Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses

Band: 119 (1993)

Heft: 25

Artikel: Refroidissement de la roche dans le tunnel du Simplon: modélisation par calcul analytique

Autor: Pahud, Daniel / Vuataz, François-D.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-78087

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: 13.01.2026

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

Refroidissement de la roche dans le tunnel du Simplon

Modélisation par calcul analytique

Par Daniel Pahud, Groupe de physique appliquée, Université de Genève, 1231 Conches, François-D. Vuataz et Gabriele Bianchetti, Centre de recherches scientifiques fondamentales et appliquées de Sion, Rue de l'Industrie 45, 1951 Sion

Résumé

Dans le cadre du programme de prospection des ressources géothermiques du Valais *(GÉOTHERMOVAL)*, une étude systématique du tunnel du Simplon a été entreprise. De très nombreuses sources thermales et subthermales ont été recoupées lors du percement du tunnel au début du siècle. Actuellement, un canal d'évacuation draine toutes les eaux vers les portails nord et sud, ce qui représente un potentiel thermique global de 11 MWt[1]. Quatre forages de 65 à 148 m de profondeur ont été réalisés dans le but de rencontrer soit des circulations d'eau chaude, soit des zones sèches permettant d'évaluer le gradient géothermique. Deux d'entre eux ne sont pas productifs et ils ont pu servir à l'étude du refroidissement de la roche dans le tunnel depuis 1902.

Le calcul de ce refroidissement a nécessité la mise au point d'une solution analytique pour résoudre l'équation de diffusion de la chaleur dans la géométrie fixée par le tunnel. Depuis le percement, la roche autour du tunnel a été refroidie par l'accélération de la circulation d'eau souterraine et par les courants d'air induits dans les deux galeries, en raison du passage des trains et des différences barométriques entre les versants sud et nord du massif du Simplon. La température de la roche est la somme de trois contributions: la température initiale, l'effet du gradient géothermique et l'effet du refroidissement. Les très nombreuses mesures et observations de Schardt (1898-1907) ont permis de retrouver la température initiale à l'endroit des forages F2 et F4.

Sur la base de la température initiale du rocher et de ses caractéristiques thermiques, de l'évolution de la température dans le tunnel et de la température mesurée au fond des forages, les profils de température dans F2 et F4 sont recalculés et comparés aux mesures. Le résultat des simulations pour la zone du forage F2 montre que le flux de chaleur dans le tunnel atteint actuellement une valeur de 110 W/m. Le gradient géothermique sous le tunnel, corrigé du refroidissement, vaut 40 ± 5 °C/km. Pour la zone du forage F4, le flux de chaleur atteint actuellement 150 W/m. Quant au gradient géothermique sous le tunnel, il vaut 28 ± 7 °C/km. Ces valeurs de flux sont à considérer avec une marge d'erreur de 20%, et la valeur de 100 W/m peut être extrapolée à l'ensemble du tunnel. L'épaisseur de roche refroidie sous le tunnel a pu être calculée comme atteignant 250 m en 1990. A cette profondeur, la température de la roche actuelle devrait en effet être égale à la température initiale existant avant le percement du tunnel du Simplon.

1. Introduction

L'étude de la modélisation du refroidissement de la roche dans le tunnel du Simplon a été entreprise sous l'égide du Centre de recherches scientifiques fondamentales et appliquées de Sion (CRSFA). Dans le cadre de son programme *GÉOTHERMOVAL*, dont les objectifs sont la prospection et la mise en valeur des ressources géothermiques du canton du Valais [4][2], le CRSFA étudie depuis 1988 le potentiel géothermique du tunnel du Simplon. Plus de 200 venues d'eau thermales et subthermales ont été recoupées lors du percement des deux galeries au début du XXe siècle [5]. Depuis lors, un canal d'évacuation draine toutes les eaux vers les portails nord (Brigue) et sud (Iselle) (fig. 1), ce qui représente un potentiel thermique de 0,7, respectivement 10 MWt [7]. Un des points forts du programme d'étude du Simplon a été la réalisation, en 1990, de quatre forages de 65 à 148 m de profondeur dans une des deux galeries du tunnel (fig. 2). Ces forages avaient pour but, soit de trouver des circulations d'eau thermale dans les zones de sources (forages F1 et F3), soit de mesurer le gradient géothermique et d'évaluer la zone de refroidissement de la roche autour du tunnel dans des zones sèches (forages F2 et F4), [6,1].

Sur les quatre forages réalisés, deux ne produisent pas d'eau. Il s'agit du forage F2, profond de 108 m, situé à 12,5 km du portail nord, et du forage F4, dans la région la plus chaude du tunnel, à 7,8 km et d'une profondeur de 148 m. Les roches de ces deux forages ont l'avantage d'être quasiment imperméables, ce qui permet de supposer que le refroidissement de celles-ci autour du tunnel ne s'effectue que par le processus de conduction de la chaleur. Le calcul de ce refroidissement passe par la résolution de l'équation de diffusion de la chaleur dans la géométrie fixée par le tunnel (géométrie cylindrique). Une solution analytique de ce problème a déjà été développée et informatisée par Pahud [9]. L'outil de calcul résultant permet d'évaluer la zone pertur-

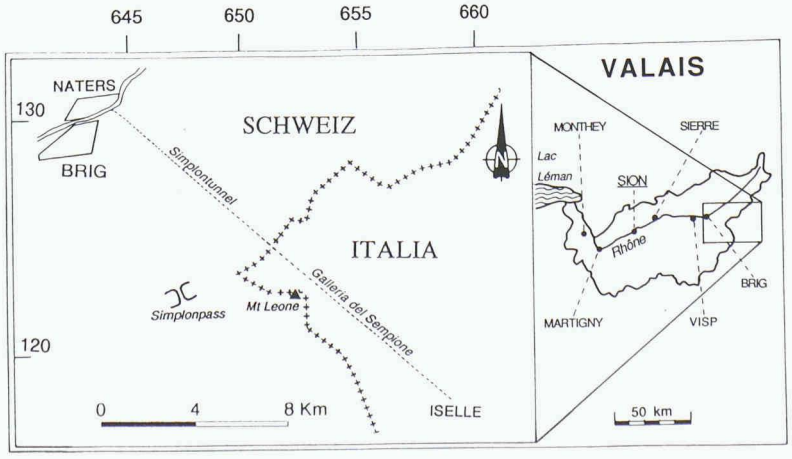

Fig. 1. – Localisation du tunnel du Simplon [1]

[1]MWt = mégawatt thermique (à distinguer du MWe, ou mégawatt électrique, selon l'exploitation envisagée du potentiel en question)

