Zeitschrift: Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles

Band: 97 (1974)

Artikel: Gradient géothermique et hydraulique souterraine dans un aquifère karstique

Autor: Mathey, Bernard

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-89062

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: 10.12.2025

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

INSTITUT DE GÉOLOGIE, UNIVERSITÉ DE NEUCHATEL

CENTRE D'HYDROGÉOLOGIE

GRADIENT GÉOTHERMIQUE ET HYDRAULIQUE SOUTERRAINE DANS UN AQUIFÈRE KARSTIQUE
(Bassin de la source de l'Areuse / NE)

par

BERNARD MATHEY [1]

AVEC 5 FIGURES ET 5 TABLEAUX

1. Introduction

La connaissance du champ des températures au sein d'un aquifère est importante pour la recherche du cheminement des eaux souterraines. Les fluctuations saisonnières de la température des eaux, en particulier aux exutoires, sont fonctions d'un certain nombre de variables parmi lesquelles on trouve la perméabilité, le volume du réservoir souterrain, la profondeur de circulation, le temps de transit.

Si le flux géothermique est bien connu en l'absence de circulation d'eau souterraine, les effets de cette dernière sur le gradient géothermique n'ont pas encore été étudiés de façon systématique.

Un dispositif d'observation de l'eau souterraine des bassins des sources karstiques de l'Areuse et de la Noiraigue (Neuchâtel/Suisse) a été mis en place grâce à dix forages profonds (75 à 450 m). Ces derniers ont fait l'objet de logs thermométriques mensuels, destinés à mettre en évidence des anomalies du gradient géothermique provoquées par des différences de vitesse de circulation de l'eau en profondeur.

On tente d'estimer ici l'importance des transferts de chaleur en comparant le gradient thermique mesuré dans les forages et la température de l'eau à l'exutoire.

2. Travaux antérieurs

Depuis les travaux de R. W. Stallman (1963), J. D. Bredehoeft et I. S. Papadopulos (1965), et K. Cartwright (1970), on utilise les

[1] Centre d'hydrogéologie, Université, CH - 2000 Neuchâtel 7.

profils thermiques dans les forages en terrain non consolidés (moraines, alluvions, etc.) pour déterminer l'apport d'eau depuis le substratum rocheux. L.M. Sorey (1971), à partir de relevés thermométriques dans des forages profonds, analyse les anomalies thermiques qui, à partir de l'équation de Stallman, lui permettent de calculer la vitesse de l'eau percolant par drainance entre deux aquifères séparés par un semi-perméable.

R. Haenel (1971) mesure le flux géothermique dans les dépôts récents au fond d'un certain nombre de lacs d'Allemagne occidentale.

Des travaux du même type pour la Suisse sont actuellement effectués par l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich (Von Herzen 1974).

Dans une note sur l'hétérogénéité de la perméabilité des calcaires (Bertrand, Mathey et Mornod 1973), les auteurs relèvent une importante différence de température (7,6 à 13° C) entre deux forages situés à 350 mètres de distance, en relation avec des différences de perméabilité.

3. Situation

La source de l'Areuse est une des résurgences karstiques importantes du Jura helvétique plissé. Son bassin alimentaire est constitué par deux synclinaux tertiaires, les synclinaux de la Brévine et des Verrières.

Les calcaires du Malm (350 m d'épaisseur) forment un aquifère dont le mur est constitué par des marno-calcaires du jurassique moyen (Argovien).

La superficie du bassin est de 129 km², l'altitude moyenne de 1115 m, l'altitude de la source de 793 m et son débit annuel moyen (1959-1969) de 4,68 m^3s^{-1}. L'hydrogéologie de ce bassin est bien connue à la suite des travaux de A. Burger (1959) et J.-P. Tripet (1972).

4. Mesure des températures

Cinq forages de reconnaissance hydrogéologique ont été répartis dans les deux synclinaux du bassin versant de la source de l'Areuse (tableau I), et des profils thermométriques y ont été relevés chaque mois à l'aide d'une thermistance reliée à un pont de mesure Züllig. La précision du dispositif de mesure est de 0,05° C.

Dans les forages dépassant 200 m, la réduction des diamètres de perforation puis l'apparition d'obstacles durant la campagne de mesure n'ont pas permis de faire des observations jusqu'au fond des forages.

Notons que l'amplitude des fluctuations de la surface piézométrique est comprise entre 40 et 60 m suivant les forages.

5. Représentativité des mesures

A la suite des travaux de E. A. Sammel (1968) qui a étudié les phénomènes de convection dans les forages, on sait qu'au-dessus d'un gradient critique, qui est fonction inverse du diamètre, les courants de

TABLEAU I

Forage	Profondeur de perforation [m]	Profondeur atteinte par la sonde [m]	Niveau de la zone saturée 9.2.1967 [m]	Perméabilité [1] de Darcy $K \cdot 10^{-7}$ m s^{-1}
La Brévine	—450	105	—55	1,76
Le Cachot	—200	175	—45	3,2
La Clef-d'Or	—450	210	—58	5,3
Le Brouillet	—75	70	—32	1,2
Les Verrières	—215	215	—105	—

convection provoquent un brassage à l'intérieur du tube, l'eau chaude tendant à monter. La température de l'eau n'est alors plus représentative de celle du terrain à l'emplacement de la mesure. Les cinq forages étudiés ici ont un diamètre de 104 mm en surface avec des réductions possibles en profondeur. Le gradient thermique mesuré dépasse rarement 0,01° C par mètre. Compte tenu des températures qui sont comprises entre 6 et 8° C, on est en-dessous du gradient critique défini par E. A. Sammel.

