



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 1371–1378



COMPTES RENDUS

GEOSCIENCE

<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Géosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)

Eaux fortement minéralisées et circulations profondes dans le socle. Exemple des Alpes franco-italiennes

Gian-Maria Zuppi^{a,*}, Jean-Paul Novel^b, Martial Dray^c, Xavier Darmendrail^d,
Serge Fudral^e, Claude Jusserand^c, Gérard Nicoud^e

^a Dipartimento di Scienze Ambientali, Università Ca' Foscari di Venezia, Calle Larga Santa Marta, Dorsoduro 2137, 30123 Venezia, Italie

^b SEA Consulting, via Cernaia 27, 10121 Torino, Italie

^c Centre de recherches géodynamiques, université Pierre-et-Marie-Curie, Paris-6, 47, av. de Corzent, 74200 Thonon-les-Bains, France

^d Lyon–Turin Ferroviaire SAS, 1091, av. de la Boisse, 73026 Chambéry, France

^e EDYTEM, université de Savoie, campus scientifique, 73376 Le-Bourget-du-Lac, France

Reçu le 7 août 2004 ; accepté après révision le 18 août 2004

Présenté par Ghislain de Marsily

Résumé

La présence de plusieurs sources à teneur élevée en chlorures, appauvries en isotopes stables, sans tritium et avec une faible activité en carbone 14 est bien connue dans les Alpes franco-italiennes. L'origine des anomalies chimiques a toujours été au centre des discussions scientifiques. Les études réalisées récemment en vue de la définition du tunnel transalpin de l'axe ferroviaire Lyon–Turin ont mis en évidence la présence de couches évaporitiques qui pourraient expliquer les faciès chlorurés sodiques des eaux thermales circumalpines. **Pour citer cet article : G.-M. Zuppi et al., C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Highly mineralised waters and deep groundwater circulation in crystalline basement. Example in the French–Italian Alps. The presence in the French–Italian Alps of several springs characterized by a high sodium–chloride content, depleted in oxygen-18, tritium free and with low carbon-14 activity, is well known. The geological, hydrological, and geochemical studies in progress for the new high-speed railway tunnel crossing the French–Italian Alps, show, in the drilled boreholes at a mean elevation of 700 masl, the presence of brines. Brines appear to be the basis of the geological, structural, and hydrodynamic systems, and fill the largest faults and the main tectonic contacts. The brines squeezed by tectonic activity, are mobilised at depth by freshwaters from the surface. **To cite this article: G.-M. Zuppi et al., C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : zuppi@unive.it (G.-M. Zuppi).

Mots-clés : Alpes ; roches cristallophylliennes ; circulations hydriques profondes ; saumures ; isotopes de l'environnement

Keywords: Alps; crystalline rocks; water deep circulation; brines; environmental isotopes

Abridged English version

In the French–Italian Alps, several water points characterised by a high sodium chloride content, such as Salins, Brides, Uriage, Saint-Vincent, Ceresole Reale, Vinadio, Valdieri, Bex, are located on the verge of external crystalline massifs (Mercantour–Argentera, Belledonne–Pelvoux, Mont Blanc), whereas others are situated along the main tectonic lines (accidents de Fond-de-France, de Grand Maison, de Belle-Étoile...) [5–7,13,28]. Numerous water inflows, rich in sodium, depleted in oxygen-18, tritium free and with low carbon-14 activity, have been observed in alpine tunnels, at a mean elevation of 1300 masl ([7], Turin University, unpublished data).

The origin of this water has been discussed in several publications, which propose two main hypotheses. The first one is that the origin of the brine is geochemical, as in the Canadian shield [3,11,12,27]; the second hypothesis, called the theory of ‘halocinèse’ [8,10,16,20], suggests a geological origin.

The geological, hydrological, and geochemical studies now in progress, for the new high-speed railway tunnel crossing the French–Italian Alps (Fig. 1) show, in the drilled boreholes at a mean elevation of 700 masl, the presence of brines (Table 1), mainly NaCl, with an electric conductivity of up to 220 mS·cm⁻¹ [24,25]. Brines appear to be the basis of the geological, structural, and hydrodynamic systems, and fill the largest faults and the main tectonic contacts. These brines squeezed by tectonic activity are mobilised at depth by freshwater from the surface. The brines are present under more than one thousand meters of lithological cover only at the sites where the fracturation is weak and, therefore, the quantity of freshwater potentially leaching the salt is low compared to its existing stock.

The higher solubility of halite does not allow it to be identified in the outcropping formations or in the cuttings of boreholes (anhydrite is mentioned in the majority of the geological logs, even if the water contains higher quantities of chlorides). Nevertheless, fluid analyses indicate that chloride leaching domi-

nates over the sulphate one. Anyhow, Na enrichment has been noted to be linked to interactions with silicates that form the mineralogical matrix of the geological systems (Fig. 2). In addition to a high sodium chloride content, the spring water facieses show variable dissolved salt contents, with a relatively high tritium content and high ¹⁴C activity [1,17–19,23]. However, saltwater found at different depths during borehole drilling and/or tunnelling reveals [9,24,25] no tritium (Table 1) and a ¹⁴C activity lower than 25 pmc, defining ages varying between 5000 and 12 000 years ([7], Turin University unpublished data).

