

Approche hydrogéochimique et structurale des circulations dans un réservoir du domaine alpin (massif d'Allevard, France)

Hydrogeochemical and structural investigations of groundwater flows in an alpin reservoir (massif of Allevard, France)

J. Dazy and M. Razack

Volume 2, Number 2, 1989

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705027ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705027ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Dazy, J. & Razack, M. (1989). Approche hydrogéochimique et structurale des circulations dans un réservoir du domaine alpin (massif d'Allevard, France). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 2(2), 153–181. <https://doi.org/10.7202/705027ar>

Article abstract

Investigations of the hydrogeochemical and structural characteristics of groundwater flows in an Alpine hydrothermal reservoir (Allevard Massif, French Western Alps) are carried out in order to define the origin and genesis of thermal and mineral waters.

The geological formations constituting the Allevard Massif consist of a Hercynian basement and a continuous sedimentary cover from Carboniferous to Middle Jurassic. The basement is composed mainly of micaschists, the sedimentary cover of Paleozoic clastic deposits: Triassic formations (evaporites, dolomites, limestones); Liassic calcareous marls, schistics marls and Limestones. A groundwater outlet (Allevard Spring) from this reservoir is located in the calcareous terrains of Lias.

The basement-cover contact is a major N40 subvertical fault. Faulting tectonics and subsequent rock fracturing is important for the hydrogeology of the area under study since the geological formations are initially impermeable (except for the Triassic terrains). Observations of underground galleries in the neighbourhood of the spring showed the presence of water outflows located on N40 strike-slip faults affecting both the basement and the Liassic terrains. The role of faulting tectonics in groundwater occurrence is indeed clearly emphasized by the position of the Allevard Spring at the intersection of two major faults with N60 and N140 trends.

Available data cover nearly a hundred years (1888-1930) and emphasize the great variability of the chemical features of the spring water. This is related to the fact that the water outflowing from the spring is a mixture in varying proportions of waters from different sources. Combined interpretation of the structural characteristics, isotopic (^3H ; ^{18}O ; ^2H ; ^{34}S) and chemico-physical (major and trace elements, gases, temperature, ...) data provides the basis of a working assumption on a flow and mixing model in which three different hydrogeological subsystems were distinguished: a surface subsystem comprising cold infiltration waters of a bicarbonate-calcium and a sulfate-calcium type; a subsurface subsystem constituted by the fissured Liassic calcareous terrains comprising part of the infiltrated waters which intermingle with much warmer waters of a sodium-chloride type originating from a subsystem located at a great depth. By means of geochemical indicators, a depth of nearly 4000 m has been estimated.

Such a model, in agreement with geological evidence and reported by some recent works showing that halite deposits are probable at great depths, could be generalized to other hydrothermal systems occurring within the framework of the French Western Alps in a comparable structural context (thrust front of the external metamorphic massifs; "Briançonnais" thrust front).

Approche hydrogéochimique et structurale des circulations dans un réservoir du domaine alpin (massif d'Alleverd, France)

Hydrogeochemical and structural investigations of groundwater flows in an alpin reservoir (massif of Alleverd, France)

§J. DAZY (1), M. RAZACK (2)

RÉSUMÉ

Les caractéristiques hydrogéochimiques des réservoirs profonds du domaine alpin occidental sont abordées par le biais du système hydrominéral d'Alleverd (France). Le volume des données et la variabilité des caractéristiques qui en découle, permettent de considérer cette source comme un exemple représentatif des sources thermominérales du domaine alpin occidental. L'étude combinée de ces données relatives à l'hydrochimie, à la géochimie isotopique, à la présence de gaz et d'éléments traces, confrontées au contexte fissural et structural des réservoirs, permet une approche cohérente des circulations profondes.

On propose en conclusion un modèle qui pourrait être généralisé aux systèmes thermominéraux situés dans un contexte structural comparable (front de chevauchement des massifs cristallins externes ; front de chevauchement Briançonnais) et présentant un faciès semblable (eaux chloro-sulfatées). Ce modèle tient compte de mélanges entre eaux d'origine superficielle et/ou semi-profondes et d'eaux d'origine profonde.