D'autre part la température de l'eau ne paraît pas être influencée par la profondeur du forage. En effet l'apparition de courants de convection provoquerait nécessairement un réchauffement anormal de l'eau dans le haut du forage et d'autant plus élevé que le forage est profond. On peut donc admettre que le gradient thermique mesuré dans les forages au-dessous de la surface de la nappe correspond bien au gradient thermique du milieu saturé.

En revanche des essais ont montré que des différences de température de l'ordre de 0,1 à 0,3° C apparaissent à la suite du brassage de l'eau par le passage de la sonde entre les mesures effectuées en descendant puis en remontant la sonde (fig. 1). Toutes les mesures étudiées ici ont été faites lors du premier passage.

6. Autres mesures

Source de l'Areuse

La figure 2 représente la température et le débit de la source de l'Areuse entre mars 1968 et mars 1970, les mesures de température étant effectuées une fois par semaine. Celle-ci varie entre 6,4 et 8,9° C mais la plupart des valeurs sont comprises entre 7,0 et 8,0° C.

Lorsque les crues sont accompagnées de fonte de neige, la température de la source descend au-dessous de 7° C et elle dépasse 8° C durant l'étiage prolongé de l'automne 1969.

[1] Déterminé par essai de pompage. D'après J.-P. Tripet *(op. cit.)*.

