quad W_p = 21,4 \%$$

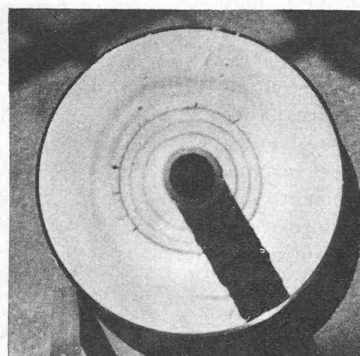


Fig. 11. — Kaolin. Fissures de retrait radiales et centrifuges et lentilles de glace pure.

$$W_L = 45,2 \% \quad W_p = 34 \%$$

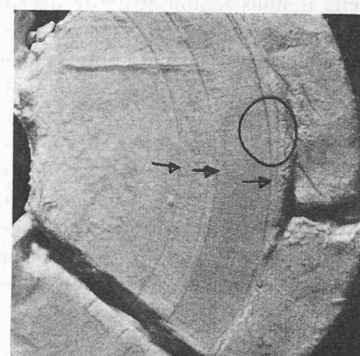


Fig. 12. — Kaolin. Fissures de retrait radiales dans la zone gelée (type b).

Nouveau dispositif expérimental.

Le dispositif utilisé pour nos essais est extrêmement simple. Il se compose essentiellement d'une sorte de soucoupe cylindrique d'environ 20 cm de diamètre et de 4 à 5 cm de hauteur, dans l'axe de laquelle est fixé un tube congélateur (fig. 6). Ce tube est fixé au moyen d'une couche de matière assez bonne conductrice de la chaleur, afin d'avoir un flux thermique régulier autour du dit tube. Au-dessus de cette couche on place le terrain à étudier. Un mélange réfrigérant est introduit dans le tube central (en métal, bon conducteur de la chaleur). Suivant les cas, la couche de terrain étudié peut être ou non surmontée d'une couche d'eau, c'est-à-dire que l'essai peut se faire avec ou sans intervention de phénomènes capillaires.

On note la vitesse avec laquelle le gel se propage radialement autour du tube (fig. 6).

Ce système expérimental présente les avantages suivants :

1. Remplissage facile et aussi homogène qu'on le désire (couche mince.)
2. Possibilité de suivre à chaque instant la progression du gel et de noter l'apparition de lentilles ou de fissures en un point quelconque de l'échantillon examiné.
3. Essai rapide si l'on utilise un mélange réfrigérant à basse température. (Pour geler une épaisseur d'environ 5 cm. autour du tube, il faut de deux à trois heures, suivant la nature du sol considéré.)
4. Possibilité d'observer l'influence d'une discontinuité

quelconque ou d'un corps étranger (fig. 7, 8 et 9) à l'intérieur du terrain essayé.

5. Possibilité de faire des essais avec des teneurs en eau très élevées et des suspensions stables, aussi bien qu'avec des terrains relativement compacts.
6. En modifiant légèrement le dispositif utilisé jusqu'alors, il est possible de faire des essais de congélation avec un terrain placé dans un état de sollicitation déterminé, tout en assurant une alimentation d'eau.

Principaux résultats obtenus jusqu'à ce jour.

A. Le résultat le plus intéressant est l'obtention de lentilles de glace en un point déterminé (fig. 6). L'apparition d'une lentille de glace semble être liée à une courte période de dégel. Des mesures de température nous permettront de préciser ce point très important et de déterminer le gradient thermique optimum pour qu'une lentille de glace se produise.