[2]Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

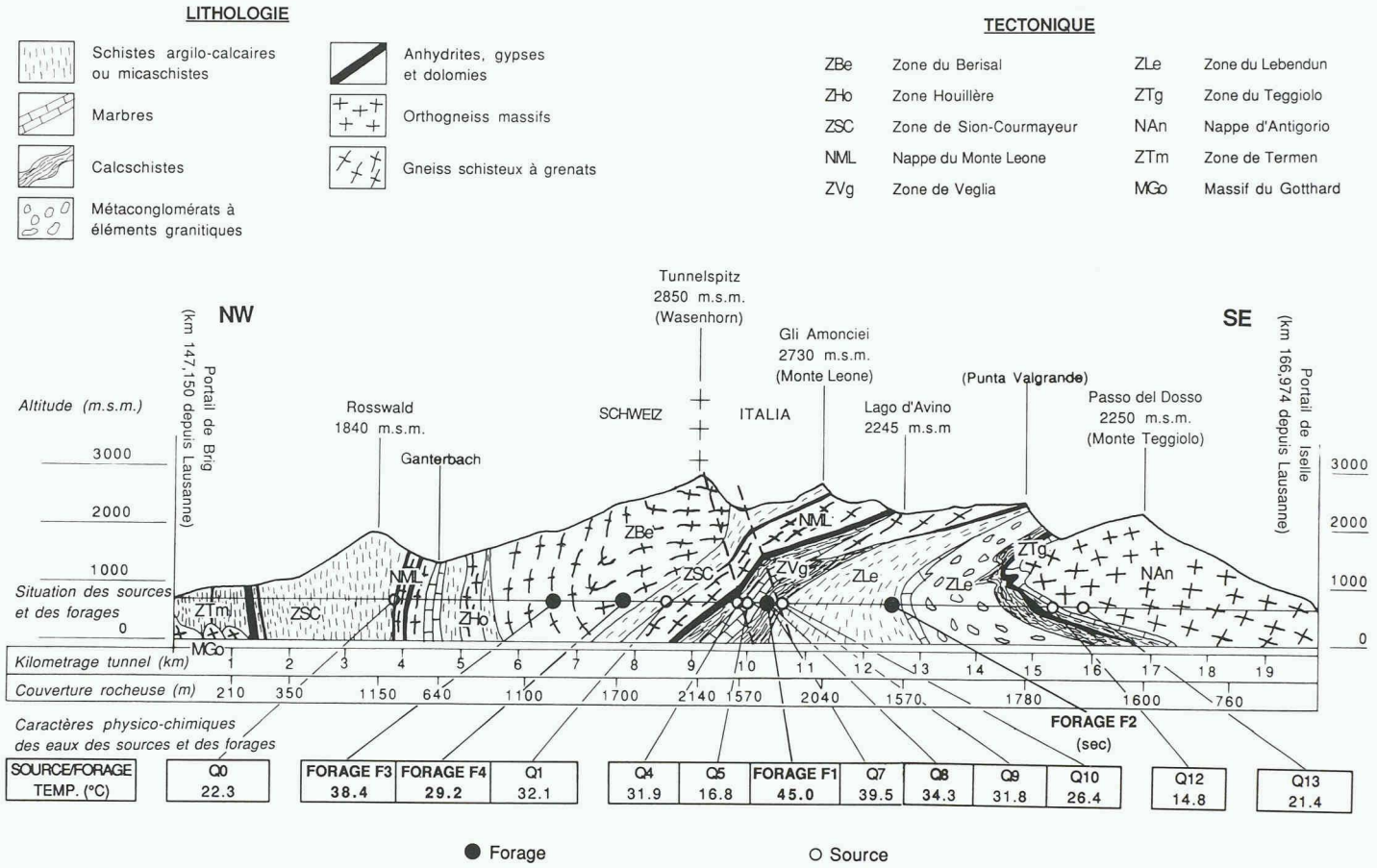

Fig. 2. – Profil géologique du tunnel du Simplon et position des quatre forages de moyenne profondeur réalisés en 1990 par le programme GÉOTHERMOVAL [1]

bée par le tunnel, le gradient géothermique local, ainsi que le flux de chaleur actuel responsable du refroidissement de la roche.

2. Cadre géologique et hydrogéologique

Entre Brigue et Iselle, le tunnel ferroviaire traverse le massif du Simplon sous une couverture rocheuse qui atteint au maximum 2150 m. Depuis Brigue plusieurs unités géologiques ont été rencontrées: tout d'abord la couverture sédimentaire mésozoïque du massif du Gotthard composée de schistes argilo-calcaires (appelés anciennement «schistes lustrés»), puis une succession de nappes penniques plissées et fissurées comportant des noyaux cristallins paléozoïques et des couvertures sédimentaires mésozoïques (micaschistes et roches carbonato-évaporitiques). Une zone de failles majeures a été recoupée dans le tronçon central (zone de Veglia, fig. 2).

Entre 1898 et 1905, 237 venues d'eau ont été rencontrées lors du percement des deux galeries. Leur température atteint un maximum de 55 °C et un débit parfois considérable a été mesuré (jusqu'à 70 000 l/min dans la zone autour du km 15,4 depuis le portail de Brigue). La majorité des venues d'eau sont observées sur deux tronçons qui

Abstract

Within the framework of the exploration program of the geothermal resources in Wallis *(GÉOTHERMOVAL)*, a systematic study of the Simplon tunnel has been carried out. Numerous thermal and subthermal springs were encountered during the perforation of the two galleries at the beginning of the century. Nowadays, a bypass canal drains all the waters toward the north, respectively the south gates, what represents a thermal potential of 0,7 MWt available in Brigue and 10 MWt in Iselle. Four vertical boreholes with a depth of 65 to 148 m were drilled, in order to intercept warmer water flows or dry zones allowing to measure the geothermal gradient. Two of them (F2 and F4) are not productive and were used to study the cooling of the rock in the tunnel since 1902.

The calculation of this cooling required the set up of an analytical solution for the heat diffusion equation valid for the geometry fixed by the tunnel. Since the perforation, the rock around the tunnel has been cooled by the acceleration of the groundwater flow and the draughts through both galleries, which are induced by the trains and the barometric differences between the north and south flanks of the Simplon massif. Rock temperature is the result of three contributions: the inital temperature, the effect of the geothermal gradient and the cooling effect. Very numerous measurements and observations by Schardt (1898-1907) allowed to obtain the initial temperature of the sites around boreholes F2 and F4.

Based on the initial rock temperature, the thermal characteristics of the rocks, the evolution of the tunnel temperature and the downhole temperature, the temperature profiles in boreholes F2 and F4 were recalculated and compared to the measurements. The simulation results for the zone around borehole F2 show that the heat flux in the tunnel reaches at present 110 W/m. The geothermal gradient below the tunnel corrected for the cooling effect equals 40 ± 5 °C/km. Similarly, for the zone around borehole F4, the heat flux reaches 150 W/m and the corrected geothermal gradient equals 28 ± 7 °C/km. These heat flux values have to be considered within a precision range of 20% and a value of 100 W/m may be extrapolated for the whole tunnel.

The thickness of the cooled rock under the tunnel was calculated as reaching 250 m today. At this depth, the present rock temperature should be equal to the initial temperature existing before the perforation of the Simplon tunnel.

ont recoupé des formations carbonato-évaporitiques entre les km 9,3 et 10,6, ainsi qu'entre les km 15,3 et 15,4. Par contre, les noyaux cristallins, les schistes argilo-calcaires et les micaschistes sont pratiquement secs. Depuis le percement du tunnel, les roches et les eaux se sont refroidies. Dans la partie centrale du tunnel, on constate aujourd'hui que la roche a perdu dans le premier mètre autour du tunnel de 15 à 30 °C au maximum, alors que l'eau a subi une chute de température de 10 à 35 °C [1].