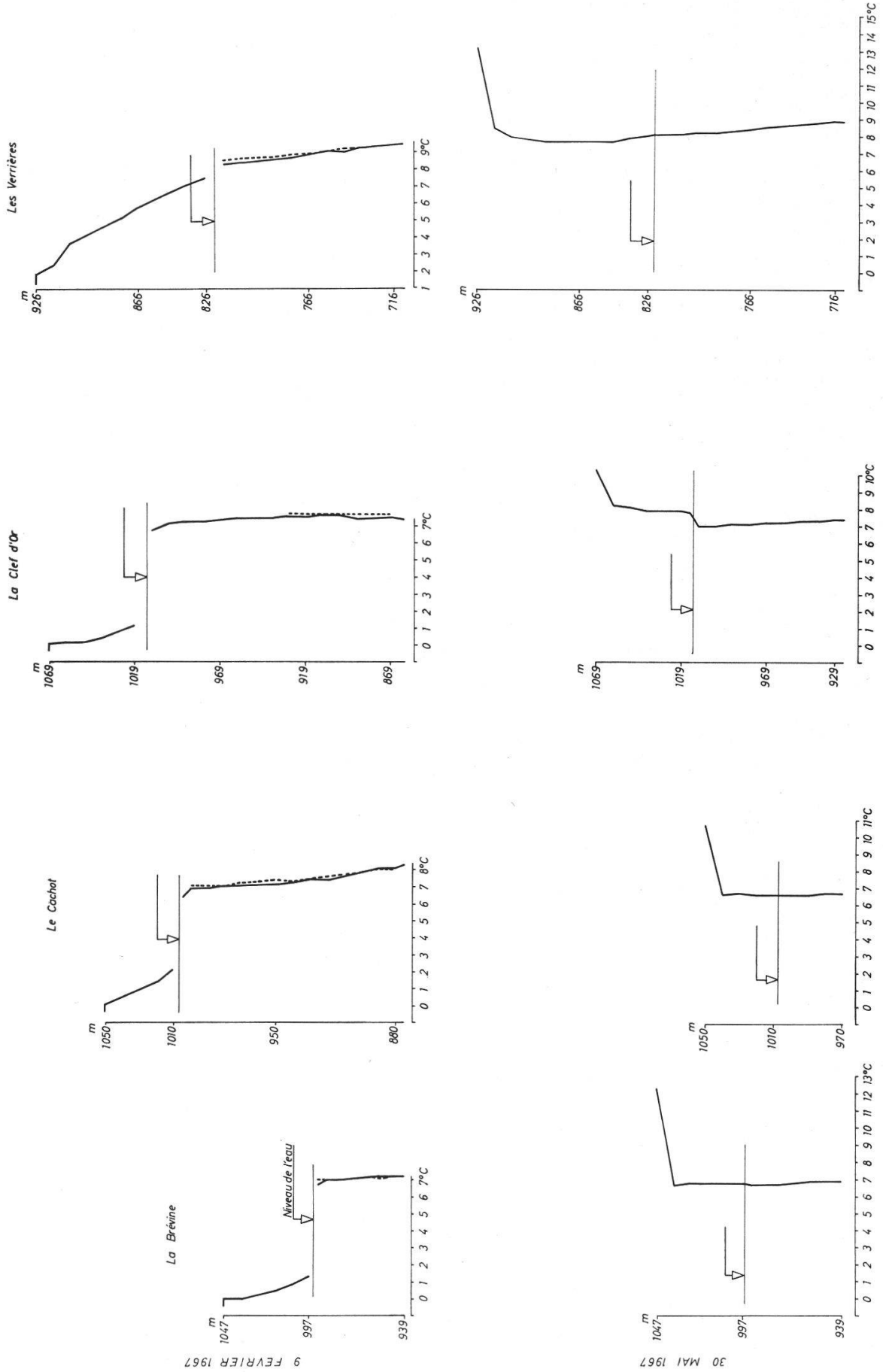

Fig. 1. Profils thermiques dans les forages du bassin de la source de l'Areuse.
(- - - mesures effectuées en remontant la sonde.)

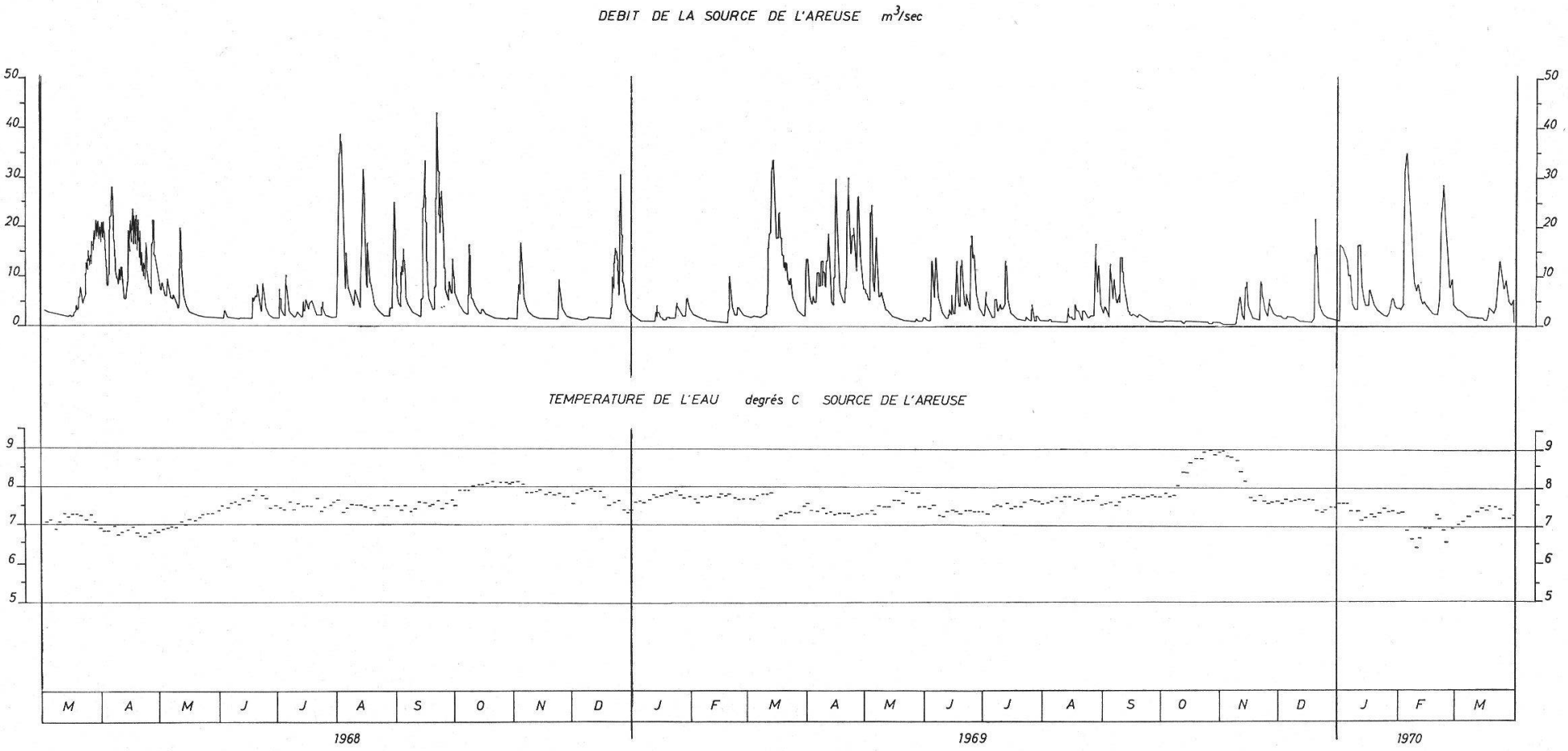

Fig. 2. Débit et température de la source de l'Areuse.