B. L'étude de l'influence de l'aspiration d'eau sur la formation de fissures. Nous avons pu observer quatre sortes de fissurations :

a) Les fissures radiales de retrait, qui prennent naissance au contact de la glace et se propagent jusqu'à une certaine distance au delà, qui correspond à la zone influencée par l'aspiration d'eau. Ces fissures peuvent se produire aussi bien sous l'eau que si le sol est plus ou moins saturé (fig. 10 et 14).

b) Les fissures radiales de retrait, qui se produisent dans la zone périphérique gelée. Ces fissures, beaucoup plus fines et régulièrement réparties que les précédentes, proviennent aussi d'un phénomène de retrait qui doit être en rapport avec le fait qu'une partie seulement de l'eau contenue dans le sol est gelée à une certaine température ; au fur et à mesure que le gel s'étend, la température baisse et une plus grande partie d'eau interstitielle gèle (fig. 12). Cette eau est liée plus

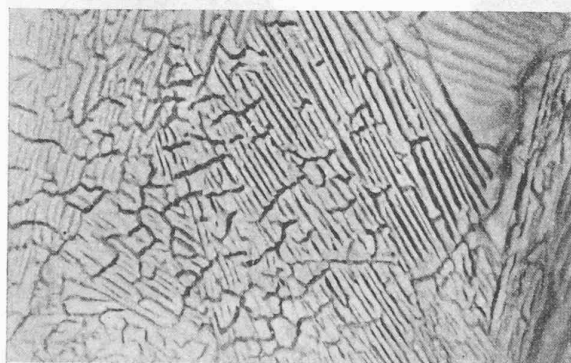


Fig. 13. — Texture typique d'une suspension de bentonite (coupe \perp au sens de propagation du froid). Les zones noires sont de la glace pure.

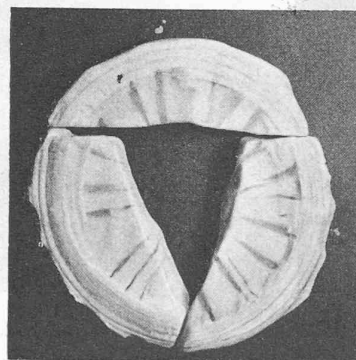


Fig. 14. — Fissures radiales (du type d) obtenues dans du kaolin.

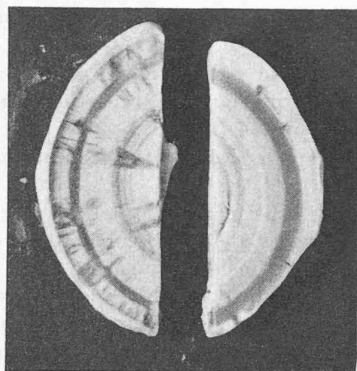


Fig. 15. — Lentilles et fissures obtenues sous l'eau.

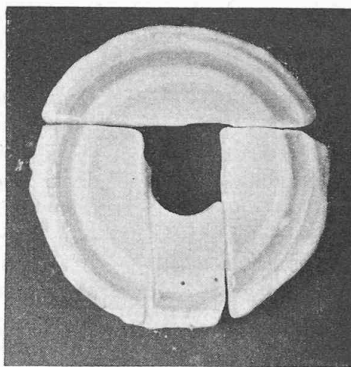


Fig. 16. — Lentilles de glace pure, conséquence du dégel et du regel. Largeur variable 6,5 à 7 mm. Suspension de kaolin.

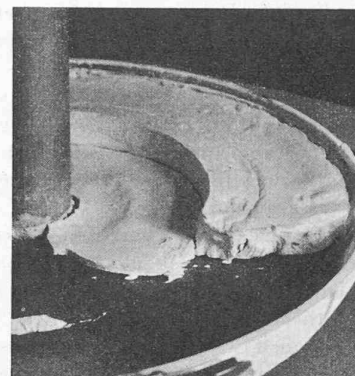


Fig. 16 bis. — Dispositif expérimental après séchage à l'air montrant :
1° L'effet défloculant du gel sur pâte de kaolin 100 % d'eau.
2° La propagation radiale régulière du froid. La différence de niveau correspond à la limite du gel.
3° La fissure située au delà indique la limite de la zone influencée par l'aspiration d'eau vers la zone gelée (essai effectué en présence d'une mince couche d'eau surmontant le kaolin).

