

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 111 (1985)
Heft: 22

Artikel: Quelques réflexions sur les galeries de protection contre les avalanches
Autor: Wildi, Pierre
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-75662>

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: 12.01.2026

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

Quelques réflexions sur les galeries de protection contre les avalanches

par Pierre Wildi, Berne

Bien que de nombreuses galeries de protection contre les avalanches aient été construites sur les réseaux routiers traditionnel et national de notre pays depuis l'avènement de l'automobile, rares sont encore les routes de montagne pouvant être considérées comme absolument sûres en hiver.

Nul doute que l'aménagement des routes de montagne des réseaux cantonaux et communaux en vue de l'amélioration de leur sécurité hivernale sera poursuivi sans relâche au cours de la fin de ce siècle. Les articles constitutionnels concernant les droits de douane sur les carburants et l'énergie adoptés par le souverain le 27 février 1983, qui prévoient notamment des contributions fédérales aux frais de construction d'ouvrages de protection contre les forces de la nature le long des routes ouvertes au trafic motorisé, ne pourront qu'accentuer cette tendance. Les considérations qui suivent portent essentiellement sur les galeries abritant des tronçons routiers à deux voies de circulation. Elles sont évidemment applicables par analogie à d'autres profils transversaux.

1. Le gabarit d'espace libre

Ne sont indiquées ci-après que les valeurs applicables dans les alignements. Il est naturellement loisible de les adapter de cas en cas. Encore faut-il être conscient que des modifications faites dans un sens restrictif ont pour effet de diminuer le confort de l'usager, voire sa sécurité.

1.1 Les hauteurs libres

Pour la circulation motorisée, la hauteur libre se détermine à partir de la hauteur maximale, de 4 m, des véhicules automobiles telle que la prescrit la loi fédérale sur la circulation routière. On tient compte des chargements mal équilibrés, ainsi que du tangage des véhicules qu'entraînent les défauts de planéité du revêtement de la chaussée, en majorant cette hauteur d'une marge pour effets cinétiques de 0,2 m. Compte tenu, en sus, d'une marge de sécurité de 0,3 m, la hauteur libre totale à observer est de 4,5 m. Elle peut être portée éventuellement à 4,7 m si le maître de l'ouvrage estime judicieux de procéder aux remises en état ultérieures du revêtement par simple recharge.

Dans une galerie réservée à la seule circulation automobile, la hauteur des bordures de la chaussée sera normalement choisie à 0,18 m ; si la chaussée est accessible aux cyclistes, cette même hauteur devra être réduite à 0,1 m environ.

On tiendra compte du surplomb latéral de chargements de poids lourds, dont les roues peuvent effleurer la bordure, en respectant une hauteur libre réduite, de 4 m, comptée à partir du niveau de la chaussée, sur une distance de 0,2 m au-delà de la bordure (fig. 1). Vers les portails, cette hauteur devrait si possible être progressivement portée à 4,5 m le long de la voie entrante.

Pour ce qui concerne la circulation piétonnière, à la hauteur d'homme de 2 m il faut ajouter la marge pour effets cinétiques et la marge de sécurité, de 0,25 m chacune, afin d'obtenir la hauteur libre totale de 2,5 m. Les panneaux de signalisation peuvent toutefois déborder dans l'emprise de la marge de sécurité. Exceptionnellement même, il est permis de les poser dans l'espace sis à 2 m de hauteur au-dessus du niveau du trottoir.

1.2 Les largeurs libres

La largeur de la chaussée en galerie ne doit en aucun cas être inférieure à celle des tronçons d'accès. Il est intéressant de noter que les normes américaines de l'AASHTO imposent même une largeur de chaussée supérieure de 0,6 m à celle

des tronçons à ciel ouvert, et en aucun cas inférieure à 7,3 m, tandis que les directives allemandes RAS préconisent un élargissement de la chaussée de 0,5 m en galerie quand elle ne dépasse pas 7 m de largeur à ciel libre, afin d'améliorer les conditions de visibilité et de favoriser l'écoulement des eaux de ruissellement. Il faut considérer pour la circulation automobile une marge de sécurité latérale (largeur libre additionnelle) de part et d'autre de la chaussée. Les directives RAS préconisent les marges mentionnées au tableau 1 pour les cas où la chaussée est limitée par des bordures (accotement surélevé). En galerie, cependant, ces accotements surélevés ne peuvent mesurer moins d'un mètre de largeur afin de pouvoir être utilisés comme trottoirs de fortune.

En Suisse, où la largeur des refuges latéraux en galerie est laissée à l'appréciation du maître de l'ouvrage, sa valeur diffère selon la catégorie de route, la région parcourue et l'époque de la construction de la galerie, notamment. Ainsi, les galeries de protection contre les avalanches de la nouvelle route du Lucmagn, construites au début des années septante, comportent invariablement un refuge de 0,5 m du côté de la paroi et un trottoir de secours de 1 m du côté des baies. Au Simplon, par contre, la majorité des galeries comprend un refuge de 0,6 m du côté des baies et un trottoir de fortune de 1 m du côté de la paroi.

D'une manière générale, la chaussée devrait être flanquée, en galerie, de deux refuges de 0,5 m de largeur au minimum. Ce gabarit minimal ne devrait être adopté que dans les galeries courtes, sur des tronçons de routes peu fréquentés et parcourus à des vitesses relativement faibles.

TABLEAU 1: Marges latérales de sécurité selon les recommandations RAS (République fédérale d'Allemagne).

Vitesse limite autorisée sur la route	Marge latérale de sécurité*
— supérieure à 70 km/h	1,00 m
— de 50 à 70 km/h	0,75 m
— inférieure à 50 km/h	0,50 m

* Chaussée limitée latéralement par des bordures.

TABLEAU 2: Largeurs minimales des trottoirs selon les recommandations RAS (RFA).

Vitesse limite autorisée sur la route	LARGEUR MINIMALE DE TROTTOIR**
— supérieure à 70 km	1,75 m
— de 50 à 70 km/h	1,50 m
— inférieure à 50 km/h	1,25 m

** Un seul sens de circulation pédestre.

TABLEAU 3: Gabarits d'espace libre «hors tout» des convois exceptionnels.