La figure 3 donne l'histogramme des températures hebdomadaires et des débits journaliers moyens aux dates des relevés thermométriques à la source (104 valeurs). La distribution statistique des fréquences est normale pour les températures et nettement log-normale pour les débits journaliers moyens. C'est la raison pour laquelle on constate une amélioration des coefficients $F_{SNEDECOR}$ et r, lorsqu'on remplace le débit par son logarithme dans le calcul des régressions entre ces deux variables (tableau II).

TABLEAU II

Variable dépendante	Variable indépendante	Coefficients de corrélation r	F
Température °C	Débit journalier moyen $m^3 s^{-1}$	—0,33	12,8
Température °C	Log Débit journalier moyen $m^3 s^{-1}$	—0,40	19,7

Si la température est significativement une fonction inverse du débit ($F_{0,01} = 6,85$), les valeurs très médiocres des coefficients de corrélation s'expliquent par l'absence d'un facteur saisonnier comme variable indépendante dans la régression. On constate en effet (fig. 2) que les crues d'été ou d'automne n'abaissent pas autant la température de la source que les crues printanières.

Température de l'air

La figure 3 donne un histogramme des températures mensuelles moyennes de l'air (1966-1969) aux stations du Gardot et des Verrières. Dans les deux cas les distributions sont nettement bimodales avec un maximum pour les périodes froides et les périodes chaudes, les valeurs intermédiaires étant mal représentées, ce qui caractérise un climat où les « entre-saisons » sont de courte durée.

Température du sol

La distribution des températures mesurées chaque mois à la station de la Brévine à 0,40 m de profondeur est de tendance bimodale, sous réserve du petit nombre d'observations (19).

7. Température dans les forages

Histogrammes

La figure 1 représente quelques profils thermiques parmi les trente-quatre relevés pour chacun des cinq forages.

L'histogramme des fréquences des températures à diverses profondeurs pour trois forages montre que les fréquences sont toujours unimodales et, compte tenu du nombre d'observations, on voit qu'elles se rapprochent d'une distribution normale dont l'écart type décroît avec la profondeur (fig. 4).