Mineralised water from Alpine springs has variable $\delta^{18}\text{O}$ contents between -15.0‰ and -7.0‰ , with a mean of $-12.1 \pm 1.9\text{‰}$. This highlights the fact that the percolating water can mobilize brines that are trapped within the tectonic structures. Isotopes of the water molecule reflect the mean elevation of the area of recharge by precipitation in which evaporites will dissolve. On the contrary, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ content of deep waters, collected in boreholes, do not indicate a similar clear relation with the current precipitation. Water from superficial levels, with a NaCl content below 10 g l⁻¹, displays variable $\delta^{18}\text{O}$ contents between -15.0 and -13.0‰ , with a mean of -13.8 ± 0.7 . Water from confined aquifers intercepted by deep boreholes (600 to 1500 m) shows a NaCl concentration of up to 10 g l⁻¹, but has more depleted $\delta^{18}\text{O}$ values (from -16.5 to -15.5‰ , with a mean of $-15.9 \pm 0.3\text{‰}$), which do not match those of the current precipitation. This isotopic depletion is not linked to an altitude effect, but to a temperature effect associated with colder climate conditions that probably prevailed in the recharge area during the deglaciation following the LGM, about 18 000 yr BP. As the hydraulic base level was deeper due to sea-level fluctuations and the available water quantity greater during the recharge period [15], the hydraulic pressure was high and, consequently, caused a descending circulation, even at great depths. Infiltrating water mobilizes brines, pushing them upwards still with their high salt content through the largest faults and the main tectonic contacts. The whole set of waters is aligned along the

global meteoric line (Fig. 3) without indicating any fractionation from thermal waters [7,25]. One point (borehole F31) falls out of the global meteorological line, indicating water isotopically enriched in deuterium. The hydration of primary silicates in a closed system may be in part responsible for the positive shift in $\delta^2\text{H}$, as shown in Fig. 3, through low-temperature exchanges with the mineralogical matrix [11,12,14]. This fact reinforces the hypothesis of the structural confinement of the evaporites.

1. Introduction

Dans l'arc alpin, des sources à faciès chloruré sodique sont présentes sur les bordures des principaux massifs cristallins [5–7,13,28]. Ces eaux se caractérisent, en effet, par de fortes teneurs en sels (Na, Cl, SO_4), par une composition isotopique appauvrie en $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, par des valeurs en ^3H à la limite de la détection analytique et par des activités en ^{14}C inférieures à 25 pcm, affichant un âge compris entre 5000 et 12 000 ans ([7], données inédites de l'université de Turin).

Certaines d'entre elles (Salins, Brides, Uriage...) se rencontrent au front des massifs cristallins externes ou en bordure des fronts de chevauchement. D'autres (Vinadio, Valdieri, Saint-Vincent, Ceresole...) se situent le long des principales lignes tectoniques alpines.

De même, de nombreuses venues d'eau, à faciès chloruré sodique, ont été rencontrées dans les tunnels alpins [1,17–19,23].

Récemment, dans le cadre des études pour la future ligne ferroviaire Lyon–Turin (Fig. 1), les forages de reconnaissance ont mis en évidence, le long du tracé, la présence de fluides profonds chlorurés et sulfatés alcalins.

L'origine des eaux à faciès chloruré présentes dans les roches cristalloyphylloïennes a fait l'objet de nombreuses publications scientifiques, proposant deux hypothèses : la première, intrinsèque, fait appel à une saumure présente à l'intérieur de la matrice cristalline de l'amas rocheux cristalloyphylloïen ; elle a été décrite par [3,11,12,27] ; la seconde, extrinsèque, suppose une origine géologique liée à la présence de couches évaporitiques ; elle renvoie à la théorie de l'halocinèse [8,10,16,20].

2. Les nouvelles données

Les études relatives aux tunnels de la ligne Lyon–Turin ont inclus l'analyse des eaux issues des aquifères superficiels (sources) et des écoulements profonds interceptés par les forages de reconnaissance. Ces derniers, qui peuvent atteindre 1400 m de profondeur et sont situés le long du tracé, intéressent les différents lithotypes des zones ultradauphinoise, subbriançonnaise, briançonnaise externe, briançonnaise interne et piémontaise [21].

Les eaux des sources alimentées par les aquifères superficiels sont de type bicarbonaté alcalino-terreux ou sulfaté alcalino-terreux, quelle que soit la lithologie. La variation de la chimie de l'eau est due à l'évolution des teneurs en hydrogénocarbonates et en sulfates, et, dans une moindre mesure, aux valeurs du calcium et du magnésium. La conductivité électrique varie, pour la grande majorité des sources, d'un facteur trois (entre 200 et 600 $\mu\text{S cm}^{-1}$). Quelques valeurs plus élevées correspondent à de fortes concentrations en sulfates (entre 0,5 et 1,5 g l^{-1}), traduisant un aquifère développé dans les évaporites du Trias alpin et les cargneules associées.