Type de route d'approvisionnement	Poids total max. (kN)	Hauteur libre (m)	LARGEUR LIBRE «HORS TOUT» (m)
I	4800	5,20	7,50
II	2400	4,80	6,50
III	900	4,80	6,00
IV	900	4,50	6,00

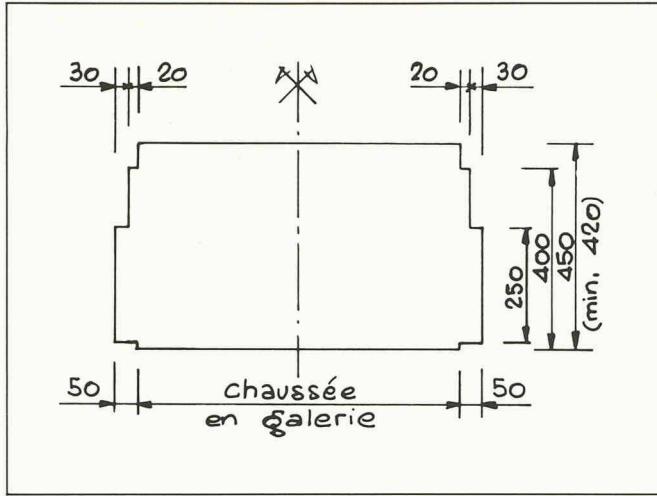


Fig. 1. — Gabarit minimum d'espace libre en tunnel, selon la pratique suisse.

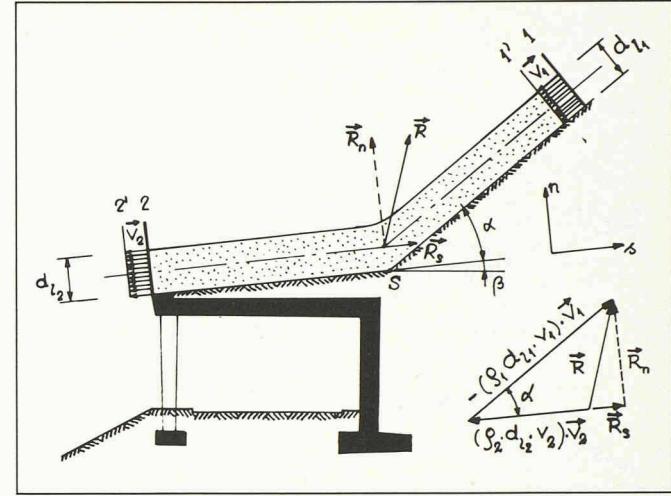


Fig. 2. — Détermination de la résultante des forces de déviation de l'avalanche.

Quand l'ouvrage doit également accueillir la circulation piédestre, il faut naturellement y prévoir des trottoirs. Selon les directives allemandes précitées, la largeur nécessaire par sens de circulation est de 0,75 m, aucune marge propre de sécurité latérale ne devant être prise en compte. La largeur de trottoir simple se calcule, par conséquent, en majorant la largeur nécessaire à la circulation piédestre de la marge de sécurité latérale nécessitée par la circulation automobile. On obtient ainsi les valeurs du tableau 2. A titre de comparaison, les valeurs données pour la largeur de trottoirs en dehors de localités par l'édition 1967 de la norme de l'Union des professionnels suisses de la route sont de 1,5 m à 2 m.

1.3 Les transports exceptionnels

On distingue, en Suisse, quatre types de routes d'approvisionnement selon le poids total autorisé des convois admis à y circuler. Les hauteurs libres et les largeurs libres «hors tout» y afférentes sont indiquées au tableau 3. Il y aura généralement avantage à centrer le gabarit d'espace libre pour les convois exceptionnels sur l'axe de la chaussée. Dans les courbes, il faut tenir compte de la surlargeur indispensable à l'inscription du convoi. De même, sur les tronçons où la déclivité varie, on prendra en considération les plus-values de la hauteur libre.

Pour les détails, on se reportera au rapport établi par le groupe de travail 21 de l'Union des professionnels suisses de la route (VSS).

2. Les charges de neige et d'avalanches

Dans le cas général, on peut distinguer les types de charges suivants :

- le poids des précipitations atmosphériques solides déposées directement sur la galerie, ou y accumulées par les vents ;
- le poids des dépôts de neige et de débris de toute nature laissés sur la

galerie par les avalanches successives ;

- les charges dynamiques provenant de l'avalanche en mouvement (force de déviation, force de frottement, force de soulèvement).

2.1 La force de déviation

A des fins de modélisation, et pour simplifier les calculs, on peut considérer l'avalanche en mouvement comme un écoulement stationnaire de fluide compressible. Quand le mouvement est variable, en effet, les variations de son champ de vitesses ne s'opèrent que de manière progressive au passage de l'avalanche sur la galerie et n'engendrent, de ce fait, que des efforts du second ordre ; de surcroît, l'inertie propre de la toiture, ainsi que celle de la couverture de terre et de neige sont à même d'en amortir l'effet sur la structure.

La masse d'avalanche en état d'écoulement stationnaire sur une largeur unitaire entre les profils 1 et 2 (fig. 2) se déplace pendant le temps infinitésimal dt de manière à venir se trouver entre les profils 1' et 2'. La masse comprise entre les profils 1' et 2 ne subit pas de modification de la quantité de mouvement, puisque la masse totale et la vitesse de chaque point matériel y restent constantes. La masse pénétrant par le profil 1 est de

$$\varrho_1 \cdot d_{l1} \cdot v_1 \cdot dt$$

où ϱ = masse spécifique ;

d_l = épaisseur de l'avalanche en mouvement ;

α = angle de rupture de pente ;
 v = vitesse de l'avalanche.

tandis que celle qui sort par le profil 2 vaut

$$\varrho_2 \cdot d_{l2} \cdot v_2 \cdot dt$$

La modification de la quantité de mouvement, pendant le laps de temps dt , de la masse comprise entre les profils 1 et 2 est donc de

$$(\varrho_2 \cdot d_{l2} \cdot v_2 \cdot dt) \vec{v}_2 - (\varrho_1 \cdot d_{l1} \cdot v_1 \cdot dt) \vec{v}_1$$

et le théorème général de la quantité de mouvement,

$$\vec{R} = \frac{d}{dt} (\sum m \vec{v})$$

qui donne la résultante des forces agissant sur cette masse, devient

$$\vec{R} = (\varrho_2 \cdot d_{l2} \cdot v_2) \vec{v}_2 - (\varrho_1 \cdot d_{l1} \cdot v_1) \vec{v}_1$$