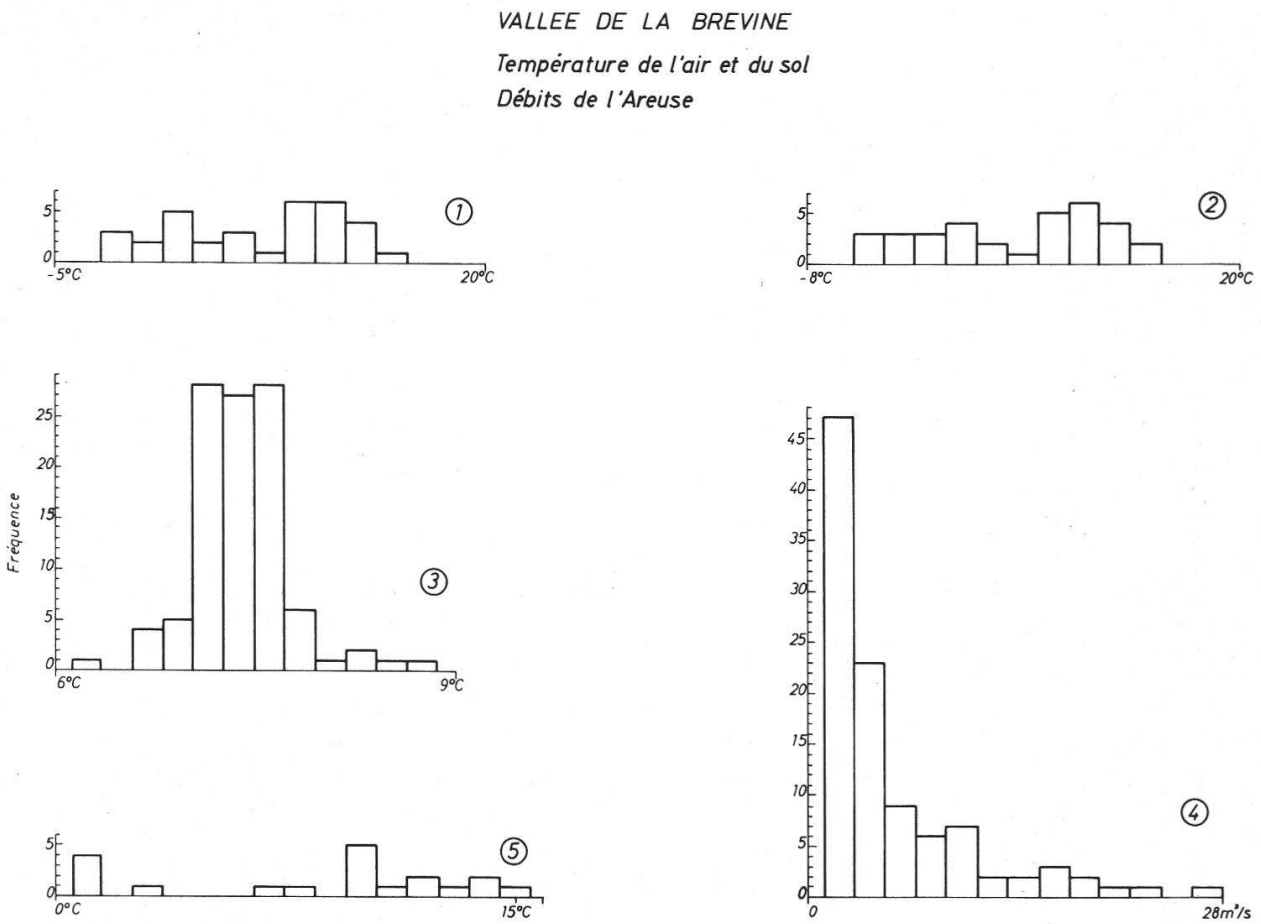

Fig. 3. Histogrammes : 1. Température mensuelle moyenne de l'air à La Brévine ; 2. Idem aux Verrières ; 3. Température de la source de l'Areuse ; 4. Débit de la source de l'Areuse (2 ans, 104 valeurs) ; 5. Température du sol à La Brévine.

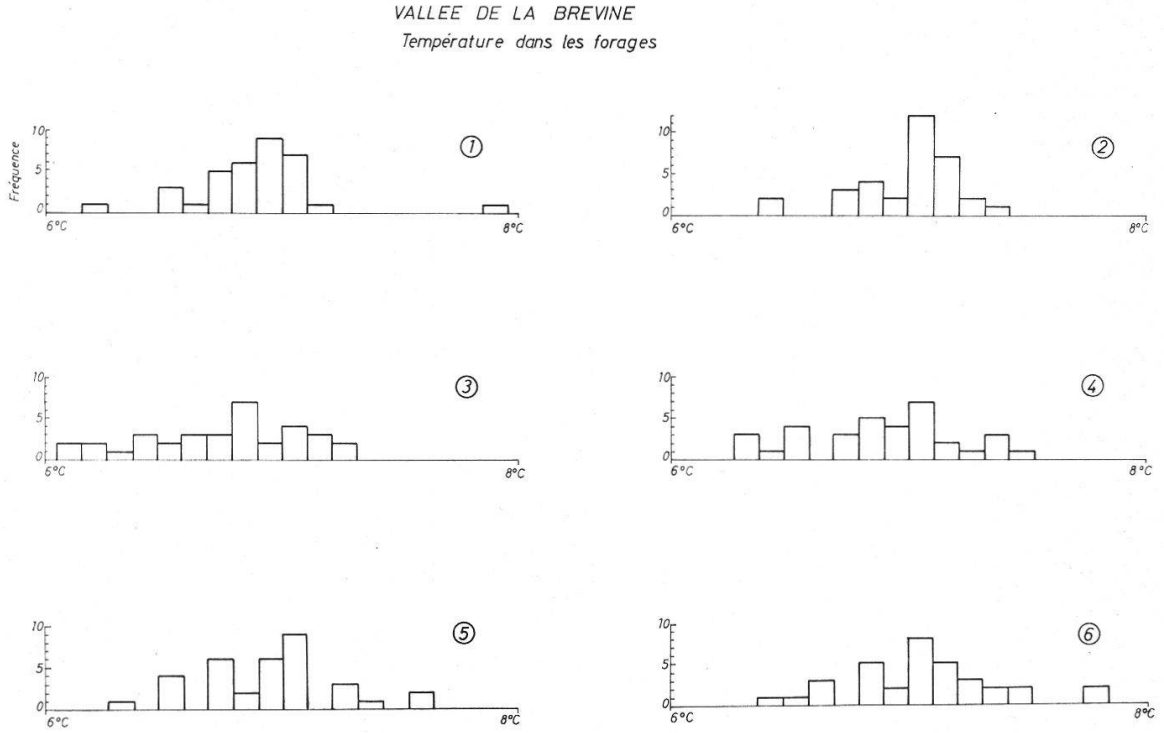

Fig. 4. Histogrammes des températures dans les forages (34 valeurs par forage) : 1. La Brévine, —60 m ; 2. La Brévine, —100 m ; 3. Le Cachot, —60 m ; 4. Le Cachot, —80 m ; 5. La Clef-d'Or, —70 m ; 6. La Clef-d'Or, —100 m.

TABLEAU III

Analyse statistique sommaire des températures

(1967-1969)

Température	Station	Moyenne °C	Ecart type °C	Maximum °C	Minimum °C	Gradient géothermique moyen deg m^{-1}
Air : moyenne mensuelle	Le Gardot	5,2	5,9	14,7	—4,7	
Air : moyenne mensuelle	Les Verrières	5,5	6,0	14,8	—4,6	
Terrain —0,40 m	La Brévine	8,7	5,2	15,4	0,6	
Forage (987 m)	La Brévine	6,86	0,28	7,9	6,2	0,004
Forage (947 m)	La Brévine	7,00	0,24	7,4	6,4	
Forage (990 m)	Le Cachot	6,73	0,34	7,3	6,1	0,007
Forage (970 m)	Le Cachot	6,87	0,33	7,5	6,3	
Forage (1000 m)	La Clef-d'Or	6,92	0,31	7,6	6,3	0,005
Forage (970 m)	La Clef-d'Or	7,07	0,34	7,8	6,4	
Source de l'Areuse	Saint-Sulpice	7,64	0,37	8,9	6,4	
Débit de l'Areuse	Saint-Sulpice	5,25 $m^3 s^{-1}$	5,75 $m^3 s^{-1}$	28,3 $m^3 s^{-1}$	0,65 $m^3 s^{-1}$	

Le tableau II fournit une analyse statistique sommaire des températures pour les variables envisagées.