solidement aux grains du terrain par les forces moléculaires (eau adsorbée) et semble ne pas se comporter comme l'eau naturelle, en ce qui concerne le gonflement, par suite du passage de l'état liquide à l'état solide.

c) Des fissures radiales dues au gonflement produit par le gel apparaissent à la périphérie de l'échantillon considéré, là où l'allongement relatif est maximum (centripètes).

d) Des fissures radiales, qui tendent à s'élargir petit à petit et qui prennent naissance immédiatement en dehors de la zone gelée, mais ne se propagent pas beaucoup au delà. Ces fissures se marquent dans la zone gelée et augmentent au fur et à mesure que le gel progresse. Ce phénomène s'observe surtout en présence de terrains floclés, avec une forte teneur en eau (fig. 14).

C. La formation de couches d'eau pure dans des sols à forte teneur en eau par suite du dégel (fig. 15 et 16). Lorsque le gel a atteint une certaine limite et que l'on cesse de produire du froid, on observe le phénomène suivant :

A la limite de la zone gelée, dès que le dégel se manifeste, il y a séparation entre la zone gelée et le terrain adjacent, avec apparition d'une couche d'eau. Si on laisse dégeler, cette séparation augmente petit à petit. Tout se passe comme si les particules solides contenues dans la glace ne pouvaient plus sortir.

Nous avons obtenu de cette façon des couches d'eau

jusqu'à 4 mm d'épaisseur. Le même phénomène se produit autour du tube, étant donné qu'il est en métal bon conducteur de la chaleur et que l'essai se fait à la température ambiante.

D. Le gel est une action physico-chimique très nette sur les terrains. Il doit s'agir d'une défloculation très marquée (fig. 16 bis). La texture de la partie gelée n'est plus la même qu'auparavant et si l'on regèle ce terrain, d'autres phénomènes se manifestent.

E. Influence de

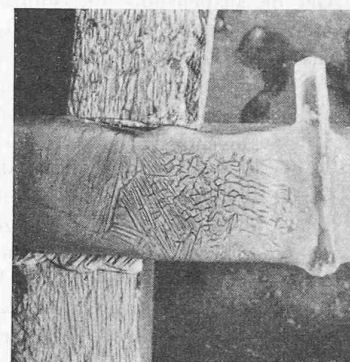


Fig. 19. — Vue latérale à la limite du gel (essai fig. 18 bis).

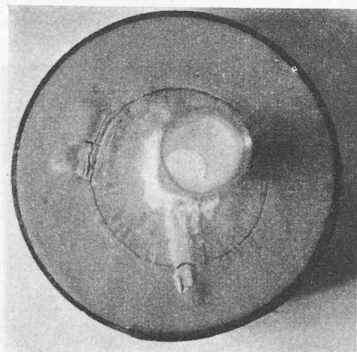


Fig. 17. — Corps hétérogène placé dans une suspension de bentonite, radialement et sur la circonférence. La fissure de 2 mm marque le contour de la zone gelée. Noter l'irrégularité de la surface gelée. (10 % bentonite).

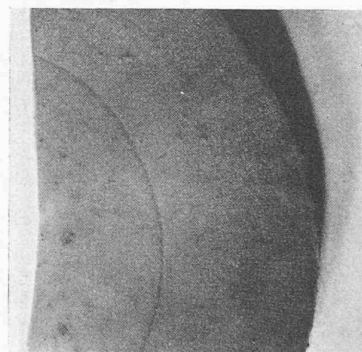


Fig. 18. — Suspension thixotrope très dense de 5 % bentonite, plus 5 % ciment Portland.

