

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 64 (1938)  
**Heft:** 7

**Artikel:** Procédés modernes d'études des sols de fondation des chaussées - Gélivité des sols  
**Autor:** Stucky, A. / Bonnard, D.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-49188>

#### **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:** 22.02.2026

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

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

## ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 12 francs  
Etranger : 14 francs

Pour sociétaires :  
Suisse : 1 an, 10 francs  
Etranger : 12 francs

Prix du numéro :  
75 centimes.

Pour les abonnements  
s'adresser à la librairie  
F. Rouge & C<sup>e</sup>, à Lausanne.

Paraissant tous les 15 jours

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale. — Organe de publication de la Commission centrale pour la navigation du Rhin.

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 ; A. ROSSIER, ingénieur ; Vaud : MM. C. BUTTICAZ, ingénieur ; E. ELSKES, ingénieur ; EPITAUX, architecte ; E. JOST, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; CH. THÉVENAZ, architecte ; Genève : MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; E. ODIER, architecte ; CH. WEIBEL, architecte ; Neuchâtel : MM. J. BÉGUIN, architecte ; R. GUYE, ingénieur ; A. MÉAN, ingénieur cantonal ; Valais : M. J. COUCHEPIN, ingénieur, à Martigny.

RÉDACTION : H. DEMIERRE, ingénieur, 11, Avenue des Mousquetaires,  
LA TOUR-DE-PEILZ.

## ANNONCES

Le millimètre sur 1 colonne,  
largeur 47 mm :  
20 centimes.  
Rabais pour annonces  
répétées.

Tarif spécial  
pour fractions de pages.

Régie des annonces :  
Annonces Suisses S. A.  
8, Rue Centrale (Pl. Pépinet)  
Lausanne

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

SOMMAIRE : Procédés modernes d'études des sols de fondation des chaussées. — Gélicité des sols, par A. STUCKY, professeur à l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne et D. BONNARD, ingénieur. — Quelques exemples de transformations modernes et d'exécutions récentes de turbines hydrauliques, par E. SEITZ. — Les principes et les tendances de l'éclairage architectural, par J. DOURGNON, ingénieur à la Société pour le perfectionnement de l'éclairage, Paris. — En faveur du progrès des applications de l'électricité. — Le bois dans l'industrie chimique. — Cours d'introduction à l'analyse du travail. — Sociétés : Société vaudoise des ingénieurs et des architectes et Association amicale des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne. — BIBLIOGRAPHIE. — CARNET DES CONCOURS. — SERVICE DE PLACEMENT. — DOCUMENTATION. — ECHOS.

COMMUNICATIONS DU LABORATOIRE  
DE GÉOTECHNIQUE DE L'ÉCOLE D'INGÉNIEURS  
DE L'UNIVERSITÉ DE LAUSANNE

## Procédés modernes d'études des sols de fondation des chaussées. - Gélicité des sols

par A. STUCKY, professeur à l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne et  
D. BONNARD, ingénieur.

### I. Introduction.

Il est peu de domaines du génie civil où l'application des méthodes géotechniques<sup>1</sup> n'ait, au cours de ces dernières années, été la cause d'une évolution dans la manière d'interpréter les phénomènes naturels et dans les moyens employés pour parer à leurs effets. La détermination en laboratoire des caractéristiques physiques et mécaniques des terres est requise d'une manière générale, aujourd'hui, par les ingénieurs constructeurs, chaque fois qu'ayant à fonder un ouvrage en terrain argileux ou sablonneux suspect, ils ont à fixer le taux des contraintes et le mode de fondation propre à éviter tout tassement ou glissement qui entraîneraient la détérioration ou la ruine de l'ouvrage.

Aux risques de déformations par tassement ou glissement s'ajoute, dans le cas de la fondation des chaussées, celui du gonflement des couches sous-jacentes par effet du

gel. Lors même que dans les fondations d'une route, la nappe souterraine est maintenue par drainage au-dessous de la limite d'action du gel, l'eau monte par capillarité dans les régions froides, s'y congèle et donne lieu à la formation de lentilles de glace (fig. 1). Il en résulte une augmentation de volume et, par suite, une détérioration plus ou moins grave du revêtement.

Les sols argileux et sablonneux ne donnent pas tous lieu à la formation de lentilles de glace et il importe de pouvoir différencier sur la base de critères simples ceux qui sont gélifs de ceux qui ne le sont pas.

Il a été fait à ce sujet de nombreuses observations<sup>1</sup>. On connaît les lois générales qui régissent ce mouvement ascensionnel de l'eau et les conditions qui doivent être

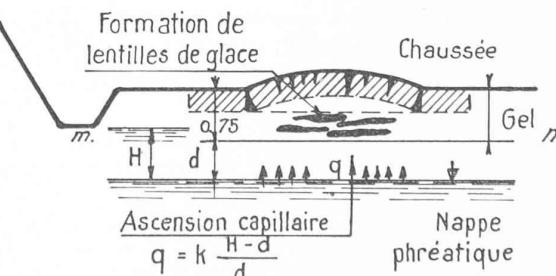


Fig. 1. — Schéma donnant le processus de formation de lentilles de glace sous une chaussée fondée sur sol gélif. Ascension de l'eau de la nappe souterraine. (Les notations admises ici sont celles utilisées au chapitre II de cette communication.)

<sup>1</sup> Voir l'article intitulé : « Les études géotechniques, leur but et leurs méthodes », *Bulletin technique de la Suisse romande*, des 18 janvier et 1<sup>er</sup> février 1936.

<sup>1</sup> Citons, entre autres, l'étude : « Die Beurteilung des Baugrundes im Strassenbau unter besonderer Berücksichtigung der Frostgefährlichkeit des Bodens » par le Dr L. Bendel, ingénieur à Lucerne. Article publié dans *Schweizerische Zeitschrift für Strassenwesen*, 1935, N° 14 à 19.

simultanément réalisées pour que le gel ait une action néfaste.

Parallèlement aux constatations faites sur le terrain, des expérimentateurs ont cherché à définir par des essais en laboratoire, sur des échantillons intacts du sol, les propriétés physiques et mécaniques qui caractérisent précisément les sols dangereux. Par une étude préalable convenable, on peut aujourd'hui juger de l'importance des risques inhérents à tel ou tel sol et faciliter ainsi le choix des mesures préventives.

Le but de cet article est de rappeler brièvement les faits et leurs lois, de montrer quels sont les critères permettant de juger un sol de fondation à ce point de vue. En outre, nous donnerons les résultats essentiels d'une étude concrète que le Laboratoire de géotechnique de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne vient d'achever<sup>1</sup>.