La ligne d'action de la résultante passe par le point d'intersection des lignes d'action des vecteurs vitesses appliqués aux centres de gravité des sections 1 et 2 considérées. Cette résultante est appelée force de déviation. A noter qu'à la figure 2, on a admis que les filets d'écoulement s'inscrivent dans des plans verticaux et que la vitesse est uniforme dans la section normale supposée rectangulaire. Alors que l'estimation de la vitesse et de l'épaisseur de l'avalanche peut être faite aisément au profil 1 s'il est choisi assez loin vers l'amont pour se trouver sur la pente naturelle du terrain, celle de ces mêmes valeurs devient très malaisée au profil 2, car l'avalanche y est ralentie pour deux raisons : la pente du terrain est plus faible et la force de déviation accentue le phénomène du frottement. Cependant, la composante normale à la couverture de la force de déviation

$$|\vec{R}_n| = (\varrho_1 \cdot d_{l1} \cdot v_1) \cdot |\vec{v}_1| \cdot \sin \alpha$$

est indépendante des conditions d'écoulement à travers le profil 2 et peut donc être calculée à partir de données sûres. Le changement de pente s'accomplissant en fait progressivement, selon un arrondi, la force de déviation n'est autre que la résultante d'une force uniformément répartie sur toute la longueur de la courbe de raccordement des pentes. Comme le rayon de courbure du raccordement est mal connu et peut même varier dans le temps, et selon l'épaisseur des dépôts de neige, on admet, dans un souci de simplification, que la force de déviation est uniformément répartie entre le point théorique S de rupture de

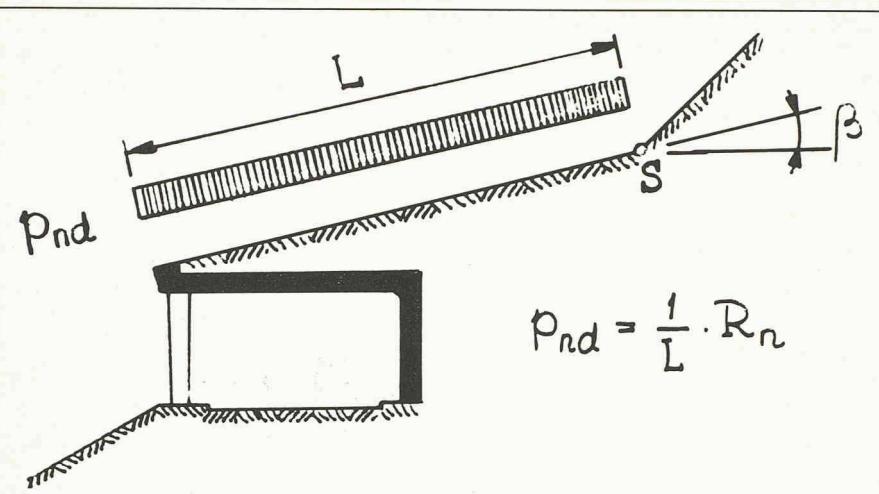


Fig. 3. — Longueur de répartition de la force de déviation.

pente et le bord aval de la toiture (fig. 3). Le poids de l'avalanche en mouvement sur la toiture est fonction de la masse spécifique et de l'épaisseur de la couche en chacun de ses points. Comme ces caractéristiques ne sont déjà déterminables que de manière très grossière le long de la pente naturelle du terrain, il n'y aurait pas de sens à tenter d'en saisir les variations selon les changements de pente; aussi admet-on sur la couverture une charge d'avalanche identique à celle qui s'exerce sur la pente non perturbée par l'aménagement de la galerie. La valeur de la force de déviation uniformément répartie sur la surface du terrain, et exprimée par unité de cette même surface, s'exprime par conséquent par la formule

$$P_{nd} = \frac{1}{L} \cdot R_n$$

ou, en explicitant,

$$P_{nd} = \frac{1}{L} \cdot (\rho_a \cdot d_a \cdot v_1^2) \sin \alpha$$

2.2 Les forces de frottement

Il n'est pas possible de calculer les forces de frottement avec précision. On peut cependant en déterminer une limite supérieure en déduisant du théorème de la quantité de mouvement la valeur théorique du frottement qui freinerait l'avalanche assez fortement pour l'immobiliser. Il s'agit, en somme, de poser $v_2 = 0$ dans l'exemple précédent et de tenir compte que la résultante R se décompose maintenant en la force de déviation D et la résultante F des forces de frottement sur la toiture. On obtient les relations:

$$\vec{R}_n = \vec{D}_n$$

$$\vec{R}_s = \vec{D}_s + \vec{F}$$

Si l'on pose de surcroît $D_s = 0$, on obtient

$$F = -(\rho_a \cdot d_a \cdot v_1^2) \cos \alpha$$

Cette relation, qui permettrait de définir une limite supérieure de la force de frot-

tement sur la galerie, donne des valeurs généralement trop élevées. Aussi utilise-t-on, en pratique, des valeurs déterminées expérimentalement par l'Institut fédéral de Weissfluhjoch-Davos à l'aide d'appareils de mesure installés à demeure sur des galeries existantes.

Les valeurs du coefficient de frottement ainsi déterminées varient, selon les galeries, entre

$$\mu = 0,2 \text{ et } \mu = 0,4.$$

A noter que les avalanches poudreuses ne provoquent que des efforts de frottement négligeables.

2.3 Autres forces

Il peut arriver que des galeries très courtes soient entièrement débordées sur les portails par des avalanches poudreuses dévalant sur un large front. Dans cette éventualité, d'ailleurs très rare, la galerie peut être soumise à des efforts de succion de l'ordre de 1 kN/m² au plus.

Certaines galeries peuvent être menacées par des avalanches provenant du versant opposé. Elles sont alors soumises à des poussées horizontales ainsi que, le cas échéant, à des pressions dirigées de bas en haut contre la toiture (force de soulèvement).

2.4 Cas de charge à prendre en considération

Le rapport qui accompagne la carte du danger d'avalanches élaborée par l'Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches de Weissfluhjoch-Davos comprend notamment les données suivantes pour chaque couloir d'avalanches relevé:

- l'épaisseur, mesurée perpendiculairement à la pente, d_a et la masse spécifique ρ_a des précipitations atmosphériques solides déposées directement sur la galerie ou y amassées par les vents;
- l'épaisseur, mesurée perpendiculairement à la pente, d_a et la masse spécifique $\rho_{a'}$ des amas de neige subsistant sur la galerie après le passage d'avalanches;

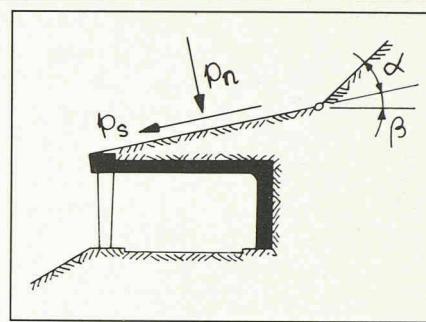


Fig. 4. — Composantes normales et parallèles à la surface de la couverture de la galerie.

- l'épaisseur d_a et la masse spécifique ρ_a de l'avalanche en mouvement, ainsi que sa vitesse d'écoulement v_1 ;
- la valeur du coefficient de frottement μ .