(1) Laboratoire d'Hydrogéologie, Institut Dolomieu, 15 rue M. Gignoux, Université J. Fourier, 38031 Grenoble Cédex, FRANCE.

(2) Laboratoire d'Hydrogéologie, Université des Sciences et Techniques, Place E. Bataillon, 34060 Montpellier Cédex, FRANCE.

SUMMARY

Investigations of the hydrogeochemical and structural characteristics of groundwater flows in an Alpine hydrothermal reservoir (Allevard Massif, French Western Alps) are carried out in order to define the origin and genesis of thermal and mineral waters.

The geological formations constituting the Allevard Massif consist of a Hercynian basement and a continuous sedimentary cover from Carboniferous to Middle Jurassic. The basement is composed mainly of micaschists, the sedimentary cover of Paleozoic clastic deposits : Triassic formations (evaporites, dolomites, limestones) ; Liassic calcareous marls, schistics marls and limestones. A groundwater outlet (Allevard Spring) from this reservoir is located in the calcareous terrains of Lias.

The basement-cover contact is a major N40 subvertical fault. Faulting tectonics and subsequent rock fracturing is important for the hydrogeology of the area under study since the geological formations are initially impermeable (except for the Triassic terrains). Observations of underground galleries in the neighbourhood of the spring showed the presence of water outflows located on N40 strike-slip faults affecting both the basement and the Liassic terrains. The role of faulting tectonics in groundwater occurrence is indeed clearly emphasized by the position of the Allevard Spring at the intersection of two major faults with N60 and N140 trends.

Available data cover nearly a hundred years (1888-1980) and emphasize the great variability of the chemical features of the spring water. This is related to the fact that the water outflowing from the spring is a mixture in varying proportions of waters from different sources. Combined interpretation of the structural characteristics, isotopical (^3H ; ^{18}O ; ^2H ; ^{34}S) and chemico-physical (major and trace elements, gases, temperature, ...) data provides the basis of a working assumption on a flow and mixing model in which three different hydrogeological subsystems were distinguished : a surface subsystem comprising cold infiltration waters of a bicarbonate-calcium and a sulfate-calcium type ; a subsurface subsystem constituted by the fissured Liassic calcareous terrains comprising part of the infiltrated waters which intermingle with much warmer waters of a sodium-chloride type originating from a subsystem located at a great depth. By means of geochemical indicators, a depth of nearly 4000 m has been estimated.

Such a model, in agreement with geological evidence and reported by some recent works showing that halite deposits are probable at great depths, could be generalized to other hydrothermal systems occurring within the framework of the French Western Alps in a comparable structural context (thrust front of the external metamorphic massifs ; "Briançonnais" thrust front).

1 - INTRODUCTION

La caractérisation des circulations profondes, du fait de la complexité des facteurs intervenant sur leur minéralisation, leur condition d'émergence, leur origine, etc., repose sur l'acquisition et l'interprétation de nombreux paramètres. Dans cette note, ce problème est abordé par l'étude d'un gisement hydrominéral du domaine alpin. Une des principales méthodes de l'approche du circuit thermal est l'outil hydrogéochimique, qui fait appel aux techniques de l'hydrochimie et de la géochimie isotopique appliquée à la fois sur l'eau et les gaz associés. Toutefois, pour proposer une hypothèse hydrogéologique acceptable sur l'origine de l'eau, il convient de tenir compte d'un certain nombre de facteurs d'ordre structural, hydrodynamique, chimique et même biochimique.

Cependant un certain nombre d'émergences thermominérales, en particulier dans le domaine alpin, sont souvent des mélanges d'eaux issues de réservoirs différents : eaux provenant de réservoirs profonds et ayant acquis leurs caractéristiques au contact de terrains différents, eaux de réservoirs semi-profonds et eaux d'origine superficielle. Il en résulte que leur étude est confrontée à une grande variabilité des paramètres tels que température, conductivité, teneurs en éléments spécifiques (en particulier les chlorures), nature des gaz associés... Cette variabilité des paramètres s'avère d'autant plus marquée que la période d'observation est importante. Ce problème complexe de l'origine des eaux profondes est bien mis en évidence par l'exemple du système hydrothermal d'Allevard (Alpes occidentales françaises - figure 1) sur lequel des données s'étendant sur une période d'une centaine d'années ont été recueillies. Dans l'approche développée dans cette note, ces données font l'objet d'une interprétation dans le but de caractériser les différents réservoirs jouant un rôle dans la minéralisation des eaux.