## II. Définitions et notions fondamentales.

On convient d'appeler *gélif* un terrain au sein duquel, lorsqu'il est placé dans les conditions requises d'humidité et de froid, se forment des lentilles de glace capables de provoquer une augmentation appréciable de volume.

Divers auteurs ont montré que cette aptitude à la congélation dépend de la *composition granulométrique*<sup>2</sup> du sol. Dans les terrains argileux et sablonneux se trouvent des particules de sable, de limon, de boue, d'argile ou d'argile colloïdale, dans des proportions variées qu'indique la *courbe granulométrique*<sup>3</sup> (fig. 5). Si les particules sont de dimensions sensiblement égales, la composition granulométrique est dite *uniforme* et la courbe granulométrique se rapproche de la verticale. Au contraire, si le sol est formé de sable, de limon, de boue et d'argile, la courbe granulométrique sera plus ou moins inclinée.

On définit à ce propos le *degré d'uniformité*  $U$  d'un sol.

Sa valeur est égale au quotient  $\frac{D_1}{D_2}$ , où  $D_1$  est le diamètre des orifices d'un crible qui laisserait passer les 60 % des particules, et  $D_2$ , la grandeur correspondante d'un tamis qui laisserait passer les 10 % seulement des particules (les quantités sont comptées en poids, voir tableau et courbes granulométriques, fig. 5 et 6).

D'après le *critère de Casagrande*, les sols dont le degré d'uniformité est inférieur à 5 sont gélifs, si plus de 10 % des particules ont un diamètre inférieur à 0,02 mm. Pour

<sup>1</sup> Nous tenons à remercier ici M. L. Perret, ingénieur, chef du Service des routes du Canton de Vaud, qui a bien voulu nous autoriser à publier les résultats de cette étude faite avec sa collaboration.

<sup>2</sup> La formation de lentilles de glace s'explique de la manière suivante : Un sol composé de sable et d'argile est sillonné de pores de grandeurs différentes et constellé de cavités d'importance très variable. On sait que l'eau interstitielle gèle difficilement lorsqu'elle circule dans des pores de très petit diamètre ; par contre, il se formera d'emblée, au droit des plus grandes cavités, des cristaux de glace qui augmenteront sans cesse de volume, alimentés par l'eau, montant de la nappe souterraine et circulant dans les pores les plus ténus (ascension capillaire). Les cristaux de glace deviendront rapidement des lentilles volumineuses provoquant un gonflement appréciable de la chaussée.

<sup>3</sup> La courbe granulométrique s'obtient en faisant figurer, en fonction du diamètre des grains portés selon une échelle logarithmique en abscisse, le poids (en % du poids total de la matière solide) des grains de diamètre inférieur au diamètre envisagé ; l'échelle des % croissant de 0 à 100 % à partir de l'origine.

les sols dont le degré d'uniformité est supérieur à 15, il suffit de 3 % de particules de dimensions inférieures à 0,02 mm, pour qu'il y ait risque de formation de lentilles de glace. Cette condition est nécessaire, elle n'est pas suffisante. En effet, si par application de ce critère, un sol est reconnu gélif, encore faut-il, pour qu'il y ait formation de lentilles de glace, que la zone exposée au gel soit alimentée en eau. Elle pourra l'être par phénomène d'ascension capillaire. Cet écoulement de bas en haut, tel que le définit la figure 1, obéit à la loi de Darcy. Le débit qui traverse le plan horizontal  $m-n$  où s'arrête le gel et situé à une hauteur  $d$  au-dessus de la nappe phréatique est :

$$q = ik = \frac{H - d}{d} k$$

$q$  = débit vertical par unité de surface horizontale ;

$i$  = perte de charge par m courant d'écoulement ;

$H$  = hauteur d'ascension capillaire du sol<sup>1</sup> ;

$d$  = hauteur séparant le niveau de la nappe phréatique de la cote limite d'action du gel ;

$k$  = coefficient de perméabilité.

On peut admettre que le gonflement du sol  $S$  est proportionnel au volume d'eau parvenant dans la zone gelée. Il découle d'expériences et d'observations faites principalement en Allemagne<sup>2</sup> que la relation liant le débit unitaire  $q$ , d'une part, la durée  $t$  de gel, d'autre part, à l'importance du gonflement de la chaussée est telle que précisée à la figure 2. Cette relation s'exprime par la formule<sup>3</sup>

$$S = 1400 tq$$

$S$  = gonflement de la chaussée, en centimètres ;

$t$  = durée du gel en jours ;

$q$  = débit spécifique ascensionnel, en  $\text{cm}^3$  par minute et par  $\text{cm}^2$ .

A chaque cas d'espèce défini par un terrain dont on aura déterminé le coefficient de perméabilité  $k$  et la hauteur d'ascension capillaire  $H$ , par une profondeur d'action du gel et une position de la nappe souterraine, on pourra faire correspondre un débit  $q$  et, par suite, une droite du graphique de la figure 2. Le cas sera d'autant plus dangereux que la droite sera plus redressée et vice-versa. Ce critère est dit : *critère de Freiberg*<sup>4</sup>.

\* \* \*

<sup>1</sup> Le moyen le plus simple de déterminer la hauteur d'ascension capillaire serait de faire plonger dans un bac d'eau l'extrémité inférieure d'une éprouvette du sol et d'observer à quelle hauteur l'eau monte le long des pores. Cette méthode, applicable pour le cas de sable ou de sols dont la hauteur d'ascension capillaire ne dépasse pas quelques décimètres, ne convient plus pour des sables fins et des argiles dont la hauteur d'ascension capillaire peut atteindre plusieurs dizaines et parfois même plusieurs centaines de mètres (voir à ce propos chap. III de cette communication).

<sup>2</sup> Voir à ce sujet, entre autres, la publication allemande : « Bodenmechanik und neuzeitlicher Strassenbau », Schriftreihe der « Strasse », N° 3, Volk und Reich Verlag, Berlin 1936.

<sup>3</sup> Cette formule qui résulte d'observations et d'expériences faites par le Laboratoire de Freiberg fera ultérieurement de notre part l'objet de contrôle. Etablie pour le cas d'une profondeur de gel de 0,80 m, il n'est pas certain que l'on puisse, sans autre, généraliser son usage.