Les eaux prélevées en forages montrent une variation chimique plus grande que celle des eaux des sources [24,25]. Les quatre principaux types d'eau sont :

- bicarbonaté alcalino-terreux ;
- chloruré sulfaté alcalino-terreux ;
- chloruré sulfaté alcalin ;
- bicarbonaté alcalin.

Les valeurs de la conductivité électrique de l'eau sont comprises entre 0,15 et 218 mS cm^{-1} , soit une variation d'un facteur 1500. L'amplitude la plus élevée se situe dans les écoulements du Briançonnais siliceux et des Schistes lustrés : elle est due à la présence d'importants amas d'évaporites (gypse, anhydrite, halite) au sein de ces unités [24,25]. Les amplitudes sont plus réduites pour les autres formations ; elles sont d'un facteur 10 pour le Houiller, 2 pour le massif gneissique d'Ambin et 4 pour le massif de Dora Maira (gneiss et micaschistes) et sa couverture (dolomies et calcaires).

La diversité hydrochimique mise en évidence par les forages le long du tracé des tunnels se retrouve également au sein même des lithotypes. Par exemple, dans

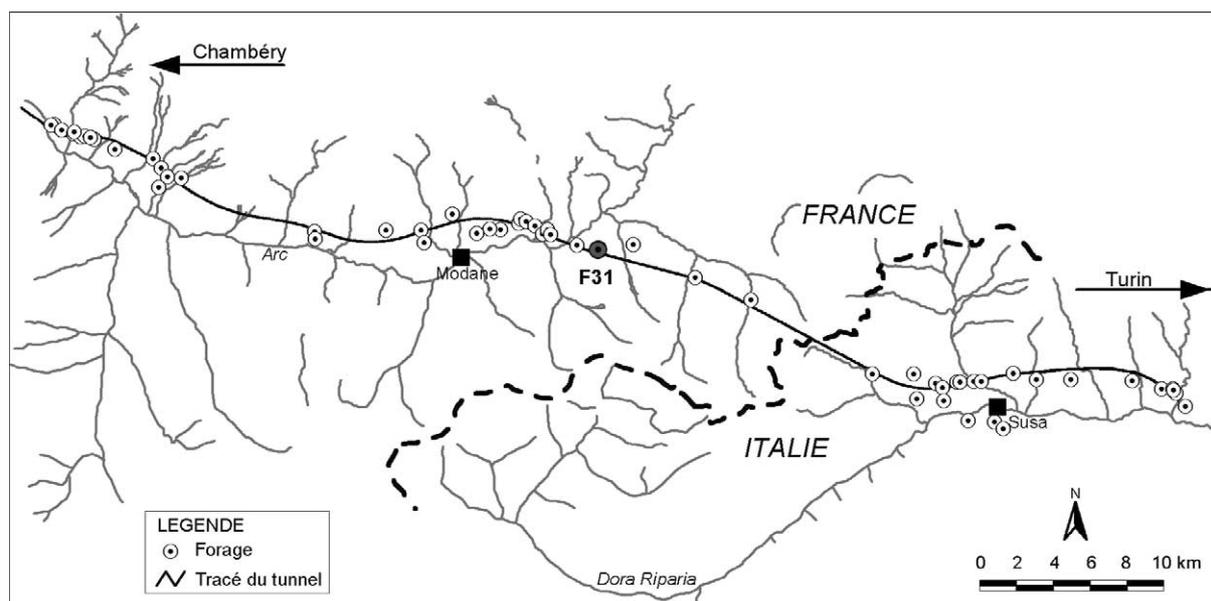


Fig. 1. La future liaison ferroviaire Lyon–Turin.

Fig. 1. The future high-speed railway line Lyon–Turin.

les quartzites, considérés comme l'aquifère principal du Briançonnais interne [22], trois types d'eau apparaissent : bicarbonaté alcalino-terreux, chloruré sulfaté alcalin et chloruré sulfaté alcalino-terreux. Ceci reflète la complexité des circulations, et donc la difficulté d'établir une relation stricte entre l'hydrochimie et la matrice minéralogique de l'aquifère. Les circulations, par le jeu de la fracturation et des accidents structuraux, recoupent diverses unités géologiques, et conduisent à une stratification hydrochimique, les eaux les plus chargées se trouvant majoritairement en profondeur.