Six unités hydrogéologiques ont été individualisées sur la base de la lithologie des formations géologiques et du caractère physico-chimique des eaux. Les deux forages qui ont été pris en considération pour cette modélisation du refroidissement de la roche sont situés dans deux unités hydrogéologiques différentes (fig. 2).

Le forage F2 (km 12,5) a été foré dans des micaschistes de l'unité hydrogéologique de Lebendun. Aucune source n'émerge dans ce tronçon compris entre les km 10,7 et 15,4 et le forage est également sec. Le forage F4 (km 7,8) quant à lui, passe dans des gneiss laminés de l'unité hydrogéologique de Berisal. Cette zone de faible perméabilité inclut quelques sources dont le débit est peu important, dans un tronçon compris entre les km 4,1 et 9,4. Le forage était non productif au moment des travaux et lors de l'année qui a suivi. Des suintements d'eau très minéralisée ont été observés par la suite en tête de puits [5,1].

3. Problème thermique

Avant les travaux de percement du Simplon (1898-1905), la roche avait une température initiale T_{in}, non perturbée (au niveau du tunnel). Si l'on imagine l'existence des forages à cette époque, la température au fond serait celle mesurée en tête de puits augmentée de l'effet du gradient géothermique G_z (fig. 3).

Depuis la création du tunnel, la roche a été constamment refroidie par l'accélération de la circulation des eaux souterraines, ainsi que par les courants d'air induits dans les deux galeries par le passage des trains et par les différences barométriques entre les versants sud et nord. La température actuelle de la roche est obtenue en enlevant l'effet de ce refroidissement (T_f) à la température qui régnait avant le tunnel. Il est clair que le refroidissement est maximum dans le tunnel, et diminue au fur et à mesure que l'on descend dans le forage. La figure 3 illustre les deux situations (avant la création du tunnel, en 1900, et après le percement des forages, en 1990), en indiquant, par anticipation, les valeurs obtenues pour le forage F2.

Le refroidissement de la roche est nul avant la création du tunnel. La température de la roche est donc la somme de trois contributions, et ce pour n'importe quel temps et n'importe quelle profondeur:

- la température initiale T_{in}
- l'effet du gradient géothermique $G_z \cdot z$ (z est la profondeur)
- l'effet du refroidissement $-T_f(r, t)$ (fonction du rayon r, mesuré depuis l'axe du tunnel, et du temps t).

Le long d'un forage, le rayon r et la profondeur z sont confondus. Posé sous cette forme, le problème revient à calculer $-T_f(r, t)$, qui est la solution du refroidissement d'un cylindre creux par son axe, partant d'une température initiale constante et nulle.

4. Outil de calcul

L'outil de calcul permet d'évaluer la solution analytique de l'équation de diffusion de la chaleur d'un cylindre creux. Cependant, tout calcul de température nécessite des conditions initiales et des conditions aux bords bien définies. Avec r_i pour le rayon intérieur et r_e pour le rayon extérieur, l'équation de diffusion de la chaleur à été résolue pour les conditions suivantes:

- une température initiale arbitraire: $T(r, t=0) = f(r) \qquad r_i \leq r \leq r_e$
  (f est une fonction qui associe une température $f(r)$ à chaque rayon r),
- un flux de chaleur $\phi(r_i, t) = \phi_0(t)$ *ou* une température $T(r_i, t) = T_0(t)$ pouvant évoluer dans le temps en $r_i \qquad t \geq 0$;
- un flux de chaleur nul en r_e: $\phi(r_e, t) = 0 \qquad t \geq 0$.

Variables d'entrée:

- les dimensions du cas analysé avec r_i et r_e (m);
- les caractéristiques thermiques du milieu avec
  - la conductivité thermique λ (W/m °C) et
  - la diffusivité k (m²/s);
- la température initiale $f(r)$ (°C);
- le flux $\phi_0(t)$ (W/m) *ou* la température $T_0(t)$ (°C).

Le programme calcule:

- l'évolution de la température $T_0(t)$ en r_i *ou* l'évolution du flux $\phi_0(t)$ en r_i;
- des profils de température le long du rayon à des temps t choisis.

Dans le cas du Simplon, le rayon extérieur doit être suffisamment grand pour rester en dehors de la zone refroidie, de manière à vérifier la deuxième condition au bord ($\phi(r_e, t) = 0$) à tout moment. En d'autres termes, le flux de chaleur induit par le refroidissement du tunnel est toujours nul à cette distance. D'autre part, en se référant au problème thermique, les calculs s'effectuent dans un cylindre creux (défini par r_i et r_e) dont la température initiale est constante et nulle ($f(r) = 0$ pour tout rayon r).

5. Hypothèses de calcul

Le problème thermique a été défini en décomposant la température de la roche en trois contributions distinctes. Les deux premières, une température initiale et un gradient géothermique constant, donnent l'image d'un champ de températures statiques, caractérisé par des plans isothermes horizontaux et régulièrement espacés (les déformations induites par la topographie ne sont pas prises en compte). Il en résulte un flux géothermique constant orienté de bas en haut. L'extraction d'une puissance thermique le long du tunnel donne lieu à un flux de chaleur radial, qui se superpose au flux géothermique initial. Sous le tunnel et à la verticale, ces deux flux de chaleur ont la même orientation, de bas en haut, et s'additionnent simplement. Nous pouvons appliquer ce modèle si les hypothèses suivantes sont vérifiées:

- le transport de chaleur dans la roche ne s'effectue que par conduction;

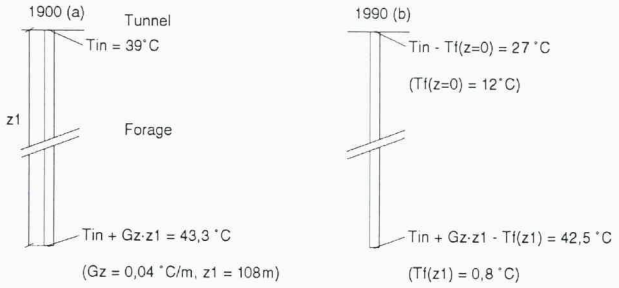

Fig. 3. – Températures de la roche en 1900 (a) et en 1990 (b) relatives au forage F2

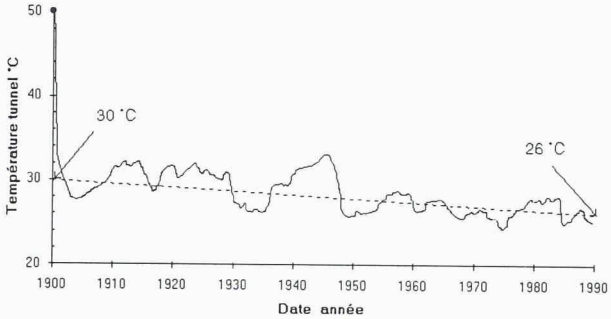

Fig. 4. – Evolution fictive de la température du rocher dans le tunnel et approximation linéaire possible