Ces données permettent de calculer toutes les charges d'avalanches sur la galerie. Il s'agit de charges uniformément réparties, rapportées à la surface unitaire de la couverture de la galerie, parallèles et perpendiculaires à celle-ci, p_s et p_n respectivement (fig. 4).

Les deux cas de charge généralement pris en considération sont les suivants (fig. 5).

Cas 1: amas de neige subsistant sur la couverture après le passage d'avalanches

$$p_{na'} = \rho_{a'} \cdot g \cdot d_{a'} \cdot \cos \beta$$

$$p_{sa'} = \rho_{a'} \cdot g \cdot d_{a'} \cdot \sin \beta$$

Cas 2: avalanche dévalant par-dessus la couche de précipitations solides

$$p_n = p_{na} + p_{nl} + p_{nd}$$

$$p_s = p_{sa} + p_{sl} + \mu \cdot p_{nd}$$

ou, explicitement,

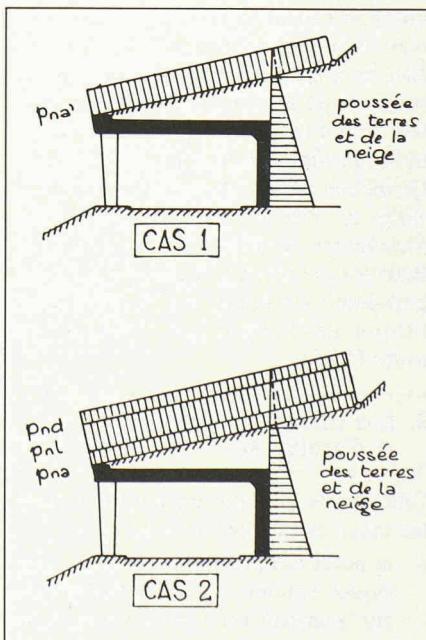


Fig. 5. — Cas de charge généralement pris en considération (neige et avalanches).

$$p_n = (\rho_a \cdot g \cdot d_a + \rho_l \cdot g \cdot d_l) \cos \beta + \\ + \frac{1}{L} \rho_l \cdot g \cdot d_l \cdot v_l^2 \cdot \sin \alpha$$

$$p_s = (\rho_a \cdot g \cdot d_a + \rho_l \cdot g \cdot d_l) \sin \beta + \\ + \frac{\mu}{L} \cdot \rho_l \cdot g \cdot d_l \cdot v_l^2 \cdot \sin \alpha$$

(L = longueur de talus entre le point théorique de rupture de pente et le bord libre de la toiture.)

La poussée provenant d'amas de neige se calcule selon la formule

$$e_s = \lambda_s \cdot \gamma_s \cdot h \text{ avec } \lambda_s = \frac{1}{m-1}$$

par analogie avec la poussée des terres, avec les valeurs suivantes de m :

- glace $m = 2$
- neige $m = 4 \text{ à } 5$
- neige fraîche $m = 50$.

Les actions dynamiques engendrées par les avalanches en mouvement (p_{nl} et p_{sl} , ainsi que p_{nd} et $\mu \cdot p_{nd}$, notamment) doivent être considérées, pour le calcul statique, comme des charges complémentaires au sens de l'article 3.02 de la norme SIA 162, édition 1968.

3. La poussée des terres

On sait, depuis les observations faites par Darwin en 1883, que la pression exercée par un massif sableux sur un mur de soutènement se modifie lorsque celui-ci se déplace. Ce n'est pourtant qu'après la publication des résultats des essais auxquels Terzaghi avait procédé en 1934 que les ingénieurs admirent le fait que la poussée active des terres ne se développe qu'à la condition que le mouvement du mur de soutènement soit d'une ampleur suffisante pour que se mobilise dans le massif soutenu la résistance au cisaillement. En 1973, Casagrande déplore le fait que nombre d'ouvrages de soutènement soient systématiquement dimensionnés pour la poussée active des terres, l'idée étant largement répandue que la plupart des structures sont susceptibles d'effectuer sans autre un mouvement de l'ordre de 1% de leur hauteur totale sous l'effet de la poussée du massif soutenu !

La norme allemande DIN 1055, édition de 1976, n'autorise expressément la prise en compte de la poussée active que sous réserve que soit garanti le mouvement de la structure nécessaire à cet effet. Elle exige la prise en considération d'une poussée accrue pour le dimensionnement de la structure lorsque ce mouvement est entravé, voire empêché.

La norme préconise d'adopter, comme valeur approchée, la poussée au repos dans le cas de structures rigides et fixes contre lesquelles le remblayage a été effectué par compactage soigneux des matériaux. Il convient de s'assurer que les contraintes ainsi créées dans le massif ne seront pas réduites au cours de phases

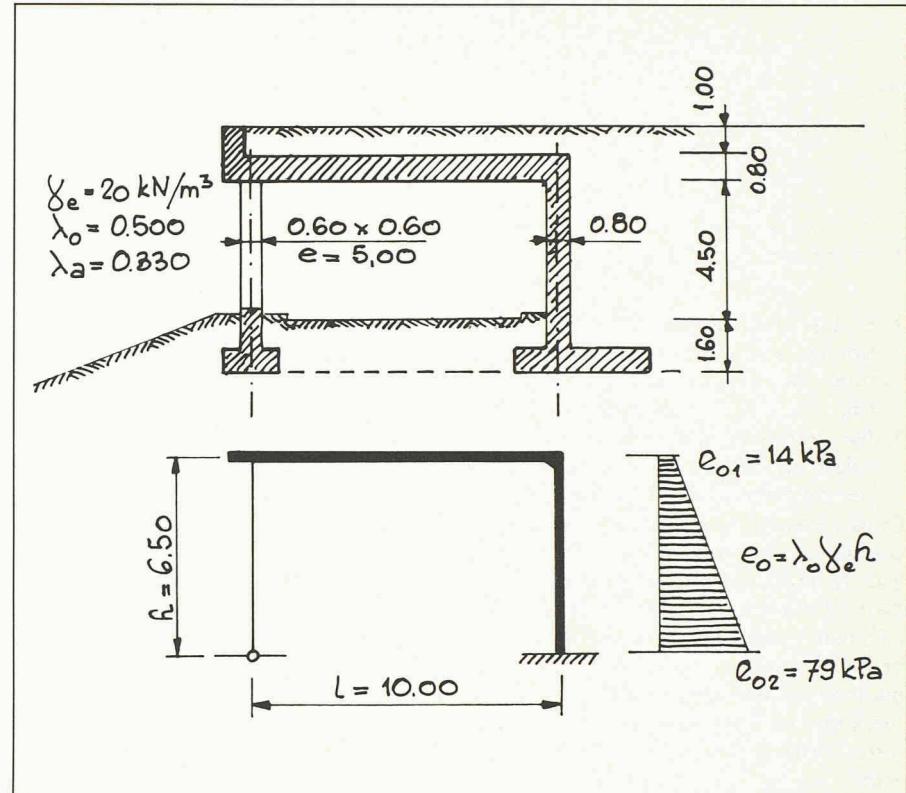


Fig. 6. — Dimensions et système statique de la galerie prise en considération pour l'exemple de calcul de la poussée des terres.