3. Discussion

Le point commun à presque toutes les eaux profondes rencontrées en forage et à certaines eaux thermales est la présence de sels dissous en concentration élevée (Tableau 1). Ceci suggère l'existence de circulations très lentes (« passives »), voire nulles (eaux piégées), et de discontinuités hydrauliques. L'origine de ces sels est vraisemblablement triple :

- présence de joints évaporitiques, plus ou moins continus, à la base et au sein des nappes de charriage ;

- existence de noyaux salifères, liés aux semelles évaporitiques, injectés vers l'avant du front de charriage, ou bien le long de failles normales plus tardives, ou encore déposés dans des fractures par des paléocircuits hydrologiques ;
- évolution géochimique très lente (hydrolyse) des roches cristallophylliennes, qui entraîne une augmentation de la teneur en Na.

En outre, la droite de dilution de la halite regroupe à la fois (Fig. 2) :

- les eaux les moins chargées, issues des circulations rapides et superficielles et dont la teneur en Cl est légèrement plus forte que celle apportée par les précipitations ;
- les eaux les plus chargées, c'est-à-dire celles qui sont piégées ou qui se mobilisent dans les circulations passives.

Les eaux de teneurs intermédiaires s'éloignent de cette droite de dilution, d'autant plus que la charge minérale diminue. Il y a une augmentation relative de la concentration en sodium due à des vitesses de circulations actives mais très lentes (échange eau–matrice

Tableau 1

Teneurs en éléments majeurs et isotopes sur les venues d'eau interceptées par les forages de reconnaissance situés entre Saint-Jean-de-Maurienne (France) et Susa (Italie). Les analyses des sources sont publiées dans [5,7,13,25,28]

Table 1

Chemistry of water collected in prospecting boreholes between Saint-Jean-de-Maurienne (France) and Susa (Italy). Spring chemical data have been published in [5,7,13,25,28]