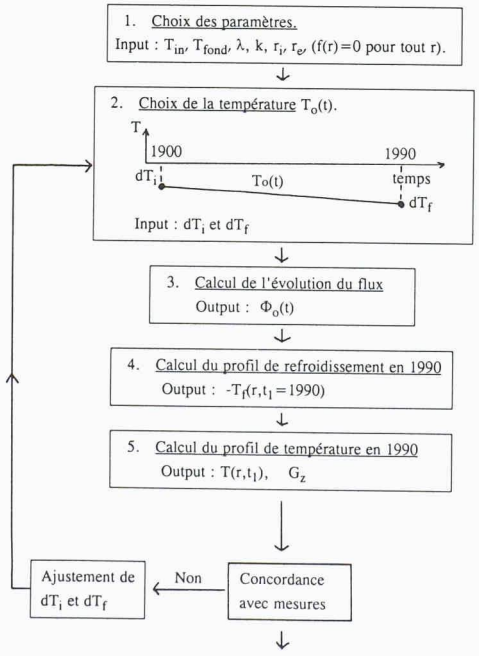

Fig. 5. – Organigramme pour recalculer le profil de température dans un forage ($T(r, t_1)$) et le gradient géothermique (G_z)

- les transferts de chaleur qui ont lieu parallèlement au tunnel sont négligeables relativement aux transferts radiaux (le problème est ramené à deux dimensions);
- la température initiale de la roche augmente linéairement avec la profondeur, caractérisée par un gradient géothermique constant (pas de correction topographique);
- nous supposons la roche suffisamment homogène pour lui attribuer une conductivité thermique λ et une diffusivité k constantes. Par ailleurs, une éventuelle dépendance entre ces paramètres et la température n'est pas prise en compte.

Depuis le percement du tunnel, le flux de chaleur responsable du refroidissement est évacué par l'eau qui en ressort et l'air qui y circule (trains, météo, ventilation...). Ce flux est plus important dans les régions chaudes que dans les régions froides. D'autre part, il a probablement évolué dans le temps. Cependant, l'intégration de ce flux jusqu'en 1990 fournit l'énergie totale extraite par mètre de tunnel et détermine l'amplitude du refroidissement. Finalement, le gradient de température actuel au voisinage du tunnel est déterminé par les dernières valeurs de ce flux. Ces valeurs ne sont pas forcément égales à la moyenne sur la période de refroidissement. Il est donc préférable d'inverser la relation température-flux et de fixer la température plutôt que le flux. Les températures de la roche du début du siècle montrent qu'elles ont rapidement chuté à des valeurs voisines de celles observées actuellement. Dans la zone du forage F4, par exemple, la température initiale de la roche est évaluée à 54 °C. Les relevés de température du rocher durant les deux années qui ont suivi le percement des galeries montrent des températures comprises entre 28 et 35 °C au fond de trous horizontaux de 1,5 m de longueur [11]. Actuellement, les mesures de température du rocher près du tunnel se situent autour de 26 °C, avec une pointe mesurée à 33,8 °C [1].

Ces observations permettent de formuler la dernière hypothèse: la température du rocher dans le tunnel suit une évolution linéaire dans le temps, mais présente un saut en 1900 par rapport à la température initiale. La linéarité est nécessaire pour satisfaire simultanément l'amplitude du refroidissement et le gradient de température actuel au voisinage du tunnel. La figure 4 montre une évolution fictive de la température du tunnel, avec une chute très rapide au départ. Pour les besoins de l'illustration, nous fixons une température initiale de 50 °C. Conformément à la dernière hypothèse, une approximation de la température fictive est obtenue en fixant un refroidissement rapide de 20 °C en 1900, qui augmente linéairement pour atteindre 24 °C en 1990. Cette évolution linéaire de la température est à considérer comme une température effective qui aboutit en 1990 au même refroidissement que celui qui est observé.

6. Méthodologie

Sur la base de la température initiale du rocher (T_{in}), de ses caractéristiques thermiques (λ et k), de l'évolution de la température dans le tunnel et de la température mesurée au fond du forage T_{fond}, le profil de température mesuré dans le F2 et le F4 est recalculé, avec un pas de temps annuel. La procédure est décrite par l'organigramme de la figure 5.

L'objectif consiste à recalculer le profil de température $T(r, t_1)$ des forages en 1990 jusqu'à ce que la concordance avec les mesures soit satisfaisante. Rappelons que la température calculée $T(r, t_1)$ est la somme de trois contributions:

$$T(r, t_1) = T_{in} + G_z \cdot r - T_f(r, t_1) \quad (1)$$

avec

r = profondeur dans le forage (m),

t_1 = temps de calcul des températures (t_1 = 1990, 90 ans après le début du refroidissement des roches),

T_{in} = température initiale du rocher dans le tunnel (°C),

G_z = gradient géothermique (°C/m),

$T_f(r, t_1)$ = amplitude du refroidissement à la profondeur r après 90 ans, calculée avec l'outil de calcul.

La température recalculée du forage, $T_f(r, t_1)$, est accessible si le gradient géothermique G_z est connu. Celui-ci est calculé en faisant concorder la température mesurée au fond du forage avec la température recalculée:

$$T(R_1, t_1) = T_{fond} \quad (2)$$

avec

R_1 = profondeur totale du forage (m),

T_{fond} = température mesurée au fond du forage (à la profondeur R_1) en 1990 (°C).

Les relations (1) et (2) permettent de calculer le gradient géothermique G_z:

$$G_z = (T_{fond} + T_f(R_1, t_1) - T_{in})/R_1 \quad (3)$$

Remarquons que $T_{fond} + T_f\ (R_1,\ t_1)$ est la température mesurée au fond du forage, corrigée de l'effet du refroidissement. Elle correspond à la température qui régnait à cet endroit avant la création du tunnel, tout comme T_{in} est la température qui régnait à cette époque au niveau du tunnel.

Pour illustrer la démarche suivie, nous effectuons, l'une après l'autre, les étapes successives de l'organigramme de la figure 5. La première comprend le choix des paramètres. Le tableau 1 énumère des paramètres fictifs adoptés pour l'illustration.

Nous nous référons à la figure 4 pour le choix d'une température $T_0\ (t)$. Rappelons que celle-ci fixe l'évolution de température à l'intérieur du cylindre creux, dont la température initiale est nulle. Autrement dit, une température de – 20 °C signifie un refroidissement de 20 °C relativement à la température initiale. La figure 4 montre un refroidissement de 20 °C en 1900, qui augmente à 24 °C en 1990. Ainsi, dT_i = – 20 °C et dT_f = – 24 °C, ce qui détermine entièrement la fonction $T_0\ (t)$. Toutes les valeurs d'entrée de l'outil de calcul sont ainsi connues. Ce dernier calcule les valeurs du flux de chaleur extrait du cylindre creux, année après année (troisième étape). Après 90 ans de refroidissement, il calcule un profil de «refroidissement» le long d'un forage (fig. 6).

L'amplitude du refroidissement de la roche à 150 m vaut T_f(150 m, 1990) = 0,8 °C. Il nous permet d'évaluer le gradient géothermique avec la relation (3): G_z = 0,032 °C/m. Ensuite, le profil de température dans le forage est construit en additionnant la température initiale (fig. 7a) et l'effet du gradient géothermique (fig. 7b) au refroidissement calculé.