<sup>4</sup> Il a été établi par le « Erdbaulaboratorium der Bergakademie Freiberg i. S. »

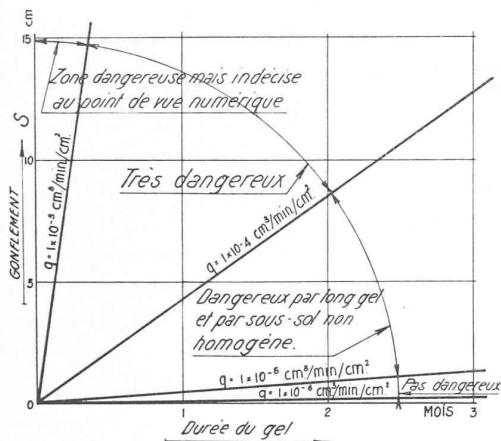


Fig. 2. — Importance du gonflement de la chaussée en fonction de la durée du gel et pour diverses valeurs du débit ascensionnel unitaire  $q$ . Selon la valeur de ce dernier le cas sera considéré comme non dangereux, dangereux ou très dangereux (critère de Freiberg).

Sur ces bases, l'étude d'un cas concret comprendra les opérations suivantes :

1. *Campagne sur le terrain.* — Prélèvement d'échantillons intacts des sols de fondation de la chaussée. Recherche, par mesures directes ou par enquêtes, des profondeurs atteintes par le gel. Mesures de la position de la nappe souterraine (éventuellement, la variation de cette nappe avec les saisons et le temps).

2. *Expériences de laboratoire.* — Détermination de la composition granulométrique des terrains. Détermination de leur perméabilité et de leur hauteur d'ascension capillaire et, le cas échéant, de leurs caractéristiques élémentaires (densité, poids spécifique, teneur en eau et en vides, limite d'Atterberg, etc., etc.).

3. *Application des critères de Casagrande et de Freiberg.* — Introduction des coefficients obtenus sous 2 dans les calculs dont les résultats permettront d'opérer une classification des sols, en gélifs et non gélifs, en peu dangereux et très dangereux, et d'estimer l'ordre de grandeur des déformations probables et de faire toutes propositions utiles quant aux mesures à prendre.

\* \* \*

En pratique les choses ne sont pas toujours aussi simples. On peut avoir affaire à des sols de fondation formés de plusieurs couches différentes ; la chaussée en outre sera, le cas échéant, en remblai ou en tranchée, ce qui n'est pas sans influence sur le mode d'alimentation en eau des régions gelées. Les travaux en cours dans divers laboratoires de géotechnique et auxquels collaborent bon nombre d'ingénieurs des routes, permettront, sans doute, de serrer de plus près encore la réalité<sup>1</sup>. Si la méthode exposée ici ne permet pas toujours de conclure quantitativement, elle permet la comparaison entre eux des divers

sols, sur des bases solides ; elle facilite la classification. Preuve en est l'étude dont nous donnons au chapitre suivant les résultats principaux.

### III. Application à l'étude de quelques sols de fondation du réseau routier cantonal vaudois.

#### A. But — Enumération et première classification des sols — Critère de Casagrande.

Par prélèvement d'échantillons de terre en des emplacements où il avait été observé de forts gonflements dus au gel (N°s 1-3 de la fig. 3) et par examen de ces sols suivant les règles exposées au chapitre précédent, nous nous sommes proposés un double but : Le contrôle du critère fondamental de Casagrande, d'une part, et la recherche des données propres à faciliter aux ingénieurs le choix et le dimensionnement des mesures d'amélioration.

Par ailleurs, d'autres prélèvements furent effectués dans des terrains suspects rencontrés au cours de travaux nouveaux ou d'améliorations en chantier ou en projet (N°s 4 à 9 de la fig. 3).

Le tableau ci-dessous donne la nomenclature des principaux sols étudiés.

No d'ordre	Lieux de prélèvement	Abréviations	Remarques	Désignations par classification Terzaghi
1	Route 501 de Bregny à Bottens	Bottens (B)	Gonflements dus au gel constatés les années précédentes	Sable fin (limon)
2	Route 414 de Villars-le-Terroir à Bercher	Fey (F)	id.	Argile maigre
3	Route 319 de Crissier à Cheseaux	Cheseaux (Ch)	id.	Boue
4	Route communale de Poliez-Pittet à Bottens	Poliez-Pittet 1	Terrain suspect	Sable fin
5		Poliez-Pittet 2	id.	Sable fin
6	Les Mosses Profil 135	Mosses 135	Terrain suspect	Sable fin (limon)
7	Les Mosses Profil 153-154	Mosses 153-154	id.	Sable fin (limon)
8	Les Mosses Profil 148-149	Mosses 148-149	id.	—
9	La Comballaz Profil 10	Comballaz	id.	—

Fig. 3. — Lieux de prélèvement et désignations des terres examinées. Les termes de la dernière colonne ont été fixés sur la base de la classification Terzaghi.

Pour éviter toute équivoque, nous avons adopté en cinquième colonne du tableau la terminologie telle qu'elle découle de l'essai cédométrique<sup>1</sup>, selon la méthode de classification préconisée par M. le prof. Terzaghi (voir fig. 4).

<sup>1</sup> Par l'essai cédométrique, on soumet sous l'eau l'échantillon intact du sol à une compression progressive. On le décharge ensuite lentement. Durant l'opération, on note ses déformations. On détermine, sur la base des résultats de l'expérience, deux grandeurs : le facteur de compression  $B$  et le facteur de gonflement  $A$ . C'est ce dernier facteur ainsi que le coefficient de perméabilité réduit, qui n'est autre que le coefficient  $k$  de Darcy mesuré à l'odomètre lorsque l'échantillon est soumis à une compression de 1,5 kg/cm<sup>2</sup>, que Terzaghi utilise pour faire correspondre à chaque sol un point du tableau classificatif de la figure 4.

<sup>1</sup> Il faut, en effet, souhaiter qu'aux études de laboratoire viennent s'ajouter des observations systématiques sur le terrain. Ce n'est que par comparaison des phénomènes mesurés sur place et des grandeurs correspondantes escomptées par les études de laboratoire que l'on sera toujours plus à même de prévoir les méfaits dus au gel et d'en supprimer les causes.

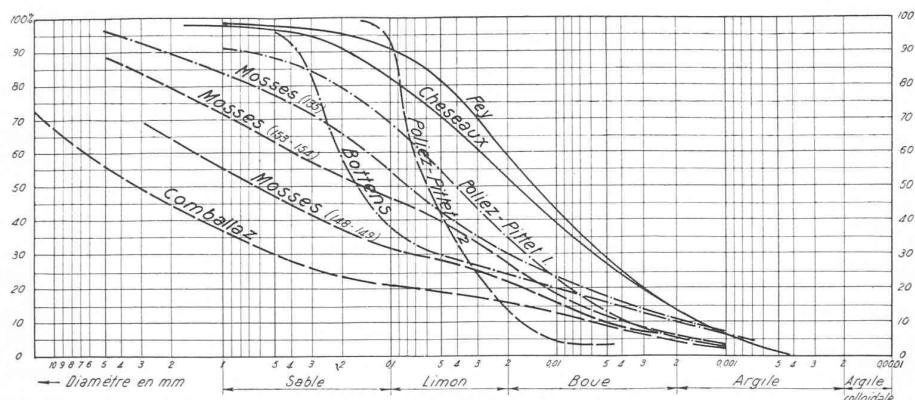


Fig. 5. — Courbes granulométriques des sols étudiés. Les terres de Fey et de Cheseaux sont celles qui contiennent le plus d'éléments fins. Celles de Poliez-Pittet 1, Mosses 153-154, Mosses 148-149 et Combballaz en contiennent beaucoup moins. Cela se traduira par de grandes différences de hauteur d'ascension capillaire et de perméabilité.