| Forage n° | Géologie | niveau (m) | Date | T °C | C.E. ($\mu\text{S cm}^{-1}$) | pH | Ca (mg l^{-1}) | Mg (mg l^{-1}) | Na (mg l^{-1}) | K (mg l^{-1}) | HCO ₃ (mg l^{-1}) | Cl (mg l^{-1}) | SO ₄ (mg l^{-1}) | NO ₃ (mg l^{-1}) | SiO ₂ (mg l^{-1}) | $\delta^{18}\text{O}$ ‰ | $\delta^2\text{H}$ ‰ | ^3H UT |
|-----------|-------------------------|-------------|----------|------|--------------------------------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---|---------------------------|--|--|---|-------------------------|----------------------|-----------------|
| F53bis | anhydrite calcaire gris | -193 | 02/09/99 | 10,5 | 5842 | 6,9 | 613 | 255 | 803 | 29 | 842 | 42 | 3377 | < 3,1 | 21 | -13,0 | -95,4 | 11,2 |
| | | -440 | 23/10/99 | 10,5 | 1735 | 7,5 | 331 | 62 | 25 | 4 | 183 | 2 | 917 | < 3,1 | 2 | | | |
| | | -460 | 26/11/99 | 10,5 | 2054 | 7,5 | 461 | 61 | 10 | 2 | 171 | 7 | 1160 | < 3,1 | 2 | -12,9 | -97,8 | 11,6 |
| | | -600 | 25/11/99 | 8,5 | 2264 | 7,7 | 543 | 68 | 5 | 2 | 171 | 2 | 1369 | 3,1 | 4 | -13,0 | -98,6 | 12,7 |
| F32 | grès | -250 | 11/10/99 | 10,3 | 226 | 8,2 | 45 | 3 | 4 | 1 | 132 | 1 | 20 | 0,4 | 11 | -13,3 | -97,5 | 10,0 |
| | | -620 | 07/10/99 | 22,4 | 252 | 8,0 | 41 | 3 | 5 | 1 | 131 | 1 | 20 | 0,3 | 9 | -13,4 | -97,0 | 13,0 |
| F59 | grès pérites | -350 | 20/11/98 | 13,0 | 218 | 9,0 | 16 | 4 | 37 | 3 | 139 | 1 | 5 | 0,3 | 7 | -13,1 | | 6,0 |
| | | -736 | 01/02/99 | 23,0 | 674 | 8,7 | 42 | 7 | 189 | 3 | 495 | 33 | 17 | < 0,1 | 13 | | | |
| F13 | grès et schistes | -325/-352 | 30/10/98 | 30,5 | 927 | 8,9 | 2 | < 1 | 209 | 5 | 377 | 68 | 25 | < 0,1 | 25 | -14,2 | | |
| | | -442/-465 | 19/11/98 | 38,5 | 1315 | 8,8 | 7 | 1 | 291 | 6 | 508 | 138 | 44 | < 0,5 | 21 | -14,3 | | |
| | | -564/-592 | 19/11/98 | 43,0 | 2292 | 8,3 | 8 | 1 | 491 | 10 | 668 | 349 | 107 | < 0,5 | 31 | -14,7 | | |
| F20 | quartzites calcaire | -380 | 10/10/99 | 6,0 | 488 | 7,7 | 84 | 8 | 5 | 2 | 129 | 1 | 140 | < 0,1 | 12 | -13,8 | -102,5 | 13,0 |
| | | -607/-668 | 16/10/99 | 8,0 | 1059 | 7,6 | 225 | 10 | 5 | 1 | 127 | 1 | 484 | 0,2 | 12 | -13,9 | -100,6 | 13,0 |
| | | -1135/-1155 | 14/10/99 | 22,5 | 657 | 8,0 | 117 | 9 | 4 | 1 | 134 | 1 | 226 | 0,4 | 10 | -13,9 | -100,6 | 9,0 |
| F21 | quartzites micaschistes | -325 | 07/09/99 | 10,0 | 150 | 8,2 | 23 | 5 | < 1 | < 1 | 70 | < 1 | 16 | 0,8 | 6 | -15,0 | -111,4 | 19,0 |
| | | -650 | 05/10/99 | 15,0 | 6348 | 8,0 | 163 | 19 | 1286 | 28 | 319 | 700 | 2144 | < 2 | 6 | -16,2 | -119,2 | 2,0 |
| | | -730 | 05/10/99 | 17,5 | 5308 | 8,5 | 28 | 10 | 1162 | 21 | 306 | 548 | 1579 | < 2 | 5 | -16,3 | -121,0 | < 1 |
| F22 | quartzites | -295/-318 | 26/10/99 | 10,0 | 5648 | 8,1 | 162 | 9 | 1162 | 24 | 279 | 592 | 1798 | < 5 | 8 | -16,2 | -118,0 | 2,0 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| F10 | quartzites micaschistes | -210 | 21/10/98 | 10,0 | 2010 | 7,7 | 267 | 43 | 137 | 5 | 216 | 100 | 847 | 1,4 | 8 | | | |
| | | -440/-585 | 29/11/98 | 17,0 | 9698 | 8,0 | 60 | 18 | 2159 | 55 | 478 | 1537 | 2403 | < 2 | 9 | -16,0 | | |
| F33 | cargneules quartzites | -121/-142 | 03/09/99 | 10,0 | 778 | 7,9 | 126 | 22 | 12 | 1 | 137 | 5 | 310 | 0,05 | 3 | -14,4 | -107,8 | 9,0 |
| | | -170 | 23/09/99 | 13,0 | 7256 | 8,1 | 112 | 17 | 1550 | 18 | 283 | 1400 | 1700 | 1,0 | 1 | | | |
| | micaschistes | -393/-427 | 30/01/96 | | | | | | | | | | | | | -15,9 | < 1 | |
| | | -414/-428 | 30/09/99 | 17,2 | 9305 | 8,6 | 43 | 11 | 2110 | 31 | 322 | 2000 | 1800 | 1,0 | 5 | -15,8 | -115,8 | 1,8 |
| | | -460 | 30/01/96 | | | | | | | | | | | | | -15,9 | < 1 | |
| -476/-500 | 25/09/99 | 18,7 | 8496 | 8,6 | 36 | 8 | 1940 | 29 | 422 | 1500 | 1970 | 1,0 | 6 | -15,9 | -117,5 | < 1,6 | | |
| F17 | quartzites micaschistes | -350 | 28/10/99 | 14,0 | 12911 | 8,2 | 196 | 26 | 2931 | 76 | 417 | 2530 | 3054 | < 5 | 7 | -15,6 | -112,0 | < 1 |
| | | -475 | 27/10/99 | 18,0 | 13789 | 8,1 | 197 | 28 | 3066 | 80 | 423 | 2800 | 3162 | < 5 | 9 | -15,5 | -111,7 | < 1 |

(continued)

Tableau 1 (continued)