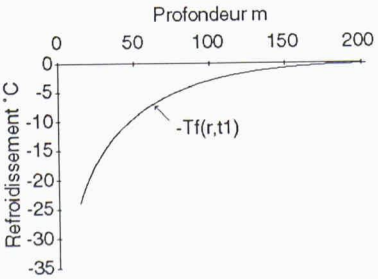

Fig. 6. – Refroidissement fictif de la roche le long d'un forage en 1990

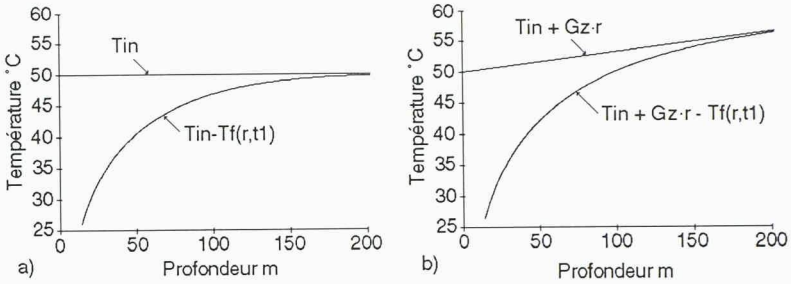

Fig. 7. – a) Refroidissement de la roche additionné de la température initiale
b) Température dans le forage: somme des trois contributions

La droite de la figure 7b est simplement $T_{in} + G_z \cdot z$, c'est-à-dire la température du forage corrigée de l'effet du refroidissement; autrement dit, c'est la température qui régnait avant la création du tunnel, conformément aux hypothèses faites. Les mesures et les calculs coïncident sur le fond du forage. Les écarts sur le haut se corrigent avec dT_f et l'ajustement du gradient avec dT_i.

7. Choix des paramètres

Le tunnel du Simplon est constitué de deux galeries espacées de 18 m. La figure 8 schématise les galeries ainsi que le positionnement approximatif d'un forage. La profondeur du forage *(z)* est mesurée à partir du bas du tunnel, tandis que pour les calculs, la profondeur se mesure depuis l'axe de symétrie des deux galeries *(r)*. En d'autres termes, si une température *T* est mesurée à la profondeur *z* dans le forage, elle se trouve à la distance *r* de l'axe de symétrie des deux galeries, soit approximativement à la distance *z* + 2 mètres.

D'autre part, il faut choisir un rayon intérieur pour le cylindre creux. Ce dernier ne doit pas être trop petit, car pour de petits rayons, typiquement 10 m, l'espacement des deux galeries fait que localement, la symétrie cylindrique n'est plus du tout vérifiée (les lignes de flux ne sont plus radiales). Pratiquement, le rayon intérieur est arbitrairement fixé à 14 m pour les calculs avec le F2 et à 20 m pour le F4. La taille du rayon intérieur n'a pas d'influence sur les résultats des simulations. En revanche, pour un flux de refroidissement donné, le refroidissement est d'autant plus faible que l'on s'éloigne de l'axe du cylindre. En conséquence, plus le rayon intérieur est choisi grand, plus la chute de température responsable du refroidissement devient petite. Cette dernière ne peut donc être directement comparée à la température des roches dans le tunnel. Quant au rayon externe, il est fixé à 300 m pour rester en dehors de la zone refroidie.

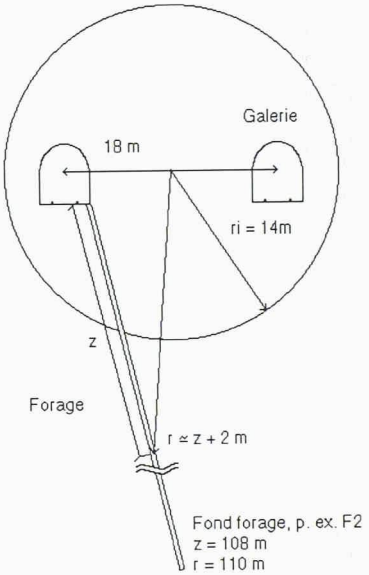

Fig. 8. – Coupe transversale du tunnel avec positionnement du forage

Le tableau 2 donne les paramètres d'entrée pour chacun des deux forages.

Les valeurs de conductivité et de diffusivité thermique ont été mesurées sur des échantillons prélevés dans le tunnel [3]. Ce sont les valeurs des schistes lustrés (schistes argilo-calcaires) qui sont adoptées pour le micaschiste. Le gneiss et les schistes lustrés sont des roches thermiquement anisotropiques. Cela signifie que les propriétés thermiques de la roche sont différentes suivant la direction du gradient de température; d'autre part le flux de chaleur n'est plus parallèle à ce dernier. Mais pour les roches en question, l'angle maximum ne dépasse pas 10°. Le flux de chaleur peut être considéré comme parallèle au gradient de température, avec une composante négligeable dans le plan perpendiculaire. Les propriétés thermiques de la roche sont prises suivant la verticale. Le tenseur des conductivités est remplacé par sa composante verticale, en tenant compte de l'inclinaison moyenne de 45° des couches géologiques et des valeurs anisotropiques de conductivité thermique mesurées [3].

Tableau 1. – Paramètres fictifs pour illustrer la procédure suivie

Propriétés des roches	
conductivité thermique λ	3 W/m K
diffusivité thermique k	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$ m²/s
Dimensions retenues du cylindre creux	
rayon interne r_i	14 m
rayon externe r_e	300 m
Températures	
T_{in}	50 °C dans le tunnel (1900)
T_{fond}	54 °C à 150 m sous le tunnel (1990)

Tableau 2. – Paramètres d'entrée relatifs à chaque forage

Paramètres	*Forage F2*	*Forage F4*
roche	micaschiste	gneiss
λ (W/m °C)	2,8 ± 0,4	3,0 ± 0,5
k (10^{-6} m²/s)	1,2 ± 0,2	1,3 ± 0,2
T_{in} (°C)	39 ± 0,5	54 ± 1
T_{fond} (°C)	42,5 ± 0,2 à 108 m	57,2 ± 0,2 à 148 m

Tableau 4. – Refroidissement de la roche calculé dans le forage F2 en 1991

Profondeur	*Refroidissement*	*Gradient de refroidissement*
110 m	– 0,8 °C	$25 \cdot 10^{-3}$ °C/m
150 m	– 0,3 °C	$8 \cdot 10^{-3}$ °C/m
200 m	– 0,1 °C	$2 \cdot 10^{-3}$ °C/m
250 m	≈ 0 °C	$\approx 0 \cdot 10^{-3}$ °C/m

Tableau 5. – Détail des sources d'incertitude sur le gradient géothermique du forage F2

Paramètres	*Erreur absolue sur G_z*
Température initiale roche (±0,5 °C)	±4,5 °C/km
Température fond forage (±0,2 °C)	±1,8 °C/km
Propriétés roche	±1,6 °C/km
Différents choix de refroidissement	±1,0 °C/km
Total	± 5 °C/km

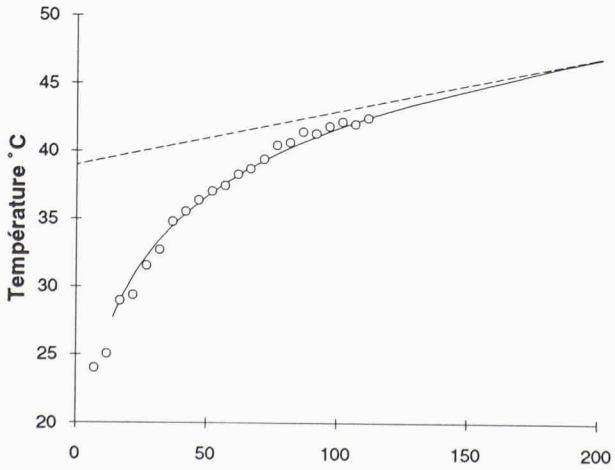

Fig. 10. – Profils de température dans le forage F2 (o o o mesures; — calculs pour 1991; - - - température avant tunnel)