Une première constatation s'impose. Ces sols dangereux ou suspects sont de la classe intermédiaire allant des argiles maigres au sable fin. En effet, pour diverses raisons, le gel reste généralement sans action sur les fondations de sable grossier ou d'argile grasse. Les premiers ont une hauteur d'ascension capillaire réduite, rendant peu probable dans la plupart des cas l'alimentation des couches gelées par la nappe souterraine ; la perméabilité des seconds est si faible que malgré leur grande hauteur d'ascension capillaire, le débit ascensionnel reste toujours insignifiant.

L'examen des *courbes granulométriques*<sup>1</sup> (fig. 5) confirme le fait qui vient d'être énoncé. La plupart de ces sols sont composés de particules de dimensions variables, allant des sables aux argiles. Il n'en est pas qui soit essentiellement sable ou argile.

Le tableau de la figure 6, interprétation numérique de la figure 5, permet l'application du *critère de Casagrande*.

D'après ce dernier, *tous ces sols doivent être considérés comme gélifs*, donc susceptibles de donner naissance à des lentilles de glace, s'ils sont dans les conditions favorables de froid et d'humidité. C'est là un premier résultat important. Il constitue, en ce qui concerne les terrains 1, 2 et 3, une confirmation de la règle de Casagrande. Pour les terrains 4 à 9, il montre que c'est avec raison qu'ils furent considérés comme suspects.

N°	Désignations	Diamètre d'Allen Hazen <sup>1</sup>	Degré d'uniformité	% des particules < que 0,02mm	Conclusions
1	Bottens	0,0019	$U=110 > 15$	$24 > 3$	Sol gélif.
2	Fey	0,00145	$U=15$	$58 > 3$	"
3	Cheseaux	0,0015	$U=19 > 15$	$53 > 3$	"
4	Poliez-Pittet 1	0,0037	$U=17 > 15$	$35 > 3$	"
5	Poliez-Pittet 2	0,015	$U=4,7 < 5$	$13 > 10$	"
6	Mosses 135	0,0018	$U=78 > 15$	$30 > 3$	"
7	Mosses 153-154	0,0036	$U=100 > 15$	$28 > 3$	"
8	Mosses 148-149	0,005	$U=260 > 15$	$23 > 3$	"
9	Combballaz	0,006	$U=1000 > 15$	$16 > 3$	"

Fig. 6. — Interprétation des courbes granulométriques de la fig. 5. Application du critère de Casagrande. Tous ces sols sont gélifs.

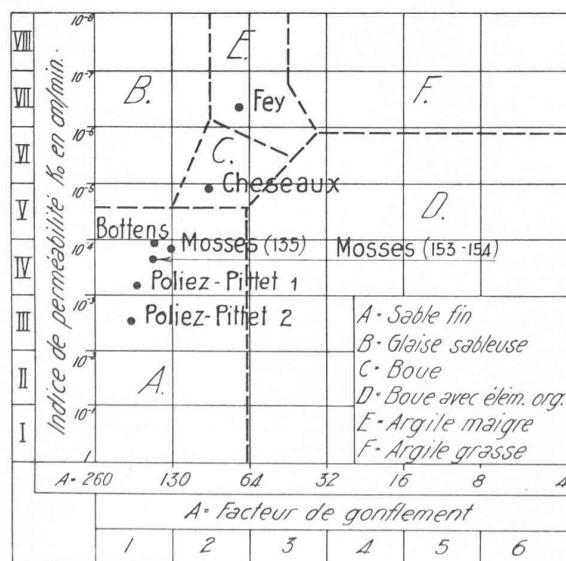


Fig. 4. — Classification des sols étudiés par la méthode préconisée par le professeur Terzaghi. Il s'agit de sable fin ou d'argile maigre.

<sup>2</sup> La composition granulométrique d'un sol se détermine par tamisage pour les éléments d'un diamètre supérieur à 0,1 mm et par la méthode de l'aréomètre (voir article déjà cité concernant les études géotechniques) pour les particules plus tenues.

#### B. Hauteur d'ascension capillaire et perméabilité. Application du critère de Freiberg.

Ces sols ayant été reconnus gélifs, est-il possible, en imposant à la nappe souterraine une position bien déterminée, par des drainages, par exemple, d'éviter la formation de lentilles de glace ? Doit-on envisager l'enlèvement des couches gélives et leur remplacement par un empierrement ou bien un abaissement de la nappe phréatique ou encore l'interposition de toiles goudronnées empêchant les montées d'eau du sous-sol<sup>2</sup> ? L'application du critère de Freiberg va nous permettre de répondre à ces questions. Nous devons connaître, pour cela la perméabilité  $k$  et la hauteur d'ascension capillaire  $H$  de ces terres. Les essais donnèrent les résultats du tableau de la figure 7.

<sup>1</sup> Le diamètre d'Allen Hazen est, par définition, le diamètre d'un orifice qui laisserait passer 10 % des particules constituant le terrain (en poids). Il peut servir de critère à une estimation grossière de la perméabilité.

<sup>2</sup> Notre but n'est pas de donner une description des dispositions propres à atténuer l'action néfaste du gel, nous nous bornerons à montrer qu'en prenant pour base l'étude géotechnique du sous-sol, il devient facile de porter son choix sur l'une ou l'autre des méthodes préconisées. (Pour plus amples détails concernant ces dernières, voir la publication allemande déjà citée : « Bodenmechanik und neuzeitlicher Strassenbau »).

N°	Désignations	Coefficient de perméabilité $k^1$ en cm par minute	Hauteur d'ascension capillaire $^2$ en cm
1	Bottens	$1,2 \times 10^{-4}$	500
2	Fey	$4,5 \times 10^{-7}$	10 000
3	Cheseaux	$1,3 \times 10^{-5}$	875
4	Poliez-Pittet 1	$6,7 \times 10^{-4}$	400
5	Poliez-Pittet 2	$3 \times 10^{-3}$	125
6	Mosses 135	$1,5 \times 10^{-4}$	475
7	Mosses 153-154	$2,2 \times 10^{-4}$	100
8	Mosses 148-149	—	—
9	Combballaz	$1,7 \times 10^{-6}$	75

Fig. 7. — Perméabilités et hauteurs d'ascension capillaire des divers sols étudiés.