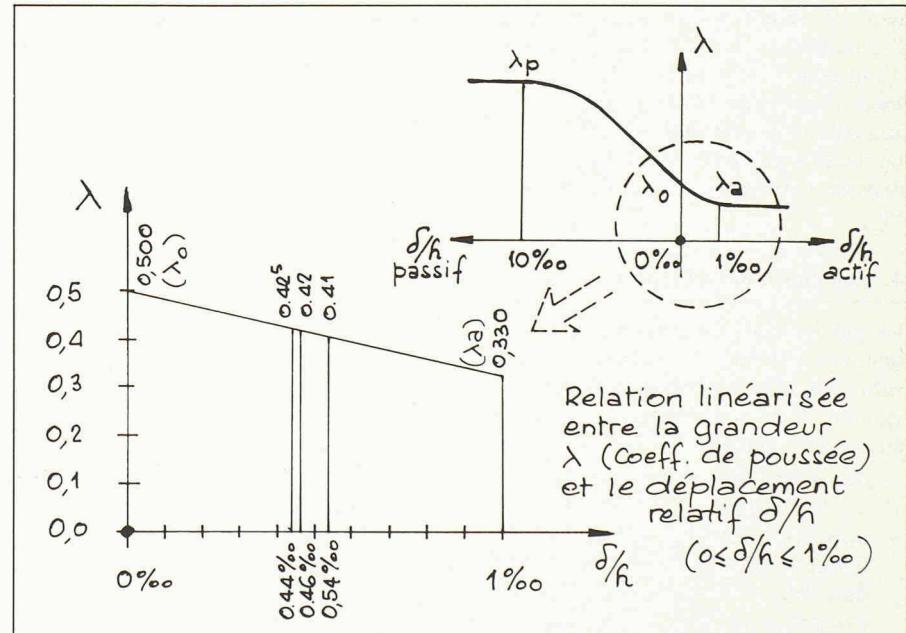


Fig. 7. — Graphique pour la détermination approchée de la poussée effective des terres ('poussée accrue').

ultérieures de la construction ou à la suite de phénomènes de retrait, tant dans la structure elle-même que dans le sol. Pour connaître la poussée des terres accrue, qui se situe quelque part entre les valeurs des poussées au repos et active, il faudrait connaître l'allure exacte de la courbe donnant la valeur de la poussée en fonction du mouvement effectué par la structure supposée libre en tête. Pour les cas usuels, où une approximation grossière est déjà bienvenue en soi, on pourrait se contenter d'une relation linéaire entre la valeur de la poussée au repos pour un mouvement nul et celle de la poussée active pour un mouvement du

couronnement égal au millième de la hauteur totale de l'ouvrage.

Soit, par exemple, une galerie lourde schématisée comme l'indique la figure 6. La détermination grossière de la valeur de la poussée des terres pourrait être envisagée comme suit²:

1. Calcul du mouvement horizontal effectué par la toiture sous l'effet de la poussée au repos (méthode classique du travail virtuel, sections de béton supposé non fissuré).

²Coefficients admis:
— poussée au repos $\lambda_o = 0,500$
— poussée active $\lambda_a = 0,330$

TABLEAU 4: Détermination de la poussée effective des terres.

Valeur admise	Procédé utilisé	Valeur trouvée
$\lambda = \lambda_o = 0,50$	travail virtuel graphique	$\delta/h = 0,54\%$
$\delta/h = 0,54\%$	travail virtuel graphique	$\lambda = 0,41$
$\lambda = 0,41$	travail virtuel graphique	$\delta/h = 0,44\%$
$\delta/h = 0,44\%$	travail virtuel graphique	$\lambda = 0,425$
$\lambda = 0,425$	travail virtuel graphique	$\delta/h = 0,46\%$
$\delta/h = 0,46\%$	travail virtuel graphique	$\lambda = 0,42$

2. Etablissement du graphique de la relation de la poussée des terres en fonction du déplacement relatif δ/h (fig. 7).

3. Par itération, détermination de la valeur effective approchée de la poussée des terres (tabl. 4).

Dans l'exemple considéré, la valeur du coefficient de poussée obtenue est de 0,42, le déplacement relatif y correspondant s'élevant à quelque 0,46%. Même en tenant compte de l'effet d'un fluage du béton qui doublerait la valeur de la déformation élastique sous l'effet d'une poussée supposée constante, la poussée des terres restera supérieure à la poussée active.

Dans la plupart des cas, la poussée s'exerçant sur les galeries ouvertes n'est cependant autre que la poussée active. Ainsi, dans l'exemple précédent, si l'on réduit l'épaisseur de la dalle et de la paroi de 0,8 m à 0,6 m, et pour peu que l'enca斯特ement complet de la paroi dans le sol ne soit plus garanti, le déplacement horizontal relatif sous l'effet de la poussée active dépasse nettement la valeur critique de 1%.

4. Les chocs de véhicules

La galerie doit être dimensionnée de manière à résister à l'effet de chocs de véhicules, conformément aux normes en vigueur. Trois conceptions peuvent être envisagées. On peut :

- dimensionner les piliers de manière qu'ils résistent à l'effet de chocs, ou
- dimensionner la dalle de la toiture de manière qu'elle ne subisse pas de dommage irréparable en cas de destruction d'un pilier, ou encore
- protéger les piliers par un muret continu de hauteur suffisante et à l'épreuve des chocs.

La première solution entraîne généralement la prise en considération de piliers trapus. La deuxième semble être la plus élégante et la plus économique ; elle présente cependant des problèmes difficiles à résoudre dans les zones des joints de dilatation de la dalle de toiture : en cas de rupture d'un pilier, la dalle doit, en effet, y reprendre les charges en porte à faux. Il faut donc, à cet effet, réduire par exemple l'espacement des piliers dans les zones des joints, ou y renforcer localement les piliers comme le prévoit la première solution envisagée plus haut.