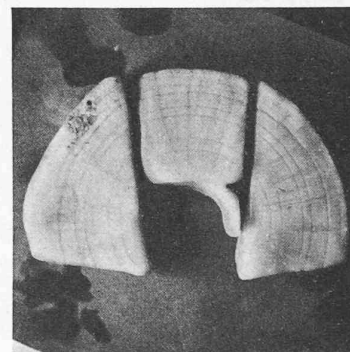


Fig. 18 bis. — Gel et formation d'anneaux d'une suspension de bentonite (10 %)

$W_L = 609\%$ $W_p = 47\%$

discontinuité. Divers corps étrangers ont été placés soit perpendiculairement, soit parallèlement aux isothermes. Les observations suivantes ont été faites :

En présence de matériaux gélifs, à structure probablement feuilletée dans un certain sens, le gonflement observé est très important lorsque le corps est disposé parallèlement aux isothermes (fig. 17). S'il est placé radialement le gonflement est beaucoup moins net ou nul, mais il se produit une fissure et une rupture perpendiculairement aux schistosités. Si l'hétérogénéité est constituée par un corps homogène bon conducteur de la chaleur, placé radialement, l'allure des isothermes est modifiée et il se produit lentement une ségrégation d'eau pure (fig. 8). Alors que si la même lame métallique est placée perpendiculairement, il ne se produit rien de particulier. Si la lame métallique est beaucoup plus grande, la déformation des isothermes et par suite des lentilles qui peuvent se former est très importante et le corps étranger est repoussé petit à petit jusqu'à ce que la quantité de froid soit suffisante pour qu'il soit englobé dans la zone gelée (fig. 9).

Dans certains terrains gélifs, un trou cylindrique s'allonge dans le sens de propagation du froid (phénomène déjà observé par Taber). Il est l'amorce d'une fissure. Un trou de 2 mm de diamètre s'allonge à 4 mm.

Un sillon tracé à la limite du gel et parallèlement aux isothermes s'élargit et donne naissance à des fissures de retrait. (La largeur du sillon passe de 1 mm à 5 mm.)

F. Gel de suspensions ou solutions colloïdales. Divers essais ont été entrepris afin de voir si les phénomènes ne sont pas plus nets ou exagérés en présence de dispersions plus ou moins denses. Voici quelques résultats obtenus sur des suspensions plus ou moins diluées ou des gels :

- Une suspension à 10 % de bentonite, gèle avec formation d'une cristallisation radiale nettement visible. La surface de la partie gelée ne demeure pas lisse ; elle est finement plissée. Tant que le gel progresse, on ne note aucune interruption, mais un arrêt provoque la formation d'anneaux très nets (fig. 18 et 18 bis). Une séparation semble se faire aussi dans le sens radial et la texture a un aspect caractéristique (fig. 19 et 13).
- Des lentilles de glace pure sont obtenues avec une pâte fluide de chaux vive éteinte dont les particules sont très fines¹, ($\sim 50\% < 1\mu$).
- Un gel de silice est détruit par le gel, mais malgré sa fragilité aucune fissure n'apparaît.

¹ D. BISHOP : « Particle size and pasticity of lime », *Journal of Research*, août 1939, p. 285.



Fig. 20. — Discontinuité obtenue dans une suspension de bentonite contenant du sable grossier.

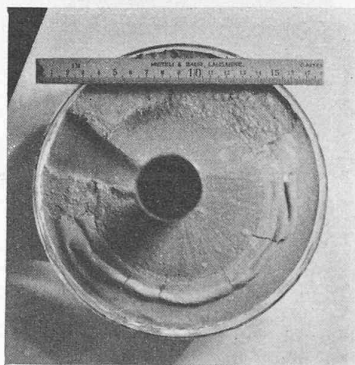


Fig. 21. — En présence d'une croûte, le gel produit un déplacement. Sous l'ondulation, la surface des terrains est demeurée horizontale.

- La présence de grains de sable n'empêche pas la formation de discontinuités (fig. 20).
- S'il se forme une croûte à la surface, il y a mouvement de la croûte seule et des phénomènes tangentiels qui n'intéressent que cette croûte (fig. 21).

Un phénomène analogue a été observé à la surface de la chaux éteinte.