Admettons, pour la suite de notre exposé, que, d'une manière générale, la limite d'action du gel est située à 75 cm de profondeur<sup>3</sup>. Cherchons l'importance du débit  $q$ , qui dans chaque cas montera vers la zone gelée. Répétons ces calculs pour diverses profondeurs de la nappe souterraine, par exemple 1,25 m, 2,25 m et 4,75 m, et donnons les résultats sous la forme graphique de la figure 2, faisant apparaître la déformation de la chaussée en fonction de la durée du gel. Nous obtenons les figures 8, 9 et 10.

L'interprétation de ces graphiques est immédiate. Supposons un instant que la nappe souterraine soit située, dans tous les cas envisagés ici, à 1,25 m de profondeur. La figure 8 nous montre que la quantité d'eau parvenant dans la zone gelée et, par suite, les gonflements seraient très importants, aussi bien pour les terres contenant peu de particules fines (*Bottens*, *Mosses* et *Combballaz*) que pour celles de nature argileuse plus prononcée (*Cheseaux* et *Fey*).

Si la nappe souterraine est abaissée à 2,25 m (fig. 9), soit à 1,50 m au-dessous de la limite d'action de gel, il en serait tout autrement. Dans les cas de terre contenant peu de particules fines, soit *Poliez-Pittet 2*, *Mosses 153-154* et *Combballaz*, la hauteur d'ascension capillaire ne suffit plus à provoquer l'écoulement et tout danger de formation de lentilles de glace serait écarté. Les terres de *Poliez-Pittet 1*, *Bottens* et *Mosses 135* par contre contenant plus de particules ténues, resteraient le siège d'un écoulement ascensionnel d'autant plus important que leur

<sup>1</sup> Les valeurs de ces coefficients ont été fixées sur la base de mesures de perméabilité faites à l'œdomètre et de mesures de contrôle effectuées à l'aide d'un appareillage spécial permettant la détermination de la perméabilité sur des échantillons de plus grande dimension.

<sup>2</sup> Pour la détermination de la hauteur d'ascension capillaire, nous avons appliqué la méthode suivante : Lorsqu'un échantillon de sol se dessèche, sans l'action d'aucune pression extérieure, son volume diminue. Ce retrait, soit le rapprochement des particules entre elles, est provoqué par les forces capillaires. Au delà d'une certaine teneur en eau, dite limite de retrait, le volume de l'échantillon reste constant. On démontre que la tension capillaire ayant provoqué cette diminution de volume, facile à mesurer, est précisément équivalente à la hauteur d'ascension capillaire cherchée. Pour chiffrer cette tension, nous placerons un échantillon semblable au premier dans l'œdomètre et déterminerons la contrainte verticale suffisante à provoquer une diminution de volume équivalente à celle de la limite de retrait. Cette contrainte, mesurée en mètres d'eau, sera précisément la hauteur de l'ascension capillaire, moyennant quelques corrections dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici.

<sup>3</sup> Il n'a pas été fait, aux divers emplacements où furent prélevés les échantillons, d'observations précises à ce sujet. Nous avons fixé ce chiffre sur la base d'indications données par des cantonniers. En choisissant la même valeur pour les neuf cas examinés nous facilitons la comparaison des sols entre eux.

perméabilité est plus grande. Les terres de *Fey* et *Cheseaux*, soit celles contenant le plus de particules fines, de hauteur d'ascension capillaire élevée, ne seraient la cause, pour cette cote de la nappe souterraine, de fortes déformations que si le gel durait plusieurs mois, car leur perméabilité est très faible et, par suite, le débit ascensionnel fortement réduit.

Il est intéressant de constater enfin, que, même si l'on provoquait un abaissement de la nappe à 4,75 m de profondeur (fig. 10), les sols de *Bottens* d'une part, et de *Mosses 135* d'autre part, devraient encore être qualifiés de dangereux. Il y aurait toujours, dans ces deux cas, possibilité d'ascension de volumes d'eau appréciables vers les zones gelées. Par contre, les terres de *Poliez-Pittet 1* et *2*, *Mosses 153-154* et *Combballaz*, du fait de leur hauteur d'ascension capillaire réduite, et celles de *Fey* et de *Cheseaux* par suite de leur faible perméabilité, deviendraient inoffensives.

Nous avons vu que le débit pénétrant dans la couche superficielle soumise au gel était exprimé par l'équation

$$q = k_x \frac{H_x - d}{d}$$

où  $k_x$  et  $H_x$  sont deux constantes du terrain. Si nous exprimons  $q$  en fonction de  $d$ , c'est-à-dire de la position de la nappe phréatique par rapport à la limite du gel, nous obtenons les courbes de la figure 11 dont l'allure caractéristique permet de tirer des conclusions intéressantes. On voit, en particulier, que pour les sols de la *Combballaz*, *Mosses 153-154*, *Poliez-Pittet 2* un abaissement de la

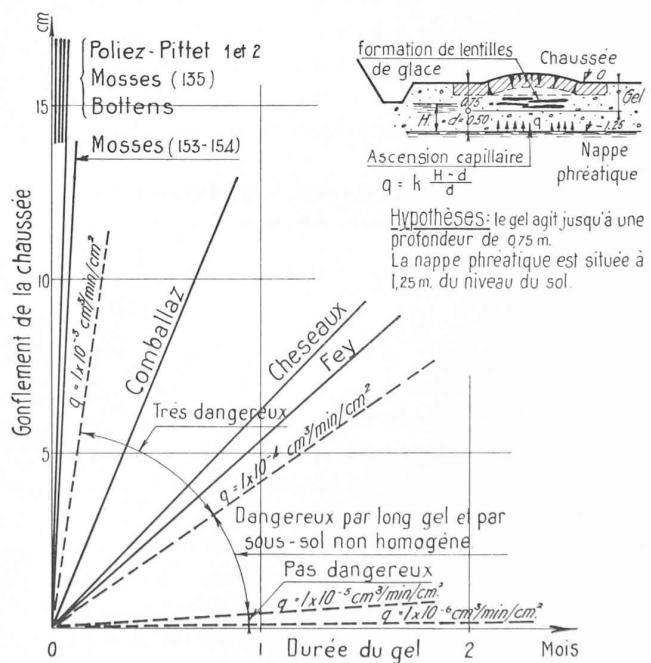


Fig. 8. — Si la nappe souterraine est située à 1,25 m de profondeur, tous les sols étudiés seront le siège d'un écoulement de bas en haut important provoquant très rapidement dans les régions gelées des lentilles de glace et, par suite, de forts gonflements. Les terres de *Cheseaux* et de *Fey*, du fait de leur faible perméabilité, quoique encore très dangereuses, le sont légèrement moins, pour cette cote de la nappe souterraine, que les autres.