La troisième solution nécessite la construction d'un muret continu qui bouche

la vue sur le paysage. Il y a donc lieu de n'adopter cette solution qu'avec circonspection sur une route de caractère touristique et de ne l'appliquer qu'au seul cas où un parapet, ou une glissière de sécurité, devrait de toute façon être installé pour des raisons inhérentes à la seule sécurité de la circulation routière, c'est-à-dire pour empêcher les véhicules désemparés de basculer dans le vide.

5. Les détails de construction

5.1 La couverture

Les sollicitations de la toiture de la galerie peuvent être réduites dans une mesure notable si l'on respecte certaines règles lors du réglage des terres rapportées :

- la pente de la couverture doit différer le moins possible du talus naturel afin d'assurer l'écoulement continu de

l'avalanche et, ainsi, de maintenir les effets dynamiques dans des limites étroites ;

- si le talus naturel ne peut être conservé, il y a lieu de raccorder la surface de la couverture de la galerie au terrain naturel par un arrondi le plus ample possible, afin de répartir la force de déviation sur la plus grande surface possible ;
- l'arête théorique de la rupture de pente doit être implantée le plus loin possible vers l'amont, afin que la majeure partie de la force répartie de déviation s'exerce sur le terrain en place, en dehors de l'emprise de la toiture.

5.2 La toiture

Lorsque les charges et les portées le permettent, on réalise un toit en forme de dalle plate. Par rapport aux structures traditionnelles à dalles nervurées, celle-ci a pour avantage de ne présenter aucune aspérité, aucune partie saillante risquant d'accrocher au passage le chargement mal arrimé ou mal bâché d'un poids lourd. Et pourtant, la raison primordiale du choix de ce type de structure réside dans le fait qu'il garantit une meilleure luminosité naturelle dans la galerie. Si l'on compare la coupe normale d'une galerie coiffée d'une dalle plate (fig. 8a) à celle d'une galerie dont le toit est consti-

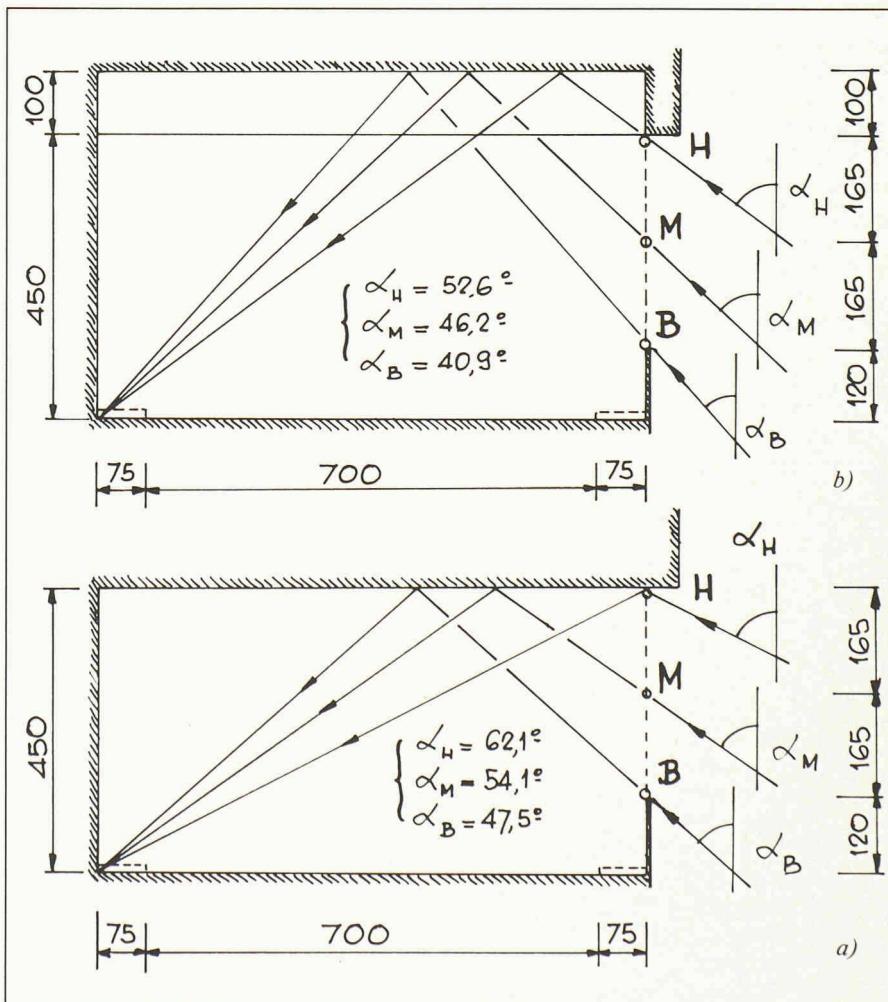


Fig. 8. — Comparaison des faisceaux de rayons lumineux transversaux réfléchis par la face inférieure de la toiture (dalle plate et dalle nervurée transversalement).

tué d'une dalle nervurée transversalement comme indiqué à la figure 8b, il apparaît, en effet, que si les rayons lumineux provenant de l'extérieur et frappant directement la chaussée sont identiques, il n'en va pas de même de la lumière qui ne balaie la chaussée qu'après réflexion par le plafond : l'angle du faisceau lumineux émis par un point de la baie et réfléchi par le plafond uni est, en moyenne, supérieur de quelque 17% à celui qui correspond à la dalle nervurée. Ces rayons lumineux étant émis par le sol extérieur, leur apport à la luminosité de la chaussée sera particulièrement sensible par ciel couvert alors que le sol est recouvert de neige.

C'est pourtant l'éclairage de la chaussée par des rayons lumineux entrant dans la galerie obliquement, ou dans un plan parallèle à son axe, qui varie le plus selon le type de dalle adoptée. Comme le montre la figure 9, les espaces compris entre les nervures constituent autant de cavités absorbant les rayons lumineux, à l'instar de corps noirs de laboratoire. La différence est encore plus accusée de nuit, lorsque l'intérieur de la galerie est uniquement éclairé par les phares des véhicules.

Dans le cas de nervures longitudinales, les phénomènes sont pratiquement identiques, quoique inversés. (Il faut y tenir compte, en outre, de l'influence des entretoises.)

5.3 L'espacement des piliers

L'espacement des piliers dépend de nombreux facteurs, notamment des charges prises en considération sur la toiture, de la rigidité de la structure du toit, de l'effet des chocs de véhicules à prendre en compte, des degrés d'encastrement des piliers à leurs extrémités, et des dimensions que l'on désire donner à ces piliers. Il y a cependant d'autres critères importants à ne pas négliger. Il peut arriver, en effet, que les amas de neige déposés par les avalanches successives au pied de la galerie s'amoncellent à une hauteur telle qu'il faille garnir les baies de cloisons translucides en parpaings de verre. Plus récemment sont apparus sur le marché des panneaux translucides en polycarbonate qui peuvent avantageusement remplacer les parpaings de verre, dans certains cas. Leur extrême légèreté en rend, en effet, la manutention particulièrement aisée et en permet la pose et la dépose saisonnières. Dans les régions, où les secteurs, où les avalanches se composent de neige compacte, très consistante, il suffit parfois de suspendre en travers des baies un treillis métallique de résistance adéquate, éventuellement renforcé par quelques câbles tendus.