| Forage n° | Géologie | niveau (m) | Date | T °C | C.E. (µS cm ⁻¹) | pH | Ca (mg l ⁻¹) | Mg (mg l ⁻¹) | Na (mg l ⁻¹) | K (mg l ⁻¹) | HCO ₃ (mg l ⁻¹) | Cl (mg l ⁻¹) | SO ₄ (mg l ⁻¹) | NO ₃ (mg l ⁻¹) | SiO ₂ (mg l ⁻¹) | δ ¹⁸ O ‰ | δ ² H ‰ | ³ H UT |
|-----------|-------------------------|------------|----------|------|-----------------------------|-----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------|--------------------|-------------------|
| F57 | quartzites micaschistes | -84 | 28/08/98 | 8,0 | 655 | 8,1 | 86 | 23 | 1 | 1 | 153 | 2 | 158 | 3,3 | 10 | | | |
| | | -260 | 05/09/98 | 11,0 | 1008 | 7,8 | 149 | 30 | 6 | 3 | 159 | 8 | 383 | 5,7 | 8 | | | |
| | | -470 | 22/09/98 | 16,0 | 2564 | 6,8 | 76 | 10 | 406 | 12 | 161 | 359 | 500 | <1 | 2 | -13,3 | | 9 |
| | | -520 | 21/09/98 | 17,5 | 50948 | 8,6 | 550 | 335 | 12770 | 216 | 177 | 13814 | 7828 | <1 | 7 | | | |
| | | -530 | 22/09/98 | 17,5 | 18071 | 6,7 | 150 | 63 | 2937 | 47 | 152 | 4265 | 2556 | <1 | 3 | -15,2 | | <1 |
| F30 | quartzites et schistes | -290 | 23/09/99 | 10,0 | 1462 | 7,9 | 179 | 38 | 99 | 11 | 210 | 23 | 626 | <0,1 | 8 | | | |
| F30bis | schistes | -225 | 22/09/99 | 9,0 | 2418 | 7,9 | 222 | 25 | 309 | 15 | 318 | 141 | 913 | <0,1 | 8 | -14,6 | -105,5 | <1 |
| F31 | anhydrite | -720 | 27/10/99 | 17,0 | 218200 | 4,9 | 18161 | 4653 | 89223 | 20605 | 8 | 195400 | 490 | <100 | <0,1 | -12,2 | -6,0 | 2 |
| S4 | micaschistes | -150 | 24/03/99 | 15,0 | 685 | 8,2 | 13 | 1 | 159 | 5 | 354 | 40 | 66 | 2,2 | | | | |
| | | -500 | 24/03/99 | 28,2 | 681 | 8,3 | 18 | 2 | 153 | 5 | 365 | 39 | 61 | 4,1 | | | | |

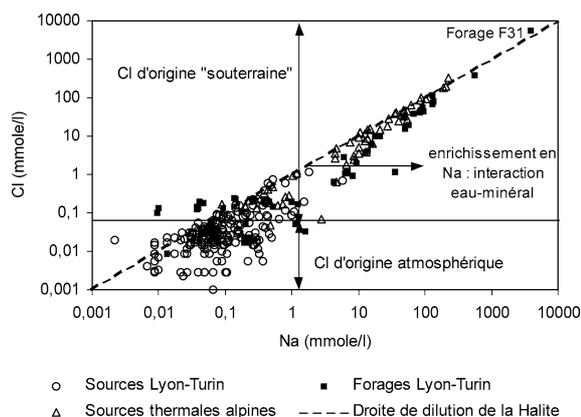


Fig. 2. Relation entre sodium et chlorures des eaux fortement minéralisées circulant dans le socle des Alpes franco-italiennes.

Fig. 2. Sodium chloride relationship in deep and highly mineralised groundwater circulating in the crystalline basement of the French Italian Alps.

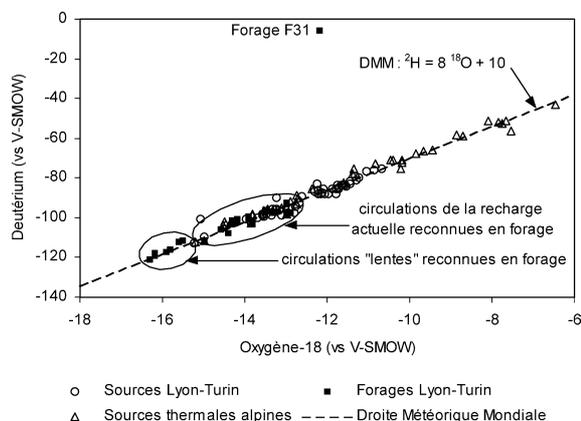
Fig. 3. Relation $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ des eaux fortement minéralisées circulant dans le socle des Alpes franco-italiennes.

Fig. 3. $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ in deep and highly mineralised groundwater circulating in the crystalline basement of the French Italian Alps.

minérale) et une diminution des chlorures par un lessivage lié aux eaux météoriques descendantes.

L'ensemble des eaux superficielles, profondes et thermales se situe sur un diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ le long de la droite des eaux météoriques mondiales (Fig. 3), à l'exception des fluides d'un forage (F31) atteignant une semelle évaporitique. Ces fluides n'ont donc pas subi, durant leur parcours souterrain, de fractionnement isotopique dû aux conditions géothermiques ou à un échange avec des gaz. Le point

(F31) se plaçant en dehors du domaine des eaux « naturelles » correspond aux fluides présentant la conductivité électrique la plus élevée (218 mS cm^{-1}). L'enrichissement en $\delta^2\text{H}$ est dû vraisemblablement à une remobilisation par les eaux météoriques (le point F31 a une teneur en ^3H correspondant à la limite de détection) d'une saumure enrichie en $\delta^2\text{H}$, à la suite d'une hydratation de silicates primaires en système fermé [4]. Par conséquent, les eaux liées des évaporites ne sont pas affectées par le fractionnement isotopique et ne participent qu'au phénomène de dilution [14]. Cet enrichissement est, en effet, un des traits caractéristiques des saumures, comme cela a été mis en évidence dans les zones de bouclier par Frappe et Fritz [11].