- L'effet défloculant du gel est très net avec des suspensions diluées. Après dégel, une épaisseur initiale de 10 mm se réduit à 3 mm mais uniquement dans la partie dégelée. L'intersection entre les deux zones demeure parfaitement nette et verticale, ce qui montre que la propagation de la chaleur est régulière (fig. 16 bis).
- Lorsqu'une couche d'eau pure a été obtenue par dégel et que l'on règle le système, on remarque que la paroi extérieure, qui marque la limite extrême atteinte par le gel, se fissure un peu avant que la glace n'ait rejoint cette paroi. Il y a une sorte de répulsion produite par la glace pure. Un sillon de 4 mm fut élargi de la sorte à 5,5 mm soit une augmentation de 1,5 mm. C'est probablement à ce phénomène de répulsion qu'il faut attribuer les anneaux de glace pure que l'on note à la base des « galettes » gelées (fig. 22).

En effet, au dégel, les grains solides se décantent au fond du sillon par suite de l'action défloculante du gel. Lorsqu'on règle, ce phénomène de répulsion se manifeste à un certain degré, qui doit dépendre lui aussi du gradient thermique, ce qui explique la formation des anneaux inférieurs.

Mécanisme de la formation de lentilles de glace.

Nous ne voulons pas tenter ici de donner une explication complète de ce mécanisme. Comme le remarquait déjà Taber en 1930, une connaissance plus précise de la constitution de l'eau et de ses propriétés près du point de congélation, ainsi que dans les « films » minces adsorbés à la surface de grains solides est nécessaire pour en pénétrer le mécanisme intime.

Les explications proposées par divers auteurs sont des images commodes où très souvent des dénominations différentes sont données aux mêmes choses. Seule l'expression mathématique change. Nous laissons aux physiciens le soin de préciser si ce sont des forces de cohésion, de capillarité, de cristallisation, d'absorption, etc.

En nous basant uniquement sur les faits observés, nous pouvons dire ceci :

- Pour qu'une lentille s'amorce et qu'il y ait ségrégation de glace, il semble qu'une période de dégel, si courte soit-

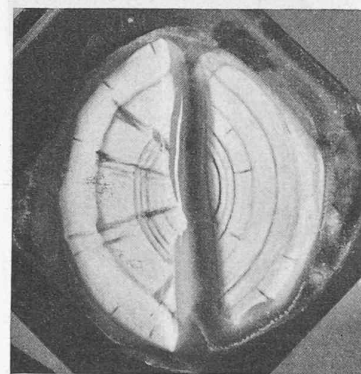


Fig. 22. — Figure 15 vue de dessous.

elle, soit nécessaire, au moins dans nos conditions expérimentales. Il ne s'agit peut-être que d'un gradient thermique très faible que nous nous proposons encore de mesurer.

2. Ce dégel, par suite de la propriété de la glace d'absorber des particules, des sels ou des gaz, quand elle fond et de les repousser quand elle gèle, donne naissance à un *film d'eau*, que nous avons toujours observé au cours de nos nombreux essais.

Si le gel progresse à nouveau, il se produit une couche de glace pure qui tend à s'agrandir si des conditions thermiques favorables sont remplies.

3. Dans certains terrains, il n'est pas possible d'obtenir une *lentille unique* et bien caractérisée. Il se forme une série de lentilles voisines plus ou moins fines, qui donnent naissance à une texture rubanée plus ou moins serrée (fig. 23). Ce fait paraît être en relation avec la granulométrie du matériau considéré. Les grains grossiers n'étant plus influencés par la glace, il ne peut se former une couche d'eau continue. Tous les expérimentateurs ont noté que plus le terrain est fin et plus il est facile d'obtenir la ségrégation de glace pure. Taber déclare qu'au-dessous de 2 microns (sauf pour le quartz) la formation de lentilles de glace pure est assez facilement obtenue en laboratoire, si les conditions thermiques et hydrauliques sont favorables. (Précisons qu'elles se forment d'elles-mêmes et qu'on peut les observer, mais que jusqu'à ce jour on n'a pu en provoquer la formation.)