Si l'éventualité de la fermeture ultérieure des baies par des cloisons translucides ne peut être exclue a priori, on devra donc tenir compte de la poussée de la neige qui pourra agir sur les piliers par l'intermédiaire des cloisons. Un espacement

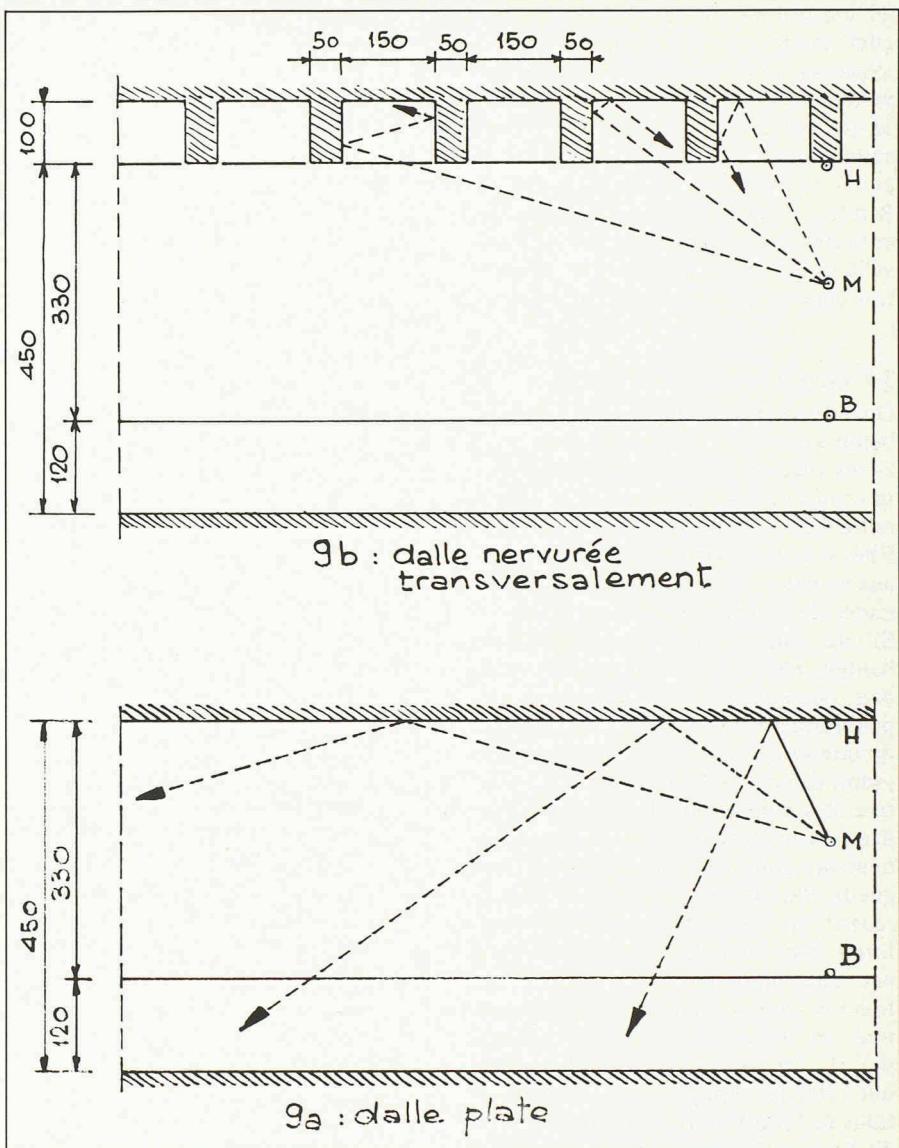


Fig. 9. — Comparaison des faisceaux de rayons lumineux longitudinaux réfléchis par la face inférieure de la toiture (dalle plate et dalle nervurée transversale).

réduit des piliers permet de raidir les cloisons et de les appuyer latéralement.

5.4 Les joints de dilatation

Traditionnellement, on prévoit des joints de dilatation dans les parois et les dalles

de galeries à des intervalles variant de quelque 15 à 30 m selon les types de construction, les conditions climatiques, etc. Les joints de dilatation constituent pourtant, en quelque sorte, les points faibles des galeries, quel que soit le type adopté ou les matériaux de garnissage et de pro-

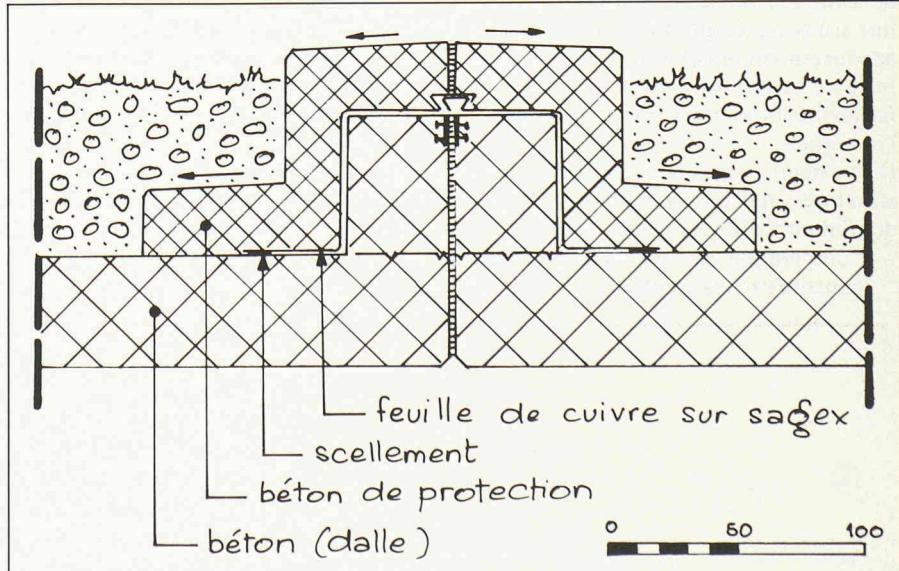


Fig. 10. — Exemple de joint de dilatation d'une dalle de galerie (coupe).

tention utilisés (fig. 10). Ils peuvent, en effet, donner entière satisfaction pendant plusieurs années et, un beau jour, au moment où l'on ne s'y attend plus, présenter des traces d'humidité, voire de suintements, très souvent sans que l'on puisse en déceler la cause profonde. Rendus perplexes, certains ingénieurs ont orienté leur recherche dans une nouvelle direction : la construction de galeries dépourvues de joints de dilatation.