La température moyenne de l'air est inférieure de 2° C à 2,5° à celle de la source et de 1,5 à 2° C à celle mesurée dans les forages. La température moyenne du terrain est la plus élevée et les variations sont importantes. En revanche, dès que l'on se trouve au sein de l'aquifère, l'écart type des valeurs est fortement réduit, et si la distribution des valeurs dans le temps n'est pas encore parfaitement symétrique autour de la moyenne, cette situation est acquise à la source (fig. 3).

TABLEAU IV

Variation du gradient thermique dans les forages en fonction de la profondeur

Forage du Cachot

Date	Gradient thermique deg m^{-1}		
	—50 à —90 m	—90 à —130 m	—130 à —170 m
9.2.1967	0,005	0,008	0,018
14.3.1967	0,008	0,008	0,015

Forage de la Clef-d'Or

Date	Gradient thermique deg m^{-1}		
	—80 à —120 m	—120 à —160 m	—160 à —200 m
9.2.1967	0,005	0,005	—0,005
14.3.1967	0,008	0,005	—
31.3.1967	0,005	0,005	—

Forage des Verrières

Date	Gradient thermique deg m^{-1}		
	—110 à —140 m	—140 à —170 m	—170 à —210 m
8.2.1967	0,010	0,013	0,013
14.3.1967	0,013	0,013	0,008
31.3.1967	0,010	0,010	0,010
5.5.1967	0,020	0,004	0,010
28.5.1967	0,007	0,003	0,013

8. Interprétation des résultats

Emplacement des forages et variation régionale de la température

Contrairement à ce que l'on peut observer dans un aquifère morainique (Cartwright *op. cit.*), on ne décèle pas ici de tendance à un réchauffement des eaux souterraines lorsqu'on se rapproche de l'exutoire.

A la Brévine, la température moyenne de l'eau à la cote 980 m est même légèrement inférieure à celle obtenue à la Clef-d'Or à cette altitude, alors que les deux forages sont distants de 9 km (tableau III).

En tenant compte des profondeurs sous la surface de la nappe ou sous la surface du sol, ces remarques restent valables.

On verra que l'hétérogénéité de la perméabilité de l'aquifère karstique permet d'interpréter ces observations.

Gradient géothermique

Si le gradient géothermique est toujours positif à l'exception d'une valeur négative entre —160 et —200 m à la Clef-d'Or, celui-ci peut varier avec la profondeur (tableau IV). Il est en général plus faible près de la surface de la nappe (forage du Cachot), mais une diminution du gradient avec la profondeur peut arriver.

L'apparition d'obstacles dans les tubages au cours des observations empêchent l'étude statistique de ce phénomène. C'est pour cette raison également que la valeur moyenne du gradient thermique de chaque forage a été calculée pour des profondeurs relativement faibles (tableau II).

Gradient et flux géothermique

Analogue à la loi de Darcy pour les écoulements souterrains, la loi de Fourier permet d'exprimer la relation qui lie le flux thermique au gradient :

$$Q = K_F \cdot \text{grad } T$$

où K_F est un coefficient qui représente la conductivité thermique du milieu.

Dans les calcaires, K_F est généralement compris entre 6,0 et 8,0 mcal s^{-1} cm^{-1} deg^{-1} (S. P. Clark, JR. 1966).

A partir des travaux de Haenel *(op. cit.)* et Von Herzen *(op. cit.)*, on peut admettre 2,0 μcal cm^{-2} s^{-1} comme flux géothermique moyen dans le bassin de l'Areuse. Le calcul montre que dans ce cas le gradient géothermique en l'absence de circulation d'eau devrait être compris entre 0,025 et 0,034 deg m^{-1}, soit sensiblement les valeurs admises pour la Suisse.

On constate que les gradients thermiques mesurés dans les forages (tableaux II et III) sont 2 à 8 fois plus faibles.

A moins d'envisager une anomalie régionale très importante du flux géothermique, ce qui peut être exclu, l'abaissement du gradient géo-

thermique dans le bassin de la source de l'Areuse doit être mis sur le compte de la circulation karstique, une grande partie du flux géothermique servant au réchauffement des eaux souterraines.

Gradient géothermique et perméabilité

Les résultats des mesures de température s'intègrent bien dans le schéma maintenant admis pour représenter la circulation de l'eau dans un massif calcaire à perméabilité hétérogène.