Un autre facteur qui intervient dès que les grains dépassent une certaine dimension, par rapport aux cristaux de glace, est la transmission de chaleur; alors qu'elle se propage régulièrement dans un sol fin, il n'en est plus de même localement, lorsqu'il y a des grains. Ces derniers sont en général meilleurs conducteurs que l'eau, leur température atteint zéro degré avant l'eau des pores. Ils s'entourent d'une couche de glace et la transmission du froid est alors rayonnante autour des grains et n'est plus à une seule dimension.

4. Il est d'autant plus facile de provoquer la formation de lentilles que le sol est plus fin et qu'il est plus perméable.

Il semble donc que l'explication de la croissance des lentilles par alimentation à travers des pellicules d'eau adsorbée conduit à des conclusions fausses.

En effet si la circulation des molécules d'eau se produit par l'intermédiaire des pellicules d'eau adsorbée à la surface des grains fins, il doit en résulter tout naturellement que plus cette pellicule est épaisse et plus la formation de lentilles et leur croissance sera facile. Or, cette conséquence de l'hypothèse précédente est infirmée par les résultats de nos essais et par ceux antérieurs de Ducker.

Il est difficile d'obtenir des lentilles dans une suspension de bentonite à 10 % de matière solide. Il s'en forme de très minces (voir fig. 18 et 18 bis) mais elles ne croissent pas. Cela provient du fait que l'eau adsorbée est liée moléculairement aux grains solides. Cette structure particulière n'est rompue que par agitation mécanique (effet thixotropique). Ces gels sont très peu perméables malgré une teneur en eau de 1000 % (comptée en poids par rapport à la matière solide).

Dans les gels de silice, même observation. Plus une argile est grasse et plus les films d'eau adsorbée à la surface des grains sont épais, mais plus elle est imperméable.

Ducker a aussi montré en reprenant certains résultats de Endel et collaborateurs que le gonflement dû au gel est plus grand pour la poudre de quartz que pour le kaolin, de même pour la bentonite de calcium que pour la bentonite de sodium. Pour une granulométrie donnée, plus l'épaisseur des pellicules d'eau est faible ou ce qui revient au même, plus l'activité chimique des grains constituant le sol est faible, et plus le sol est gélif.

Ducker a fait des essais de gel sur divers mélanges comprenant neuf parties de quartz moulu auquel on ajoute une partie de kaolin, de bentonite de calcium ou de sodium. Le gonflement diminue très sensiblement du kaolin à la bentonite de sodium.

Notre type d'essai permet de suivre assez facilement ce phénomène. Si le sol est perméable, il se forme autour de la zone gelée une auréole mate due à l'aspiration de l'eau. Cette auréole est nulle avec une suspension de bentonite, elle est maximum avec de la poudre de quartz, très sensible avec le kaolin.

Il n'est donc pas possible à notre avis de faire intervenir les pellicules d'eau adsorbée autour des grains pour expliquer l'alimentation en eau des lentilles de glace. C'est bien plutôt l'eau libre qui est aspirée, et *moins il y a d'eau adsorbée et plus la formation de lentilles est facile*.

Ce fait est du reste en plein accord avec le bon sens. Donc plus un terrain est fin et en même temps perméable, plus il est gélif.

On comprend alors pourquoi les sols calcaires sont plus gélifs que les autres. Le calcium a un effet défloculant très marqué. Les agriculteurs connaissent bien l'effet de la chaux sur le terrain. Une même argile est plus perméable et moins plastique si elle est saturée de chaux; elle est donc plus gélive.