Tableau 3. – Températures de la roche mesurées et calculées au voisinage du tunnel (°C)

Zone du forage F2: température initiale du rocher de 39 °C			
Année	*1902*	*1991*	*2050*
Température mesurée dans le tunnel	28-30	27,2[2]	–
Température mesurée à 12 m	–	25,1	–
Température mesurée à 17 m	–	29	–
Température pour les calculs à 14 m	31[1]	27[1]	25,7[3]

[1] valeur d'entrée pour les simulations
[2] moyenne des valeurs mesurées en 1987-88 dans des trous de 0,15 m
[3] valeur calculée par les simulations

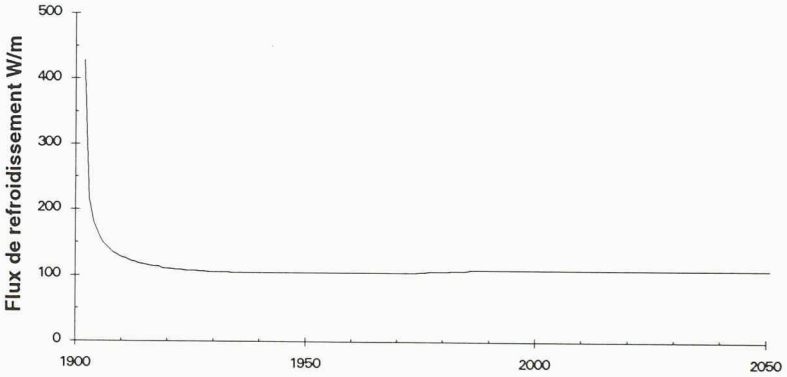

Fig. 9. – Evolution du flux de refroidissement au niveau du forage F2

La température initiale du rocher n'était pas facile à mesurer en raison de son refroidissement rapide [11]. Dans la région du F4, la roche accuse une baisse de 20 °C en quelques mois. Néanmoins, les valeurs de température initiale utilisées dans ce rapport ont été mesurées par Schardt et correspondent aux valeurs maximales mesurées à l'endroit des forages. Les mesures de température de la roche effectuées au début du siècle ont été réalisées dans des trous horizontaux de 1,5 m de longueur.

8. Simulations

8.1 Zone du forage F2

Le refroidissement de la roche utilisé pour les calculs est fixé à 8 °C en 1902 et augmente à 12 °C en 1991. Les calculs sont poursuivis jusqu'en 2050, en supposant que le flux de chaleur se stabilise en 1991. A partir de 1992, la valeur du flux est fixée à la valeur calculée en 1991, et la température intérieure du cylindre creux est calculée.

Le tableau 3 récapitule ces différentes températures ainsi que les températures mesurées dans le tunnel.

La figure 9 montre l'évolution du flux de chaleur correspondant au refroidissement adopté pour les simulations. Les valeurs actuelles du flux sont d'environ 110 W par mètre de tunnel. Le tableau 4 donne le refroidissement de la roche calculé en 1991 pour différentes profondeurs et le gradient de température correspondant. Ce dernier s'ajoute au gradient géothermique.

La figure 10 montre le profil de température mesuré et calculé pour 1991 ainsi que la température initiale correspondante.

Le gradient géothermique issu des calculs vaut 40 ± 5 °C/km dans la zone du forage F2. Il est calculé avec la relation (3) et correspond à la pente de la droite de la figure 10. Cette valeur, supposée constante durant la période de calcul, évolue peut-être sur une échelle de temps plus grande. La valeur calculée est donc valable pour le XXe siècle. Les paramètres nécessaires à la détermination du gradient géothermique induisent chacun des incertitudes. Le tableau 5 détaille l'importance de ces différentes sources d'erreurs.

Tableau 6. – Températures de la roche mesurées et calculées au voisinage du tunnel (°C)

Zone du forage F4: température initiale du rocher de 54 °C			
Année	1902	1991	2050
Température mesurée dans le tunnel	28-35	26,2[2]	–
Température mesurée à 17 m	–	37,2	–
Température mesurée à 22 m	–	39,2	–
Température pour les calculs à 20 m	34[1]	38[1]	37,2[3]

[1] valeur d'entrée pour les simulations
[2] moyenne des valeurs mesurées en 1987-88 dans des trous de 0,15 m
[3] valeur calculée par les simulations

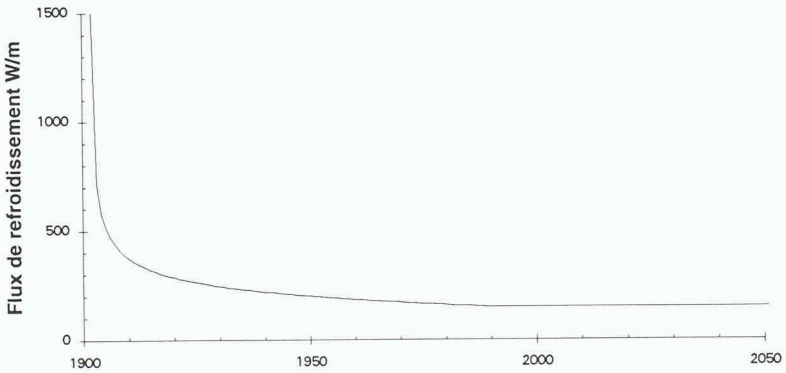

Fig. 11. – Evolution du flux de refroidissement au niveau du forage F4

8.2 Zone du forage F4

Le refroidissement de la roche utilisé pour les calculs est plus important en 1902 qu'en 1991: de 20 °C il diminue à 16 °C. Un refroidissement constant de 16 °C est possible, sans affecter la valeur du gradient géothermique, mais le profil de température calculé pour 1991 n'épouse plus aussi bien les mesures. La diminution du refroidissement est malaisée à interpréter. Son amplitude importante au début du siècle traduit un flux de refroidissement très intense. Mais il est difficile de conclure à un réchauffement de la roche près du tunnel, simplement par le fait que localement, la symétrie cylindrique n'est plus vérifiée, et la réalité peut différer du modèle.

Le tableau 6 récapitule les différentes températures adoptées pour les simulations du forage F4 ainsi que les températures mesurées dans le tunnel. L'évolution du flux correspondant au refroidissement donne le graphique de la figure 11. Le flux, très intense au départ, décroît jusqu'à une valeur de 150 W par mètre de tunnel en 1991. Les valeurs de refroidissement en 1991 sont données dans le tableau 7. Les mesures et calculs des températures du forage F4 sont présentés à la figure 12.

Le gradient géothermique calculé vaut 28 ± 7 °C/km dans la zone du forage F4. Comme précédemment, il est calculé avec la relation (3). Il correspond à la pente de la droite de la figure 12. Les incertitudes sur le gradient géothermique, causées par celles des paramètres, sont reportées dans le tableau 8.