Un réseau de chenaux karstiques très perméables mais relativement peu abondants (joints de 2e ordre) draine les eaux qui circulent dans des joints beaucoup plus fins (joints de 1er ordre), dans lesquels sont implantés les forages, et les conduisent rapidement à l'exutoire (Bertrand, Mathey et Mornod *op. cit.*). Le réchauffement des eaux souterraines va donc s'effectuer surtout dans la partie peu perméable du massif (où sont implantés les forages), puisque l'eau y séjourne plus longtemps. Dès que l'eau parvient dans les joints de 2e ordre, les transferts de chaleur y sont moins importants en raison de la rapidité de la circulation.

Les différences de température et de gradient d'un forage à l'autre proviennent de différences entre les valeurs locales de perméabilité et de vitesses de circulation. L'absence de tendance au réchauffement des eaux lorsqu'on se rapproche de l'exutoire est ainsi expliquée.

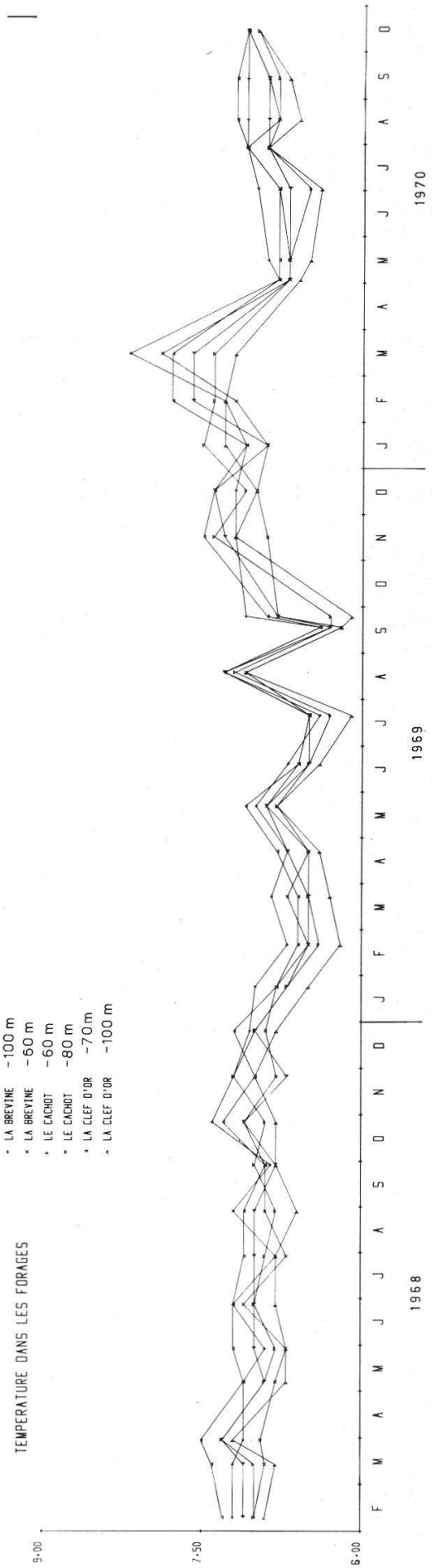

Fig. 5. Fluctuations saisonnières de la température dans les forages.

9. Flux géothermique et température de la source

Rapportée à la surface du bassin alimentaire de la source de l'Areuse, la puissance dissipée par le flux géothermique vaut :

$$2{,}6 \,.\, 10^6 \text{ cal s}^{-1}$$
$$\text{ou } 10{,}9 \,.\, 10^6 \text{ Watt}$$

dont une partie est utilisée pour le réchauffement des eaux souterraines.

Des valeurs du gradient géothermique moyen dans la partie supérieure de la zone saturée, on déduit le flux à ce niveau, qui représente $^1/_5$ à $^1/_{10}$ du flux total.

Dans le cas d'un bilan thermique s'appliquant à tout le bassin, on devrait tenir compte des parties du bassin où la nappe est absente ($\sim^1/_3$ de la surface alimentaire), où les transferts de chaleur sont inconnus.

Le tableau V donne l'élévation théorique de la température de la source de l'Areuse pour divers débits et pour une participation variable du flux géothermique au réchauffement de l'eau.

TABLEAU V

Débits 1959-1971 [m^3 s^{-1}]	Elévation de la température à la source [°C]		
	100% [1]	60% [1]	30% [1]
Débit annuel moyen (4,72)	0,55	0,33	0,16
Débit journalier moyen maximum (49)	0,05	0,03	0,02
Débit journalier moyen minimum (0,27)	9,6	5,8	2,9

[1] Participation du flux géothermique au réchauffement de l'eau.

A l'exception des débits inférieurs à 1 m^3 s^{-1}, on constate que le flux géothermique a une influence restreinte sur la température de l'eau. En étiage, l'élévation de température pourrait atteindre 9,6° C dans le cas où la totalité du flux était utilisée. Cette situation extrême n'est toutefois jamais réalisée en raison du tampon thermique représenté par le massif et des fluctuations saisonnières de la température des eaux d'infiltration, qui empêchent l'apparition d'un régime de transfert de chaleur stationnaire, même lorsqu'on s'approche d'un état hydraulique permanent durant des décrues de durée exceptionnelle (automnes 1962 et 1969).