2 - GÉOLOGIE RÉGIONALE

Elle est bien connue grâce à plusieurs études récentes (BARFETY *et al.*, 1972 ; DUCROS, 1974) et par des observations effectuées lors du creusement des galeries E.D.F. (Electricité de France) traversant le massif d'Allevard perpendiculairement aux structures (figure 2).

Le socle

Il est constitué dans le massif d'Allevard par des micaschistes et leptynites, (BORDET, 1961). On y trouve des gîtes minéralisés d'origine hydrothermale coïncidant souvent avec des zones intensément fracturées. Ces gîtes minéralisés forment un réseau encaissé dans les micaschistes et se présentent en filons verticaux ou fortement pentés vers le S.E. ; leur épaisseur à l'affleurement oscille entre 2 et 10 m.

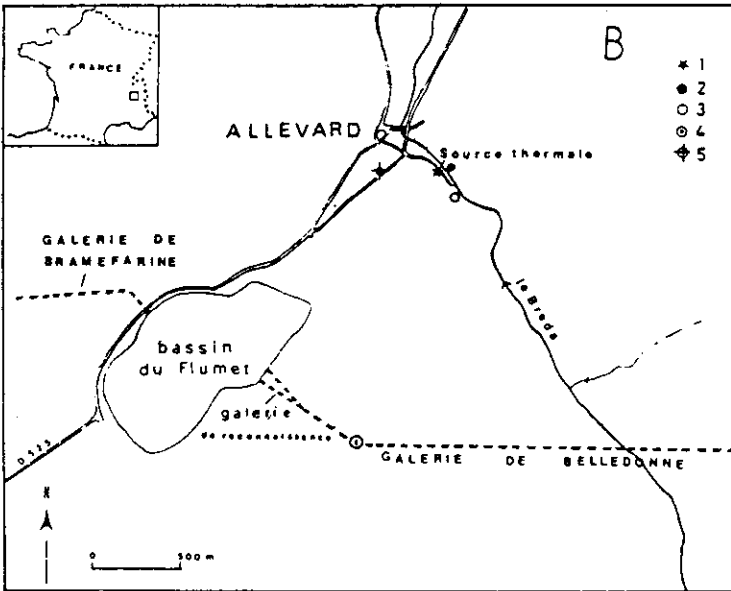
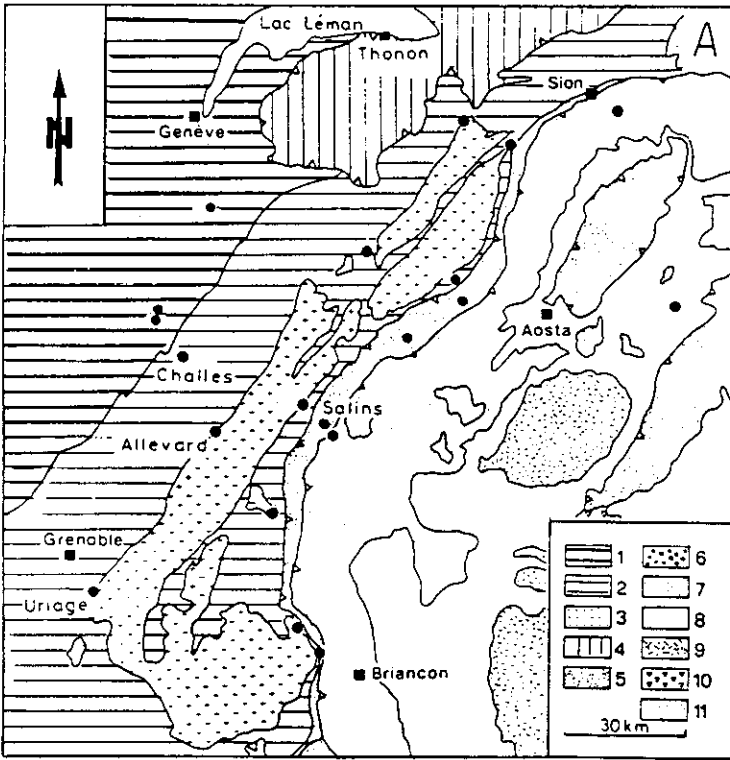


Figure 1.- Situation de la source thermominérale d'Allevard.