5.5 Les galeries d'un seul tenant

On observe généralement sur les murs en béton exposés aux intempéries, de grossières fissures irrégulières distantes les unes des autres d'une longueur variant entre 0,7 et 1,5 fois la hauteur du mur. Elles sont dues principalement au retrait, aux variations de température et à l'alternance de périodes humides et sèches. Si l'on compare entre eux des murs de hauteur identique et de longueur variables, encastrés dans une fondation supposée indéformable et fixe, on constate qu'une variation de température du mur induit dans l'axe de symétrie de la structure des contraintes de traction allant décroissant du pied du mur à son couronnement, pour les murs de faible longueur. Plus le mur est long et plus la répartition des contraintes devient uniforme dans l'axe de symétrie pour finir par être pratiquement constante sur toute la hauteur lorsque la longueur du mur en dépasse huit fois la hauteur (fig. 11). En d'autres termes, cela signifie que l'état des contraintes dues aux variations de température, ainsi qu'au retrait d'ailleurs, est indépendant de la longueur du mur dès que celle-ci dépasse une certaine longueur. Rien ne s'oppose donc, en principe, à la construction de murs d'un seul tenant de longueur illimitée. Ce raisonnement, étendu au cas de galeries, a rendu possible, très récemment, la construction de galeries de protection contre les avalanches d'un seul tenant dépassant la centaine de mètres. Ce type de structure requiert, cela va sans dire, une armature longitudinale appropriée et adéquatement répartie sur la section normale de béton, de manière à répartir les fissures de façon uniforme et d'en limiter l'ouverture.

D'une manière générale, la réalisation de structures en béton dépourvues de joints de dilatation offre les avantages suivants :

- l'élimination des points faibles que constituent les joints de dilatation ;

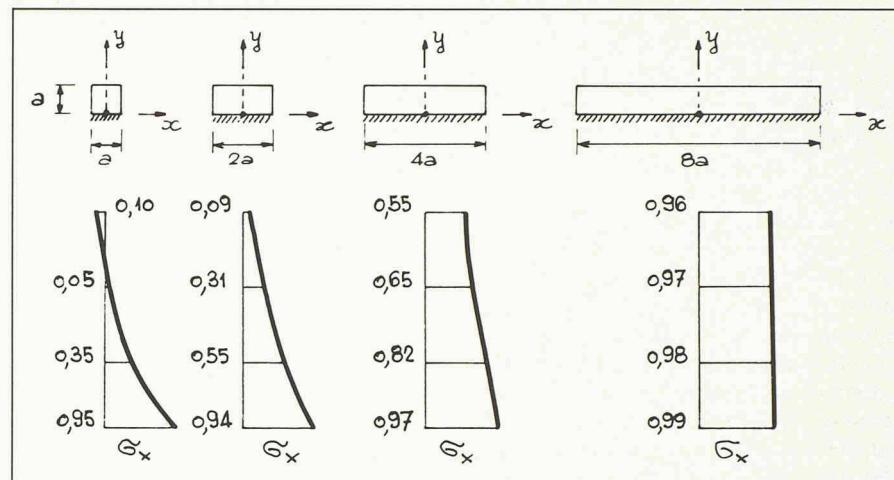


Fig. 11. — Mur encastré dans une fondation supposée indéformable : contraintes de traction horizontales à l'axe, dues à une baisse de la température (selon H. Falkner).

Bibliographie

- WILDI P. Quelques réflexions sur la protection routière contre le danger d'avalanches (Ingénieurs et architectes suisses, n° 11/85, du 23 mai 1985).
- Normes de l'Union des professionnels suisses de la route (VSS).
- Recommandations pour l'établissement des projets de tunnels routiers (Compléments aux directives du Département fédéral de l'intérieur de 1970), Office fédéral des routes, 19.2.1982.
- Richtlinien für die Anlage von Strassen (RAS), Ausgabe 1982, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Strassenentwurf, Alfred-Schütte-Allee 10, 5000 Köln 21.
- Ausnahmetransporte, Bericht der Arbeitsgruppe 21 der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Oktober 1980.
- Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, 12th Edition, 1977, Washington DC, USA.
- Cartes du Service topographique fédéral, échelle 1:100 000 (surimpression « Transports exceptionnels »).
- WILDI P. Quelques réflexions concernant les charges à admettre pour le calcul des ouvrages d'art du réseau routier suisse (Ingénieurs et architectes suisses, n° 26, 1982).
- SOMMERHALDER E. Weissfluhjoch-Davos, Ablenkveerbau, Bündner Wald, Nr. 9, 1972.
- SALM B. und SOMMERHALDER E. Beanspruchung von Lawinenschutztgalérien durch Schnee, Route et circulation routière, n° 1, 1964.
- CASAGRANDE LEO. Comments on Conventional Design of Retaining Structures (Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, February 1973).
- Deutsche Normen DIN 1055, Teil 2, Lastannahmen für Bauten, Bodenkenngrößen, Februar 1976.
- SCHULZE W. und SIMMER K. Grundbau, Verlag Teubner, Stuttgart, 1978.
- WEISSENBACH A. Erläuterungen zum Entwurf der DIN 1055, Teil 2 (Die Bautechnik, Februar 1974).
- FALKNER H. Fugenloser Stahlbetonbau (Beton- und Stahlbetonbau, Nr. 7, 1984).
- FALKNER H. Fugenlose und wasserundurchlässige Stahlbetonbauten ohne zusätzliche Abdichtung, Vorträge Deutscher Betontag 1983.
- FALKNER H. Risse in Stahl- und Spannbetonbauten, Theorie und Praxis, SIA-Dokumentation Nr. 23, 1977.
- Murs de soutènement, bases de calcul et de construction, Union des professionnels suisses de la route, 8008 Zurich.

- la disparition d'éléments d'appui auxiliaires (piliers doubles, par exemple) ;
- l'accélération du rythme de la construction ;
- l'amélioration du comportement de la structure sous l'action des secousses telluriques, des chocs de véhicules et des effets dynamiques des avalanches.

Adresse de l'auteur :

Pierre Wildi
Ing. civil EPFZ/SIA
Office fédéral des routes
3003 Berne

Du même auteur, nous publierons un dernier article consacré aux galeries de protection contre les avalanches, plus particulièrement à leur intégration dans le site.