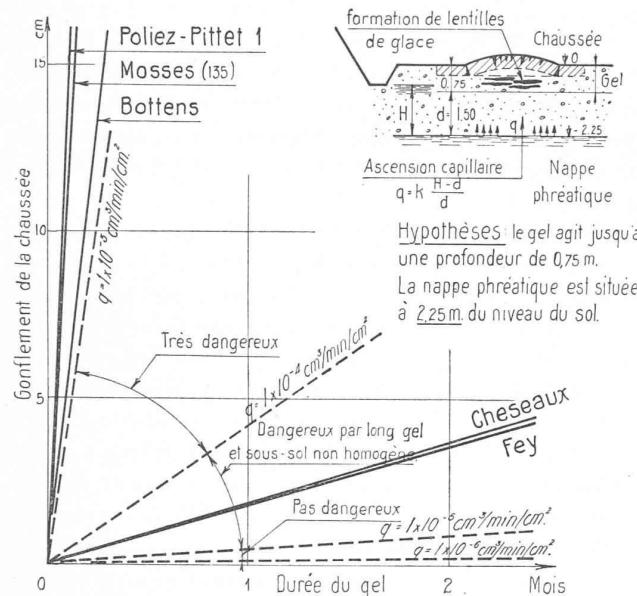


Fig. 9. — Un abaissement de la nappe souterraine à la profondeur de 2,25 m supprime toute ascension capillaire dans le cas de Poliez-Pittet 2, Mosses 153-154 et Combballaz. (Les droites correspondantes ne figurent plus sur la figure.) Par contre, un tel abaissement reste pratiquement sans effet pour les terres de Poliez-Pittet 1, Mosses 135 et Bottens. Les sols de Cheseaux et de Fey ne sont dangereux que si le gel est de longue durée (action favorable de leur faible perméabilité).

nappe souterraine respectivement à 1,50 m, 1,75 m et 2,00 m annule tout débit ascensionnel, la grandeur  $d$  devenant égale à  $H$ . Pour les terres de *Poliez-Pittet 1*, *Mosses 135* et *Bottens*, il faudrait pour obtenir le même résultat provoquer un abaissement de la nappe souterraine respectivement à 4,75 m, 5,50 m et 5,75 m. Les sols de *Cheseaux* et *Fey*, très dangereux si la nappe souterraine est entre 1,00 m et 2,00 m, le sont beaucoup moins déjà pour des cotes phréatiques situées à 2 m ou 3 m de profondeur.

Nous pouvons aussi exprimer le gonflement  $S$  en fonction de  $d$  pour une durée du gel déterminée  $t_0$

$$S = 1400 t_0 q = 1400 t_0 k \cdot \frac{H_x - d}{d}$$

$$S = C_x \frac{H_x - d}{d}$$

où  $C_x$  est une constante.

Pour le cas particulier :  $t_0 = 10$  jours, nous obtenons les courbes de la figure 12. Ces dernières précisent pour chaque cas l'efficacité d'un abaissement de la nappe souterraine. Ainsi pour les terres de *Fey* et de *Cheseaux* un abaissement de la nappe de 0 m à 1,00 m change totalement la grandeur des gonflements, si l'abaissement se poursuit jusqu'à 2,00 m de profondeur les déformations deviennent insignifiantes. Pour le cas de *Mosses 153-154* par contre il faut la nappe à 1,65 m de profondeur pour réduire le gonflement  $S$  à 5 cm, mais un abaissement à 1,75 m supprime radicalement toutes déformations. Les terres de *Bottens*, *Poliez-Pittet 1*, *Mosses 135* subiront, en temps de gel, d'importants gonflements, pour autant que la nappe ne soit pas abaissée à une profondeur supé-

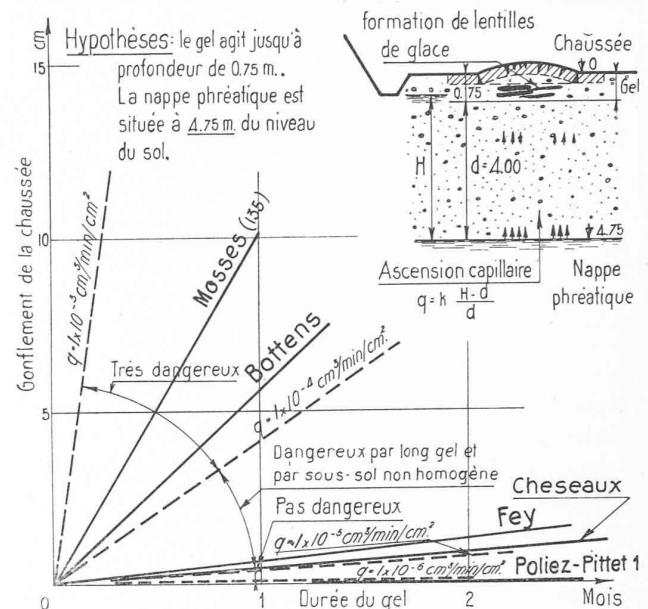


Fig. 10. — Malgré la position exceptionnellement basse, à 4,75 m de profondeur, de la nappe souterraine l'eau parvient encore en grande quantité dans les couches gelées, dans les cas de Bottens et de Mosses 135. Les sols de Fey et de Cheseaux ne deviennent dangereux que par très longs gels. Les autres ne présentent plus aucun danger de formation de lentilles de glace.

rieure à 4,00 m, ce qui n'est dans la plupart des cas guère possible.

Il ressort de ces résultats et de ces quelques remarques que les sols mentionnés ici peuvent être classés en trois groupes distincts, requérant chacun, pour que soient évités les dégâts provoqués par le gel, des mesures différentes :

1. *Terres très peu perméables, à hauteur d'ascension capillaire élevée, exemples Fey et Cheseaux.*

Pour les terres de ce groupe, quelle que soit la position de la nappe souterraine, l'eau montera toujours jusqu'aux régions soumises à l'action du gel. Mais, étant donnée la très faible perméabilité de ces sols, le débit ascensionnel diminuera très rapidement, si la hauteur séparant la limite d'action du gel de la nappe souterraine augmente. Des drainages profonds suffisamment nombreux pourront être, dans ce cas, efficaces (abaissement de la nappe). Pour leur distribution en plan et en profondeur, il faudra tenir compte de la très faible perméabilité du sol. On sera conduit, de ce fait, à envisager un réseau de drains particulièrement dense et coûteux.