Figure 1.- Location of the Allevard thermal spring.

- A : Cadre structural des principales sources thermominérales des Alpes Occidentales (complétée d'après DEBELMAS et KHERKHOVE, 1980).
- 1 : Zone péri-alpine (couverture sédimentaire mésozoïque) ;
 - 2 : Zone dauphinoise (ou externe) ;
 - 3 : Socle cristallin anté-triasique (massifs externes) ;
 - 4 : Préalpes, (para-autochtone ultrahelvétique) ;
 - 5 : Unités penniques frontales (zones sub- briançonnaise et valaisane) ;
 - 6 : Nappe de l'Embrunais-Ubaye ;
 - 7 : Zone briançonnaise ;
 - 8 : Zone piémontaise ;
 - 9 : Socle cristallin (massifs internes) ;
 - 10 : Massif de Lanzo ;
 - 11 : Zone Sezia et système Dent Blanche s.l.
- B : Situation géographique avec :
- 1 : Source thermale d'Allevard ;
 - 2 : Source Rive Droite ;
 - 3 : Source Tuffeuse ;
 - 4 : Venue d'eau en galerie au PM670 ;
 - 5 : Forage Austerlitz (150 m).
- A : Structural setting of the main thermal springs in the Western Alps (completed after DEBELMAS and KHERKHOVE, 1980).
- 1 : Peri-Alpine zone (mesozoic cover) ;
 - 2 : External zone ;
 - 3 : Ante-Triassic metamorphic basement ;
 - 4 : Préalpes ;
 - 5 : Front units (pennic zone) ;
 - 6 : Nappe of Embrunais-Ubaye ;
 - 7 : Briançon zone ;
 - 8 : Piémont zone ;
 - 9 : Metamorphic basement (Internal Massifs) ;
 - 10 : Lanzo massif ;
 - 11 : Dent Blanche zone.
- B : Geographical setting with :
- 1 : Thermal spring of Allevard ;
 - 2 : "Rive Droite" mineral spring ;
 - 3 : Tuffaceous spring ;
 - 4 : Water inflow n° PM670 in drift ;
 - 5 : Austerlitz well (150 m depth).