Nous avons nous-mêmes obtenu les plus forts gonflements observés avec une poudre provenant de la décomposition d'une roche calcaire du Jura nommée « pierre morte » (environ 85 % de carbonate attaqués par HCL — gonflement de 4,5 mm à l'heure — teneur en eau de la partie gelée jusqu'à 177 % — facteur de gonflement 120 %). La figure 10 montre, par la longueur des fissures de retrait, la distance à laquelle l'eau est aspirée par la glace. Erlenbach note que les terrains où des soulèvements maxima de 50 à 60 cm ont été observés sont calcaires (voir *Bodenmechanik und neuzeitlicher Strassenbau* n° 3. 1936, page 55, route sur remblai de 0,80 m; nappe phréatique à 1,40 m de profondeur; sol limoneux de « Wiesenalk » teneur en calcaire 60 %). Des drainages à 0,50 m de profondeur eurent très peu d'efficacité.

En ce qui concerne la naissance et l'arrêt d'une lentille de glace c'est-à-dire l'explication de la discontinuité du phénomène, seul l'arrêt a été expliqué d'une façon satisfaisante par Taber.

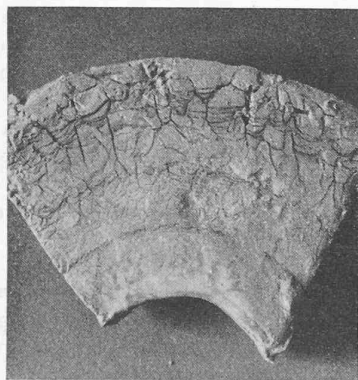


Fig. 23. — Terrain en présence duquel il ne se forme pas de lentilles bien caractérisées.

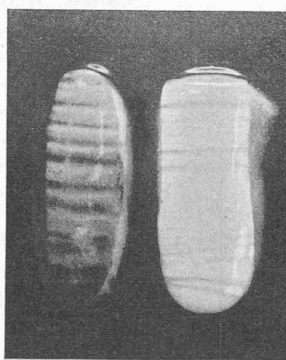


Fig. 24. — Stratification obtenue dans la glace par suite de variations thermiques.
à gauche : eau distillée
à droite : eau potable.

L'eau aspirée par la lentille est sous tension¹. Lorsque la résistance à la traction dépasse une certaine valeur, il y a rupture de la phase liquide, formation d'une phase gazeuse et donc de ménisques, et par suite arrêt dans la circulation de l'eau. La traction diminue instantanément puisqu'il n'y a plus de pertes de charges. Les essais effectués avec d'autres liquides que l'eau paraissent confirmer cette hypothèse.

Beskow arrive lui aussi à un résultat analogue. Toutefois pour lui ce n'est plus la résistance à traction du liquide qui intervient, mais la hauteur maximum d'ascension capillaire. Comme la notion d'ascension capillaire maximum est difficile à préciser, qu'il y a une hauteur d'ascension capillaire active, une autre passive, et donc indétermination, que d'autre part l'expérience ne peut facilement décider dans ce cas, il est fort possible qu'au fond l'explication soit identique.

Mais ce qui est moins satisfaisant, c'est l'explication de la naissance d'une lentille. On invoque la formation de germes de cristallisation, de discontinuités préexistantes dans le terrain, etc. Mais toutes ces explications n'indiquent la formation que d'une seule lentille et mal leur succession.

A notre avis, et nous basant pour cela sur nos observations personnelles, nous pensons que la formation d'une lentille est due à une modification de l'état thermique seul, pourvu que toutes les autres conditions soient également favorables.

Toutes les lentilles dont nous avons pu provoquer la formation et la croissance sont liées à une hausse de la température ou ce qui revient au même, à une modification essentielle du gradient thermique à la limite de la zone gelée.

La glace elle-même devient stratifiée si la température est soumise à des fluctuations (fig. 24).

Il serait de la plus grande importance de réunir des données plus précises sur le détail des manipulations subies par les échantillons cités dans la littérature et qui montrent de forts belles lentilles, afin de savoir s'il n'y a pas eu possibilité d'échauffement pendant les observations.

Conclusions.

Le type d'essai décrit précédemment avec tube congélateur central, nous semble susceptible de rendre d'utiles services pour l'étude de la gélivité des sols.