2. *Terres perméables, à hauteur d'ascension capillaire faible. Exemples : Mosses 153-154, Poliez-Pittet 2, Combballaz.*

Pour les terres de ce groupe, le débit d'eau montant du sous-sol et alimentant les lentilles de glace, sera très grand, car la perméabilité est forte. Si la hauteur d'ascension capillaire ne dépasse pas un ou deux mètres, on pourra tenter d'abaisser la nappe souterraine à une

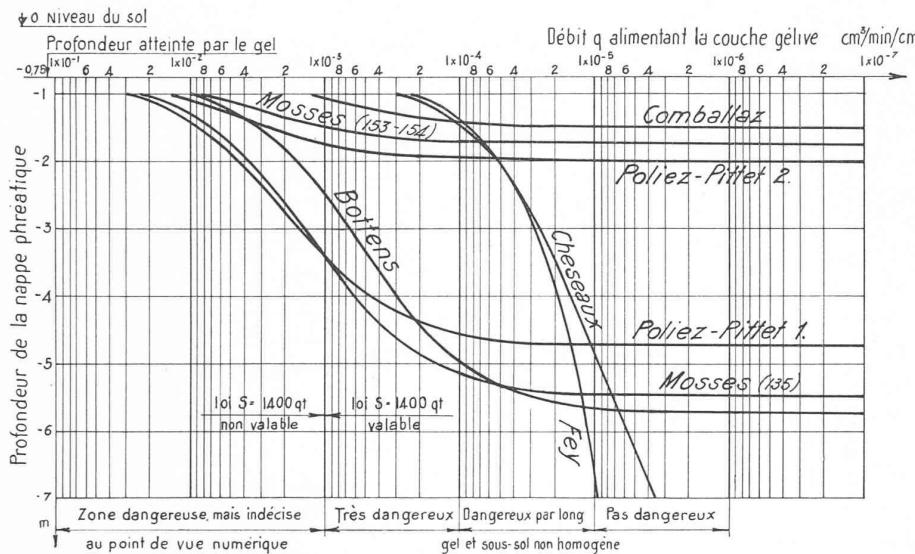


Fig. 11. — Débits  $q$  alimentant les lentilles de glace, en fonction de la position de la nappe souterraine et pour les divers sols examinés. On voit clairement, en particulier, qu'un abaissement de la nappe souterraine à 2,00 m au-dessous de la limite d'action du gel suffit à empêcher toute ascension d'eau dans les cas de Mosses 153-154, Poliez-Pittet 2 et Combballaz (dans ce dernier cas 1,50 m suffirait). On voit aussi que pour les sols de Fey et de Cheseaux tout abaissement de la nappe provoque une atténuation du danger de gonflement, les débits ascensionnels ne restant alors importants que pour de longs gels. Par contre, pour les terres de Bottens, Poliez-Pittet 1 et Mosses 135 tout abaissement inférieur à 5,00 m reste sans effet important sur le phénomène d'ascension capillaire.

profondeur telle que toute montée d'eau soit supprimée. On parviendrait ainsi, par des drainages profonds, sans que ces derniers aient la même importance qu'au cas précédent, étant donné la plus grande perméabilité, à supprimer complètement la formation de lentilles de glace.

### 3. Terres perméables, à hauteur d'ascension capillaire moyenne. Exemples : Bottens, Poliez-Pittet 1, Mosses 135.

Les drainages profonds seraient ici inopérants. En effet, un abaissement de la nappe de 80 cm à 2 m, avec une hauteur d'ascension capillaire de l'ordre de 5 m, serait pratiquement inefficace en terrain perméable. Les seuls moyens propres à éviter les gonflements de la chaussée, seraient la superposition de matelas de ballast ou de tourbe, mettant à l'abri du gel le terrain gélif, ou l'interposition d'un lit étanche (papiers asphaltiques) empêchant la montée de l'eau dans la zone exposée au gel ou encore l'interposition d'une couche de gravier d'épaisseur

plus grande que sa hauteur d'ascension capillaire, immédiatement sous la zone exposée au gel<sup>1</sup>.

\* \* \*

Notons encore qu'il n'est pas exclu que pour atténuer l'action néfaste du gel dans les terrains du groupe 1, les moyens cités au groupe 3 ne soient tous comptes faits, meilleur marché qu'un réseau de drainage, qui pour être efficace, devrait être particulièrement dense. Les cas où les drainages de fond, destinés à abaisser le niveau de la nappe souterraine, constituent la solution indiquée sont donc rares. Cette méthode ne convient qu'aux sols du type 2. On voit donc tout l'intérêt qu'il y a à connaître la perméabilité et la hauteur d'ascension capillaire des terres avant d'entreprendre des travaux qui, faute de renseignements précis, pourraient être exécutés en pure perte.

<sup>1</sup> Voir, au sujet de l'efficacité de ces diverses mesures, la publication allemande déjà citée.

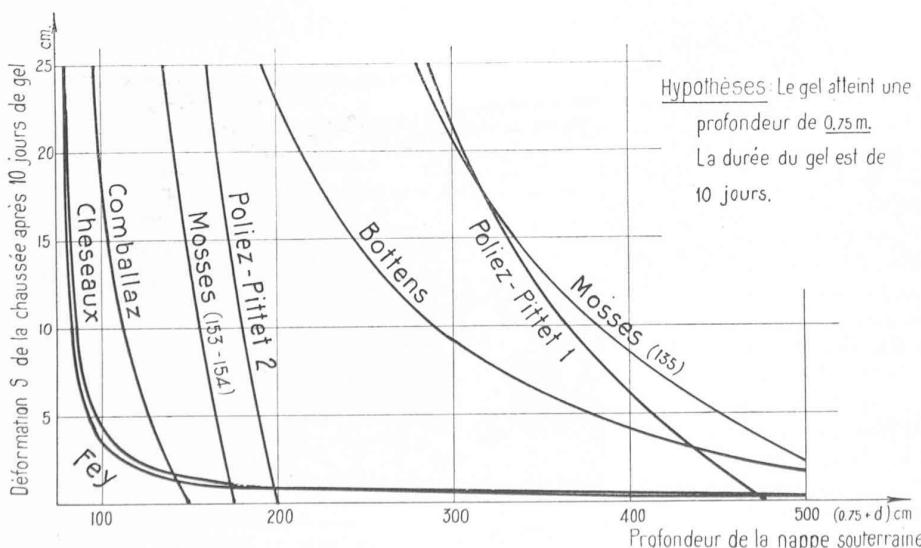


Fig. 12. — Déformations  $S$  de la chaussée, en fonction de la profondeur de la nappe souterraine et pour une durée du gel de 10 jours. Il apparaît clairement qu'un abaissement à 2,00 m de profondeur de la nappe supprime tous gonflements dans les cas de Combballaz, Mosses 153-154 et Poliez-Pittet 2. Un abaissement de la nappe à 1,00 m de profondeur atténue considérablement les risques inhérents aux terres de Cheseaux et de Fey. Par contre, il faudrait un abaissement de l'ordre de 4 à 5 m pour obtenir, avec les sols de Bottens, Poliez-Pittet 1 et Mosses 135, les mêmes résultats.