9. Discussion

Le gradient géothermique est très sensible à la valeur de température initiale adoptée. Les calculs ne permettent pas de dire si les valeurs retenues sont les bonnes. Il semble néanmoins peu probable que la température initiale du F2 soit inférieure à 39 °C, de même que celle du F4 soit supérieure à 54 °C. En effet, le refroidissement qui a permis de recalculer le profil de température dans le F2 figure parmi les plus faibles de tous ceux qui ont été essayés. Avec le F4, une température initiale plus haute signifierait un refroidissement encore plus intense, alors que celui qui a été retenu semble déjà être le maximum possible. Selon le calcul d'erreur, 1 °C de moins à la température initiale des roches dans la zone du F4 augmente le gradient géothermique de 6,6 °C/km. Pour la zone du F2, 0,5 °C de plus le diminue de 4,5 °C/km.

A titre de comparaison, il est possible d'évaluer le gradient géothermique moyen entre la surface et le tunnel, à l'aplomb des zones des forages. Les températures moyennes de la roche de surface ont été mesurées dans des trous de un mètre de profondeur formant un réseau dans le massif du Simplon [8]. A l'aplomb d'un forage, la température de la roche en surface est obtenue par interpolation. Avec la température initiale des roches dans le tunnel et l'épaisseur de la couverture rocheuse, le gradient géothermique moyen qui existait avant le tunnel est évalué dans le tableau 9.

Le tableau 10 rassemble les différentes valeurs du gradient géothermique ainsi que celle obtenue par Clark & Niblett [3].

A l'aplomb du forage F2, la faible valeur du gradient géothermique entre la surface et le tunnel s'explique par une morphologie déprimée située directement au nord-est du tracé du tunnel (Alpe Veglia), qui a été modelée par l'érosion glaciaire et le réseau hydrologique de surface [1]. Cette cuvette favorise la déperdition de chaleur du massif rocheux par conduction («effet topographique» [2]). Le gradient géothermique calculé sous le tunnel montre une valeur élevée, largement supérieure à celle de la zone du F4. Est-ce qu'un refroidissement de longue date, provoqué par la dépression glaciaire, occasionne un gradient de température qui s'additionne au gradient géothermique? La question reste ouverte. Toutefois, la température initiale de la roche apparaît déjà comme une température refroidie. Avec une couverture rocheuse d'épaisseur comparable, elle est inférieure de 15 °C à la roche de la zone du F4.

Dans le cas du forage F4, la zone du Berisal est relativement imperméable et la topographie est plus uniforme

Tableau 7. – Refroidissement de la roche calculé dans le forage F4 en 1991

Profondeur	*Refroidissement*	*Gradient de refroidissement*
110 m	– 2,5 °C	$57 \cdot 10^{-3}$ °C/m
150 m	– 1,0 °C	$23 \cdot 10^{-3}$ °C/m
200 m	– 0,2 °C	$7 \cdot 10^{-3}$ °C/m
250 m	≈ 0 °C	$\approx 0 \cdot 10^{-3}$ °C/m

Tableau 8. – Détail des sources d'incertitude sur le gradient géothermique du forage F4

Paramètres	*Erreur absolue sur G_z*
Température initiale roche (±1 °C)	±6,6 °C/km
Température fond forage (±0,2 °C)	±1,4 °C/km
Propriétés roche	±1,5 °C/km
Différents choix de refroidissement	±1,0 °C/km
Total	± 7 °C/km

Tableau 9. – Gradient géothermique moyen à l'aplomb des forages entre la surface et le tunnel

	Zone du forage F2	*Zone du forage F4*
Température moyenne de la roche (surface)	0 ± 1 °C	0 ± 1 °C
Température initiale de la roche (tunnel)	39 ± 0,5 °C	54 ± 1 °C
Altitude surface	2250 ± 50 m	2500 ± 100 m
Altitude tunnel	700 ± 10 m	680 ± 10 m
Epaisseur de la couverture rocheuse	1550 ± 50 m	1820 ± 50 m
Gradient géothermique moyen	**25 ± 3 °C/km**	**30 ± 4 °C/km**

Tableau 10 – Comparaison des différentes valeurs du gradient géothermique dans le Simplon

Gradient géothermique °C/km	*Zone du forage F2*	*Zone du forage F4*
Entre la surface et le tunnel (valeur moyenne avant tunnel)	25 ± 3	30 ± 4
Sous le tunnel (calculé dans les forages)	40 ± 5	28 ± 7
Massif du Simplon [3]	36 ± 1	

que dans la zone de l'Alpe Veglia. Ce résultat est confirmé par les deux valeurs voisines obtenues dans la zone du F4. Le gradient géothermique semble constant de la surface jusqu'au fond du forage. Néanmoins, le gradient géothermique calculé sous le tunnel ne peut pas être plus faible que la valeur moyenne à l'aplomb, et un gradient géothermique de 30 °C/km semble plus raisonnable. Cependant, il reste inférieur aux 36 °C/km (corrigés des effets topographiques) obtenus par Clark & Niblett [3], mais compte tenu des incertitudes et des effets qui ne sont pas pris en compte, les deux résultats ne sont pas incompatibles.

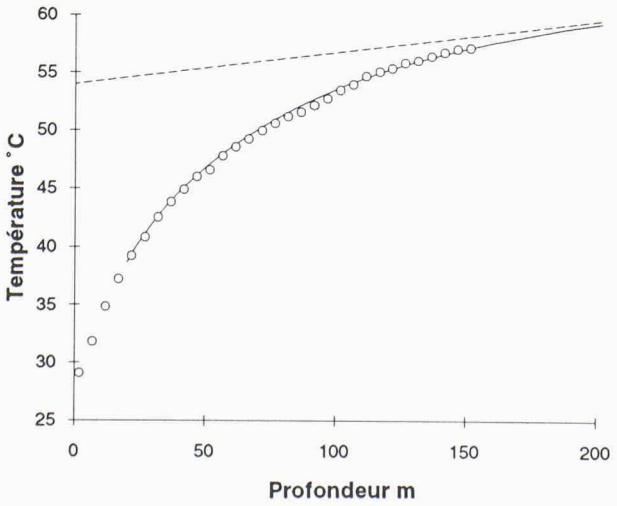

Fig. 12. – Profils de température dans le forage F4 (o o o mesures; — calculs pour 1991; - - - température avant tunnel)

Les valeurs actuelles du flux de refroidissement sont à considérer avec une marge d'erreur de 20%, et une valeur de 100 W par mètre de tunnel peut être extrapolée à l'ensemble du tunnel, ce qui conduit à une puissance de 2 MWt à évacuer. Par exemple, de l'air qui circule à 1 m/s (équivalent à une ventilation de 50 m^3/s), entrant à 5 °C, chargé à 60% d'humidité relative et qui ressort saturé à 15 °C emporte 1,6 MWt. Il faut noter que les deux tiers de cette puissance (1 MWt) sont nécessaires à l'humidification de l'air. Par ailleurs, un réchauffement de 0,5 °C de l'eau souterraine drainée par l'ensemble du tunnel (≈1000 l/s) évacue également 2,1 MWt.

10. Conclusions

La démarche suivie permet de recalculer de manière satisfaisante les profils de température mesurés dans les forages «secs» F2 et F4 du tunnel du Simplon. Le flux de chaleur responsable du refroidissement est caractérisé par une très grande intensité au début du siècle (près de 10 fois la valeur actuelle dans la région chaude du F4) et décroît rapidement vers une valeur actuelle de l'ordre de 100 W par mètre de tunnel.