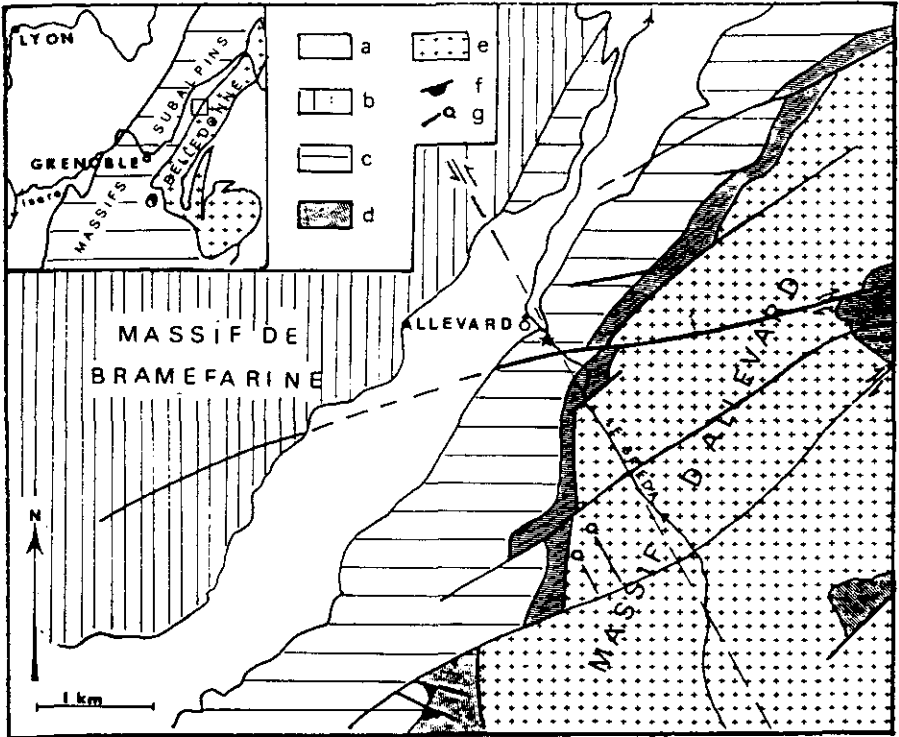


Figure 2.- Situation géologique de la source d'Allevard (d'après la Carte Géologique de France, au 1/50000°).

Figure 2.- Geological setting of the Allevard spring (after the Geological Map of France, at 1/50000°).

a : Quaternaire ; b : Bajocien ; c : Lias ; d : Trias ;
e : Socle hercynien ; f : Spilite du Trias ; g : Filon de quartz.

a : Quaternary ; b : Bajocian ; c : Lias ; d : Trias ;
e : Hercynian basement ; f : Spilite (Trias) ; g : Veins of quartz.

La série sédimentaire

Le Paléozoïque, est représenté par des formations détritiques attribuées au Carbonifère et au Permien (Grès d'Allevard). Le Carbonifère est constitué, dans la vallée du Haut-Bréda, de grès, de schistes noirs et de passées conglomératiques ou péliques. Ces formations n'affleurent pas dans les environs immédiats d'Allevard et n'ont pas été rencontrées dans les travaux souterrains. Les grès d'Allevard (Autuno-Permien) constituent une formation épaisse de 100 m de grès phylliteux ou feldspathiques et de pélites.

Le Mésozoïque. Il est parfois légèrement discordant sur les formations précédentes. Le Trias est très mal représenté en affleurement par des pointements de cargneules ou de dolomies recristallisées. Les

observations en galeries et dans les gorges du Bréda ont permis de reconnaître un ensemble de 200 m environ d'épaisseur, constitué de niveaux évaporitiques (anhydrite et gypse) alternant avec des dolomies grises et de calcaires noirs. Des laves spilitiques (40 m) s'intercalent dans cet ensemble sédimentaire. Le Lias forme une bande continue le long du massif de Belledonne, de l'ordre de 400 m d'épaisseur. On distingue trois ensembles : des calcaires marneux (Lias calcaire), des marno-calcaires (Domerien-Toarcién) et des marnes schisteuses (Lias schisteux). La source d'Allevard émerge dans le Lias calcaire. Le Dogger : dans le secteur d'Allevard, la série sédimentaire se termine par une épaisse formation argilo-calcaire attribuée au Bajocien (Massif de Bramefarine).

Les formations superficielles

Le recouvrement quaternaire est très important sur toute la bordure occidentale du massif de Belledonne. Dans le secteur d'Allevard, on observe des dépôts glaciaires (moraines wurmiennes du glacier de l'Isère), et des alluvions fluviatiles qui tapissent la cuvette d'Allevard et la vallée du Bréda. Enfin l'importance des produits d'altération masque presque totalement les micaschistes du socle, gênant considérablement l'observation de la fissuration sur photographies aériennes.

3 - CONTEXTE STRUCTURAL - RÔLE DE LA TECTONIQUE CASSANTE

Situé sur la bordure occidentale du Massif cristallin de Belledonne, le massif d'Allevard est formé d'un socle hercynien d'une part et d'une couverture sédimentaire d'autre part. La couverture sédimentaire, continue du Carbonifère au Dogger et à pendage Ouest, est en contact avec le socle hercynien par un accident majeur subvertical de direction N50. Dans le secteur considéré, la relation socle-couverture est complexe : en surface, le socle chevauche la couverture ; par contre en galerie la série sédimentaire repose en position normale. Compte tenu du caractère généralement imperméable des formations géologiques décrites précédemment (exception faite des évaporites triasiques), seule l'existence d'un réseau de fractures ouvertes, de failles ou de discontinuités géologiques permet la circulation d'eau au sein du Massif d'Allevard. Les observations en galeries ont permis en effet de mettre en évidence des venues d'eau sur des fractures décrochantes orientées essentiellement N60, tant au sein des micaschistes du socle que dans la série liasique de couverture (FRANÇOIS et MASSONNAT, 1981-82). Des venues d'eau ont également été observées dans les zones broyées formant contact entre les spilités et les évaporites (PM 670) et non au sein des couches d'anhydrite pourtant solubles. Quant au Permien (Grès d'Allevard), il s'est révélé remarquablement sec en galeries.