La seule étude analytique des fluctuations de température de la source est donc insuffisante pour fixer la part du flux géothermique transféré aux eaux souterraines.

D'autre part la géométrie du bassin et l'hétérogénéité de la perméabilité, ainsi que la méconnaissance des transferts de chaleur dans la

zone non saturée, ne permettent pas de résoudre pour l'instant les équations de transport et de diffusion pour ce bassin.

10. Conclusions

L'étude du gradient géothermique dans le bassin de la source de l'Areuse permet de vérifier que, dans la zone saturée, les $^4/_5$ au moins de la chaleur apportée par le flux géothermique sont utilisés pour le réchauffement des eaux souterraines, ce qui représente une élévation théorique de la température des eaux de la source, rapportée au débit moyen, de 0,4 à 0,5° C, mais en admettant que les transferts de chaleur sont identiques pour les régions alimentaires où la zone saturée est absente.

En revanche, l'analyse des températures de la source de l'Areuse ne permet pas pour l'instant de déterminer la puissance effectivement dissipée dans les eaux souterraines par le flux géothermique.

Seul un modèle numérique synthétique du bassin avec couplage des phénomènes hydrauliques et thermiques permettrait de séparer l'apport de chaleur des eaux d'infiltration de celui du flux terrestre et de confirmer l'importance de ce dernier dans le réchauffement de l'eau.

Remerciements

Ce travail entre dans le cadre de recherches financées par le Fonds national suisse de la recherche scientifique et entreprises au Centre d'Hydrogéologie en collaboration avec l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (Institut de production d'énergie IPEN et Laboratoire de géotechnique LEGEP).

Les mesures de températures ont été effectuées par les Services industriels du Locle dans le cadre d'une recherche sur les eaux souterraines du bassin de l'Areuse, entreprise et financée par les services groupés au sein du Comité de l'Areuse.

Nous remercions les représentants de ces institutions de leur contribution à la réalisation de ce travail.

Résumé

L'étude des gradients géothermiques mesurés dans la zone saturée du bassin alimentaire de la source karstique de l'Areuse montre que les $^4/_5$ de la chaleur provenant du flux géothermique sont utilisés pour le réchauffement des eaux souterraines.

L'analyse des températures de la source ne permet pas pour l'instant de confirmer cette participation du flux géothermique au réchauffement de l'eau.

La distribution régionale des températures (pas de réchauffement de l'eau lorsqu'on se rapproche de l'exutoire) est en accord avec le schéma maintenant admis pour représenter la circulation de l'eau dans un massif calcaire à perméabilité hétérogène.

Summary

The study of the geothermic gradients measured in the saturated zone of the alimentary basin of the Areuse karstic spring (Swiss Jura) shows that $^4/_5$ of the heat from the geothermic flow are used for the warming up of the groundwater.

The transient nature of the transport and diffusion phenomena doesn't permit confirmation of this participation of the geothermic flow based on the analysis of the temperatures of the spring.

The regional distribution of the temperatures in the basin coincides with the theory now admitted to show the circulation in the carbonate rocks with heterogeneous permeability.

BIBLIOGRAPHIE

BERTRAND, J., MATHEY, B. et MORNOD, L. — (1973). Inversion temporaire du gradient hydraulique dans un karst et hétérogénéité de la perméabilité. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.* 96 : 97-103.

BREDEHOEFT, J. D. et PAPADOPULOS, J. S. — (1965). Rates of Vertical Groundwater Movement Estimated from the Earth's Thermal Profile. *Water Resources Research* 1 (2) : 325-328.

BURGER, A. — (1959). Hydrogéologie du bassin de l'Areuse. *Bull. Soc. neuchâtel. Géogr.* 52 (1) : 304.

CARTWRIGHT, K. — (1971). Redistribution of Geothermal Heat by a shallow Aquifer. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 82 : 3197-2200.

CLARK, S. P. — (1966). Handbook of Physical Constants. Revised Edition. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* 97 : 587 pp.

HAENEL, R. — (1971). Heat Flow Measurements and First Heat Flow Map of Germany. *Zeitschrift für Geophysik* 37 : 975-992.

SAMMEL, E. A. — (1968). Convective Flow and its Effect on Temperature Logging in Small Diameter Wells. *Geographics* 33 (6) : 1004-1012.

SOREY, M. L. — (1971). Measurement of Vertical Groundwater Velocity from Temperature Profiles in Wells. *Water Resources Research* 7 (4) : 963-970.

STALLMAN, R. W. — (1960). Notes on the Use of Temperature Data for Computing Groundwater Velocity. *Soc. Hydrotechn. France, Nancy.* 6th Assembly on Hydraulics, rept 3 : 1-7.

TRIPET, J.-P. — (1972). Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois). Thèse, Université de Neuchâtel. 183 pp.

Office fédéral d'économie hydraulique. Annuaire hydrographique de la Suisse.