Les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ peuvent se regrouper en trois familles, avec des valeurs comprises :

- entre $-7,0$ et $-15,0\text{‰}$ ($n = 96$, $\mu = -12,1$ et $\sigma = 1,9$);
- entre $-13,0$ et $-15,0\text{‰}$ ($n = 28$, $\mu = -13,8$ et $\sigma = 0,7$);
- entre $-15,5$ et $-16,5\text{‰}$ ($n = 8$, $\mu = -15,9$ et $\sigma = 0,3$).

Le premier ensemble comprend toutes les sources considérées. Le second rassemble des écoulements reconnus en forage, et notamment dans la partie supérieure des ouvrages. Le troisième concerne également des venues en forage, mais essentiellement en profondeur, et présente les valeurs les plus négatives.

On constate, en outre, une bonne correspondance entre les teneurs en isotopes stables et celles en tritium pour toutes les eaux interceptées par les forages de reconnaissance [9,24,25]. Les eaux avec des teneurs en tritium supérieures à 9 UT ont des valeurs en $\delta^{18}\text{O}$ plus positives (entre $-13,0$ et $-15,0\text{‰}$), et l'absence de ^3H s'accompagne de valeurs plus négatives (entre $-15,5$ et $-16,5\text{‰}$). Cette absence de tritium dans des eaux rencontrées par les forages et dans celles de certaines sources thermales, ne peut s'expliquer que par une recharge ayant eu lieu durant la période qui succéda au Dernier Maximum Glaciaire (DMG). Le retrait des grands glaciers a mis en jeu d'importantes quantités d'eau, entraînant, par conséquent, une charge hydraulique plus forte dans les aquifères. Ceci a favorisé la circulation des eaux dans les réseaux souterrains jusqu'à une grande profondeur (effet de chasse), met-

tant en mouvement des eaux confinées lors des glaciations, périodes durant lesquelles toute circulation hydrique était très faible ou bloquée [2] par les glaciers, dont la base atteignait une altitude proche de celle des océans actuels [15]. Le niveau de base hydrogéologique, contrôlé par celui des océans de l'époque, était alors à une cote inférieure d'une centaine de mètres par rapport à l'actuel. La longue période d'immobilisation, et donc l'interaction prolongée eau-roches, a permis aux eaux de changer leur patrimoine en sels dissous. De même, les eaux salines immobilisées dans les fractures profondes ont formé des minéraux secondaires en atteignant la saturation vis-à-vis de l'espèce minérale [26]. Lors de la déglaciation, avec la remontée du niveau des océans, la disponibilité hydrique et le niveau de base hydrogéologique ont établi des conditions favorables à une remobilisation des sels évaporitiques.

Ainsi, les eaux rencontrées dans les fractures profondes le long du tracé de la liaison ferroviaire Lyon-Turin témoignent d'une circulation souterraine dans un passé récent, de l'ordre de 10 000 ans. Ces considérations pourraient expliquer les anomalies hydrochimiques relevées dans les massifs cristallins alpins.

Remerciements

Les auteurs remercient le Prof. G. de Marsily pour ses remarques et suggestions scientifiques, ainsi que Mme de Marsily pour ses corrections de la partie du texte en langue anglaise.

Références

- [1] G. Bianchetti, Hydrogéologie et géothermie dans le tunnel du Rawyl, Bull. CHYN Neuchâtel 12 (1993) 87–109.
- [2] B. Blavoux, M. Dray, A. Ferhi, P. Olive, M. Gröning, C. Sonntag, J.-P. Hauquin, G. Pelissier, P. Pouchan, Palaeoclimatic and hydrodynamic approach to the Aquitaine basin deep aquifer (France) by means of environmental isotopes and noble gases, in : Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere, IAEA, Vienne, 1993, pp. 296–306.
- [3] D.J. Bottomley, A. Katz, L.H. Chan, A. Starinsky, M. Douglas, I.D. Clark, K.G. Raven, The origin and evolution of Canadian shield brines: evaporation or freezing of seawater? New lithium isotope and geochemical evidence from the Slave craton, Chem. Geol. 155 (1999) 295–320.