Dans la région du forage F4, l'énergie évacuée est presque deux fois plus grande que dans celle du F2. Ainsi, à 200 m de profondeur, la température de la roche a diminué de 0,2 °C au lieu de 0,1 °C pour le forage F2. Malgré la plus grande profondeur de F4, le refroidissement au fond est plus important que celui du F2 (1,0 °C à 148 m pour F4, contre 0,8 °C à 108 m pour F2).

Dans les forages, l'importance du refroidissement empêche d'évaluer directement le gradient géothermique avec la pente des mesures. Au fond des deux forages, un gradient de 23-25 °C/km vient s'ajouter au gradient géothermique initial. Ce dernier, dérivé des simulations, atteint 40 ± 5 °C/km dans le F2, et 28 ± 7 °C/km dans le F4. Compte tenu des incertitudes et des effets topographiques, ces valeurs peuvent être comparées à celle de 36 °C/km obtenue par Clark & Niblett [3].

Les simulations montrent que pour s'affranchir de l'effet du refroidissement, le gradient géothermique doit être évalué à des profondeurs supérieures à 250 m (de la galerie du Simplon). A 200 m, dans la région chaude du forage F4, un flux de 7 °C/km s'additionne encore au gradient géothermique.

Finalement, les résultats de cette modélisation du refroidissement de la roche dans le tunnel confirment l'intérêt du massif du Simplon pour son potentiel géothermique, et mettent en évidence l'hétérogénéité thermique de deux forages réalisés dans la partie centrale du tunnel à 4,7 km l'un de l'autre. Afin d'évaluer l'ensemble du potentiel géothermique du massif du

Simplon, on ne peut que recommander la réalisation d'un programme de forages de 250 m de profondeur au minimum dans les différentes unités géologiques traversées par le tunnel.

Remerciements
Les auteurs remercient l'Office fédéral de l'énergie à Berne de son appui direct à la réalisation de cette publication et de sa participation globale au programme *Géothermoval*. M. B. Mathey, Bmic S.A., Montézillon, est également remercié d'avoir proposé ce travail de modélisation et d'avoir apporté son soutien à *Géothermoval*. Des remerciements vont encore à MM. F. Zuber, du bureau O. Schmid à Brigue, et E. Kämpfen, de la Lonza, à Viège, pour la mise à disposition de données sur le tunnel, ainsi que pour les fructueuses discussions que nous avons eues. Enfin, nous exprimons notre reconnaissance au professeur L. Rybach, de l'EPFZ, pour ses remarques constructives sur le manuscrit.

Références
[1] Bianchetti G., Zuber F., Vuataz F.-D. & Rouiller J.-D.: «Hydrogeologische und geothermische Untersuchungen im Simplontunnel (Wallis, Schweiz und Ossola, Italien)», *Matér. Géol. Suisse*, Sér. Géotechnique, à paraître
[2] Birch F.: «Flow heat in the Front Range, Colorado», *Bull. Geol. Soc. of America*, 61, 567-630, 1956
[3] Clark S.P. Jr & Niblett E.R.: «Terrestrial Heat Flow in the Swiss Alps», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Geophysical Supplement* v. 7, N° 4, 176-195, 1956
[4] Crsfa: «Programme *Géothermoval*. Recherche et mise en valeur des ressources géothermiques du Valais. Phase I, rapport final. Synthèse», Rapport CRSFA/92.02, non publié, 1992 a
[5] Crsfa: «Programme *Géothermoval*. Erforschung und Auswertung der geothermischen Ressourcen im Kanton Wallis. Phase I, Schlussbericht, Heft Nr. 6, Simplon (Brig-Naters)», Rapport CRSFA/92.08, non publié, 1992 b
[6] Hayoz P. & Zuber F.: «Das Simplon Massiv. Hydrogeologische Untersuchungen der unterirdischen thermalen Wasserzirkulationen und ihrer Zusammenhänge mit dem Eisenbahntunnel», dipl. spécial. hydrogéologie, Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel – Centre de recherches scientifiques fondamentales et appliquées de Sion, non publié, 1990
[7] Kämpfen E.: «Nutzung des geothermischen Energiepotentials im Simplontunnel», Diplomarbeit in Energie, Epfl-Crsfa, non publié, 1992
[8] Niethammer G.: «Die Wärmeverteilung im Simplon», *Eclogae geol. Helv.* 11, 96-120, 1910
[9] Pahud D.: «Stockage souterrain de chaleur: calculs de diffusion, mesures et comparaisons», travail de diplôme, GAP, Univ. de Genève, non publié, 1989
[10] Pressel K.: «Experimentelle Methode der Vorausbestimmung der Gesteintemperatur im Innern eines Gesteinsmassivs», Oldenburg Verlag, München/Berlin, 1928
[11] Schardt H.: «Rapports trimestriels au Conseil fédéral suisse sur l'état des travaux du percement du Simplon», Corbaz et Cie, Lausanne, N° 17, 19, 20, 21, 1998-1906

Vous avez dit «biologie... des constructions»?!

M. Claude Grosgurin, architecte et auteur de «Servons-nous du mot juste – Les pièges tendus au traducteur par l'allemand des bâtisseurs»[1], nous envoie le texte ci-dessous, qui est une sorte d'appel à l'aide adressé à nos lecteurs.

«Dans les textes en langue allemande traitant de construction, on voit apparaître un mot tout nouveau: «die Baubiologie», branche à laquelle se consacrent «die Baubiologen». Il faut voir là une manifestation de ce goût qu'ont nos Alémaniques pour les néologismes construits à partir d'un terme relevant d'un domaine tout à fait éloigné de ce dont ils veulent parler. Pour nous, la biologie est la science qui étudie la vie. Il y a une biologie végétale, une biologie moléculaire... Mais une biologie des constructions? Non! Et un biologiste des bâtiments? Pas davantage! D'ailleurs, de quoi s'agit-il?

En lisant les textes en question, on s'aperçoit que cette branche étudie les répercussions que le choix des matériaux peut avoir sur les conditions de vie des personnes qui séjournent dans leur proximité, et celles qu'il peut avoir aussi sur le milieu naturel en général. Une couche de peinture qui dégage une mauvaise odeur, un isolant thermique qui se décompose, un mur dans lequel l'humidité monte par capillarité, voilà des ouvrages défectueux que dénoncent – avec raison! – nos spécialistes. Il en est de même des matériaux dont la fabrication provoquerait la pollution de l'environnement. Parlons alors de l'action du milieu construit (ou de l'influence que les constructions exercent) sur le milieu naturel (ou sur les conditions de la vie). Mais tout cela est un peu long. Les lecteurs de *IAS* peuvent-ils proposer une traduction logique et brève du mot «Baubiologie»? D'avance, les traducteurs – du moins ceux qui n'écrivent pas en français fédéral – leur disent merci!»

[1]Un volume de 104 pages avec de nombreuses illustrations, format A5 (14,5 × 21 cm), reliure à anneaux, couverture laminée. Commandes auprès de la SEATU – Ingénieurs et architectes suisses, cp 180, 1024 Ecublens. Prix: Fr. 20.– (plus frais d'envoi)