Enfin, constatation intéressante, ce partage en trois groupes des sols étudiés, tel que nous venons de l'opérer, apparaissait déjà dans la figure 5, donnant leur composition granulométrique, les terrains du groupe 1 étant ceux contenant le plus de particules fines, ceux du groupe 2 le moins, et ceux du groupe 3 occupant une position intermédiaire.

#### IV. Conclusions.

Ainsi, par la détermination de la composition granulométrique du sol, il est possible de dire si oui ou non il est susceptible de donner lieu à la formation de lentilles de glace et, par suite, être la cause de graves déformations du revêtement des chaussées.

En outre, la détermination de la perméabilité et de la hauteur de l'ascension capillaire du sol, permettra d'estimer pour chaque cas particulier l'ampleur des risques et surtout de dimensionner et de choisir en meilleur connaissance de cause les moyens propres à éviter des dégâts.

Notre but fut de montrer l'intérêt de ces recherches en faisant apparaître de manière évidente la façon dont se comportent, en cas de gel, les sols très divers dont nous avons eu à déterminer les caractéristiques. L'influence des facteurs perméabilité, hauteur d'ascension capillaire et profondeur de la nappe souterraine, sur l'importance des phénomènes de formation de lentilles de glace devient ainsi parfaitement claire. Nul doute que ces méthodes puissent être encore développées. Le Laboratoire de géotechnique de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne se propose de poursuivre, avec la collaboration des services publics intéressés, ses études dans ce domaine. Il serait heureux d'être informé de tous les phénomènes et observations susceptibles de le guider dans ses travaux.

Lausanne, novembre 1937.

### Quelques exemples de transformations modernes et d'exécutions récentes de turbines hydrauliques,

par E. SEITZ.

Les Etablissements *Escher Wyss* ont livré pour la centrale de Necaxa de la Mexican Light & Power Co., dans les années 1903 à 1920, neuf turbines Pelton à axe vertical. Six de ces machines, construites pour une puissance de 8200 ch, sous une chute de 390 m et pour une vitesse de 300 t/min, comportaient chacune deux injecteurs à languette et un orifice compensateur. Plus tard, les injecteurs à languette furent remplacés par des tuyères à réglage par pointeau, la puissance étant alors portée à 11 000 ch pour chaque machine.

Les trois autres turbines, fonctionnant sous la même chute, dévelloppeaient chacune une puissance de 16 000 ch, la vitesse étant de 300 t/min. Deux d'entre elles comportaient quatre injecteurs à languette (fig. 1), alors que la troisième, installée en 1920, fut prévue avec deux injecteurs à pointeau. Pour ces turbines également, le réglage de la pression se faisait au moyen d'orifices compensateurs à commande automatique.

Toutes ces turbines qui, à l'époque de leur installation, pou-

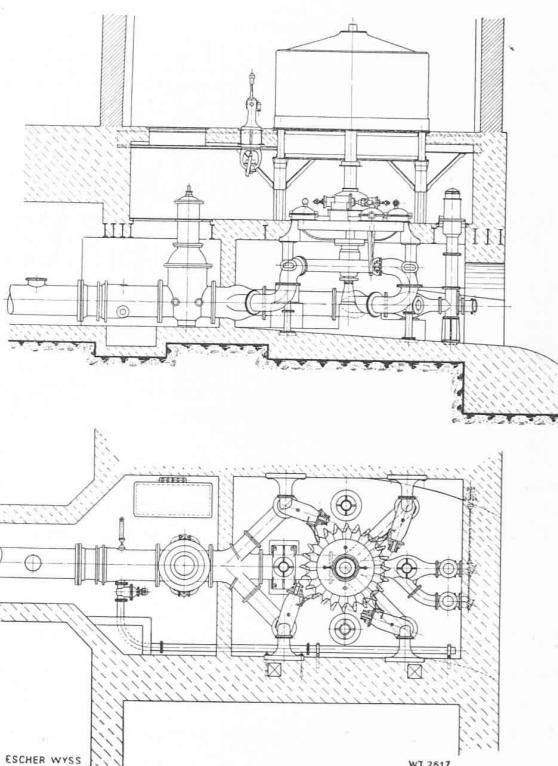


Fig. 1. — Turbine Pelton de 16 000 ch.  
Exécution de 1908.

vaient être considérées comme des constructions remarquables, ne répondirent plus, après un service qui, pour certaines d'entre elles dépassait trente ans, aux conditions que de telles machines doivent remplir de nos jours, tant au point de vue de l'utilisation économique de l'énergie, que sous le rapport des qualités de réglage.

Après une étude minutieuse, il fut décidé, en 1936, de transformer toutes les neuf turbines, afin d'en obtenir le meilleur rendement possible et, par la même occasion, d'améliorer, dans une sensible mesure, leurs qualités de réglage. Il ne fut pas possible de choisir une solution idéale, en raison de la place disponible, de la réutilisation des vannes et des arbres, ainsi que de la hauteur du niveau aval. Néanmoins, la comparaison de la figure 2 avec la figure 1 permet de reconnaître

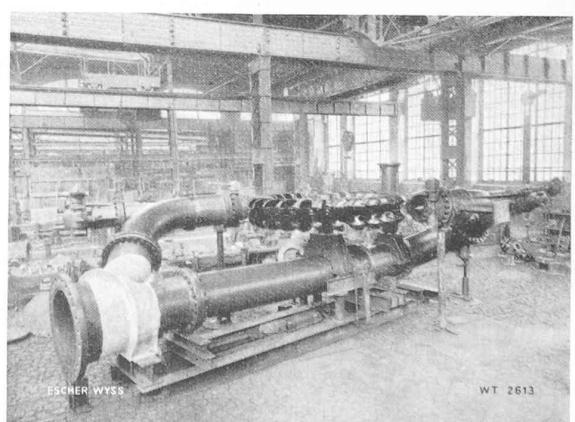


Fig. 2. — Tuyaux d'adduction et roue motrice d'une turbine de 22 000 ch (usine de Necaxa).