Nous avons pu par ce moyen et pour la première fois à notre connaissance, *provoquer la formation de lentilles de glace*.

La formation de lentilles successives semble dépendre de variations thermiques, qui entraînent le dégel à la limite de la zone gelée. Le dégel paraît faciliter la formation d'une discontinuité. Ce phénomène est probablement lié aux propriétés de la glace fondante.

L'alimentation en eau de la lentille de glace ne paraît pas devoir être attribuée à la présence des pellicules d'eau adsorbées autour des grains.

Quelques essais paraissent indiquer que des vibrations favorisent la formation de discontinuité et des essais systématiques sur ce point sont souhaitables étant donné son importance pour les chaussées modernes.

Les résultats d'essais de ce genre contribuent aussi à une meilleure connaissance du comportement des sols en cas de congélation artificielle des terrains, en particulier pour le creusement de puits de mine.

Nous ne nous cachons pas le caractère fragmentaire et qualitatif de ces essais, mais nous avons pensé, en les ren-

dant accessibles à chaque Laboratoire, qu'ils constitueraient une base utile pour des recherches ultérieures plus systématiques.

L'auteur du présent article remercie très vivement le directeur de l'Ecole polytechnique, M. A. Stucky, de lui avoir donné l'occasion et les moyens d'entreprendre des essais très intéressants, et d'avoir autorisé la publication de ces premiers résultats.

Il est particulièrement redevable à M. D. Bonnard, ingénieur, chargé de cours à l'Ecole polytechnique, directeur-adjoint des Laboratoires de géotechnique et d'hydraulique, de son aimable et persévérant appui, ainsi que des facilités de tous ordres qu'il lui a accordées dans son travail. Il remercie aussi M. J. Bonjour, ingénieur, ainsi que tous leurs collaborateurs.

Lausanne, mai-août 1945.

Idées nouvelles sur la fondation et la constitution des chaussées

par L. PERRET, ingénieur en chef, Lausanne¹.

Il est remarquable de constater que depuis près de cent trente ans, soit depuis l'époque où l'ingénieur anglais Mac Adam préconisa l'emploi de la pierre cassée pour la construction des chaussées, les méthodes utilisées pour la fondation et la constitution de celles-ci n'ont guère varié et pourtant les contraintes auxquelles elles sont soumises actuellement dépassent de beaucoup celles qui étaient provoquées par le trafic hippomobile d'autrefois. Mais si l'introduction de la traction mécanique a eu pour effet d'obliger les techniciens à rechercher des méthodes de protection de la surface supérieure des chaussées afin de les soustraire à l'usure rapide provoquée par ce nouveau mode de locomotion, on n'avait pas été amené jusqu'ici à apporter de changement à la constitution de leur corps proprement dit.

On sait que, d'une façon générale, la chaussée est constituée :

- 1° Par un empierrement, dit hérisson, formé de pierres de 15 à 20 cm d'épaisseur, posées à la main sur leur plus grande base afin de réaliser la meilleure assise possible. Selon la nature du sous-sol on interpose entre ce dernier et le hérisson une couche de sable ou de ballast tout-venant, qui a pour but d'assurer une meilleure répartition des charges et d'empêcher dans la mesure du possible le terrain de fondation de remonter entre les vides de l'empierrement.
- 2° Par une couche de gravier cassé de 12 à 15 cm d'épaisseur soigneusement cylindrée et que l'on désigne sous le nom de couche de support, du fait qu'elle sert de soutien au revêtement proprement dit de la chaussée.

Déformation des chaussées.

Abstraction faite des déformations dues à l'insuffisance du sol de fondation ainsi qu'au gel, l'action des charges roulantes sur une chaussée tend à la comprimer et par conséquent à réduire les vides qu'elle peut renfermer. Or, il est certain qu'une chaussée constituée comme nous l'avons

¹ Par rapport à la pression atmosphérique.

¹ Ce texte a paru au n° du 10 mai de la revue *La route et la circulation routière*. (Réd.).