- [4] I.D. Clark, P. Fritz, *Environmental isotopes in hydrogeology*, Lewis Publishers, New York, 1997.
- [5] M. Cruchet, Relations entre l'hydrogéologie, le thermalisme et les circulations d'eaux uranifères dans les roches fissurées. Les massifs cristallins externes de basse Maurienne (Savoie), thèse, université de Grenoble, France, 1983.
- [6] M. Cruchet, Influence de la décompression sur le comportement hydrogéologique des massifs cristallins en basse Maurienne (Savoie, France), *Géol. Alp.* 61 (1985) 65–73.
- [7] J. Dazy, M. Dray, C. Jusserand, M. Pasqualotto, G.-M. Zuppi, Caractérisation isotopique des eaux thermominérales des Alpes du Nord franco-italiennes, in : *Isotope techniques in water resources development*, IAEA, Vienne, 1987, pp. 3–24.
- [8] J. Debelmas, C. Kerkhove, Les Alpes franco-italiennes, *Géol. Alp.* 56–57 (1980) 21–58.
- [9] M. Dray, C. Jusserand, J.-P. Novel, G.-M. Zuppi, Air mass circulation and the isotopic 'shadow effect' in precipitation in the French and Italian Alps, in : *Proc. Int. Symp. on isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere*, IAEA, Vienne, 1998, pp. 107–117.
- [10] F. Ellenberger, Étude géologique du pays de Vanoise (Savoie), *Mém. Serv. Carte géol. France* 50 (1958) 1–561.
- [11] S.K. Frapce, P. Fritz, The chemistry and isotopic composition of saline groundwaters from the Sudbury Basin, Ontario, *Can. J. Earth Sci.* 19 (1982) 645–661.
- [12] P. Fritz, S.K. Frapce (Eds.), *Saline water and gases in crystalline rocks*, GAC Special Paper 33, Geol. Assoc. Canada, Ottawa, 1987.
- [13] D. Grimaud, Étude géochimique et géothermique des eaux thermominérales des Alpes françaises, thèse d'État, université Paris-7, 1987.
- [14] W. Kloppmann, J.-P. Girard, P. Négrel, Exotic stable isotope compositions of saline waters and brines from the crystalline basement, *Chem. Geol.* 184 (2002) 49–70.
- [15] K. Lambeck, Sea-level change through the last glacial cycle: geophysical, glaciological and palaeogeographic consequences, *C. R. Geoscience* 336 (2004) 677–689.
- [16] A.M. Mc Caig, J. Tritlla, D.A. Banks, Fluid mixing and recycling during Pyrenean thrusting: evidence from fluid inclusion halogen ratios, *Geochim. Cosmochim. Acta* 64 (2000) 3395–3412.
- [17] J.-C. Maréchal, Les circulations d'eau dans les massifs cristallins alpins et leurs relations avec les ouvrages souterrains, thèse n°1769, Département de Génie Civil, EPFL, Lausanne, 1998.
- [18] J.-C. Maréchal, Observation des massifs cristallins alpins au travers des ouvrages souterrains. 1. Caractérisation de la conductivité hydraulique à l'échelle du massif, *Hydrogéologie* (1999) 21–32.
- [19] J.-C. Maréchal, D. Etcheverry, The use of ^3H and ^{18}O tracers to characterize water inflows in Alpine tunnels, *Appl. Geochem.* 18 (2003) 339–351.
- [20] G. Mascle, H. Arnaud, G. Dardeau, J. Debelmas, P. Dubois, M. Gidon, P.-C. de Graciansky, C. Kerkhove, M. Lemoine, Halocinèse précoce sur la marge téthysienne alpine : vers une réinterprétation des zones de gypse des Alpes, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 302 (1986) 963–968.
- [21] G. Ménard, R. Sacchi, Coupes géologiques 1:25 000^e. Tunnel de base-solution A, tunnel de Bussoleno-variante nord, Documents Alpetunnel GEIE, Chambéry, France, 1986.
- [22] N. Monin, Caractérisation par sismique de puits d'un aquifère profond. Cas de la zone des aménagements souterrains de Modane (tunnel de base, liaison ferroviaire Lyon-Turin), thèse, université de Savoie, Chambéry, France, 1998.
- [23] NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle), *Berichterstattung über die Untersuchungen der Phase I am potentialen Standort Piz Pian Grand (Gemeinden Mesocco und Rossa, GR)*, Technischer Bericht, Wettingen, 1988, pp. 89–129.
- [24] J.-P. Novel, G.-M. Zuppi, Hydrogéologie et géochimie isotopique des circulations souterraines profondes des tunnels de base et de Bussoleno (future liaison ferroviaire Lyon-Turin), Rapport final, Documents Alpetunnel GEIE, Chambéry, France, 2000, 95 p.
- [25] J.-P. Novel, G.-M. Zuppi, M. Dray, S. Fudral, G. Nicoud, P. Lacombe, Mineralised waters and deep circulations in the French-Italian Alps, in : *Proc. 10th Int. Symp. on Water-Rock Interaction, WRI-10*, A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, 2001, pp. 569–571.
- [26] E. Sacchi, A. Dematteis, P.G. Rossetti, Past and present circulation of CO_2 -bearing fluids in the crystalline Gran Paradiso Massif (Orco Valley, North-western Italian Alps): tectonic and geochemical constraints, *Appl. Geochem.* 19 (2004) 395–412.
- [27] S. Savoye, J.-F. Aranyosy, C. Beaucaire, M. Cathelineau, D. Louvat, J.-L. Michelot, Fluid inclusions in granites and their relationships with present-day groundwater chemistry, *Eur. J. Mineral.* 10 (1998) 1215–1226.
- [28] F.D. Vuataz, Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes, *Matériaux pour la géologie de la Suisse, Hydrologie* 29 (1982).