Ce cadre structural, où la tectonique cassante joue un rôle essentiel, est bien illustré par la position de la source d'Allevard (figure 3). En effet, celle-ci émerge à l'intersection de 2 grands accidents. L'un majeur d'orientation submeridienne à N140, décelable seulement à petite échelle, correspond à l'axe de la vallée du Bréda

sous laquelle les travaux souterrains ont rencontré de nombreuses zones broyées. L'autre, de direction N60 (faille d'Allevard) observable légèrement en amont de l'établissement thermal, appartient à une famille de fractures d'orientation N60, découpant le massif de Belledonne obliquement par rapport aux structures (Sarrot-Reynaud, 1965). Dans le contexte sismotectonique actuel des Alpes françaises, ces accidents correspondent à des décrochements respectivement sénestres et dextres (WEBER *et al.*, 1980). Des analyses structuro-thermales effectuées à l'échelle du domaine alpin (GRILLOT et DAZY, 1983) ont montré l'existence d'un lien entre tectonique cassante actuelle et thermalisme mettant en évidence une certaine cohérence entre la répartition spatiale des émergences thermominérales et la fracturation du socle.

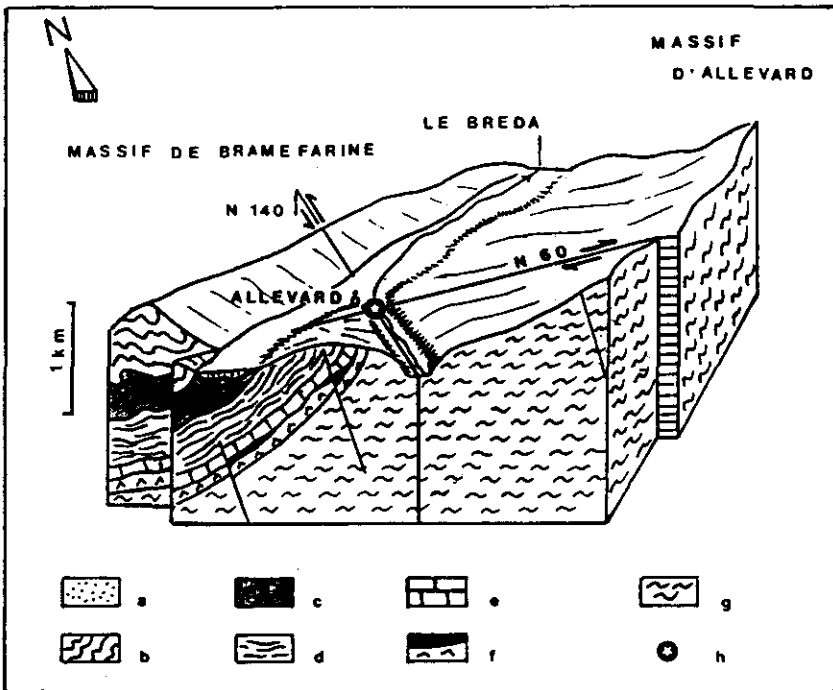


Figure 3.- Bloc diagramme structural du système d'Allevard.

Figure 3.- Structural bloc diagram of the Allevard system.

a : Quaternaire ; b : Bajocien ; c : Alénien ; d : Lias marno-calcaire ;
e : Lias calcaire ; f : Trias (évaporites et spilites) ; g : Socle
(micaschistes) ; h : Source d'Allevard.

a : Quaternary ; b : Bajocian ; c : Alénien ; d : Marly-calcareous
Lias ; e : Limestone Lias ; f : Trias (evaporites and spilites) ;
g : Basement (micaschists) ; h : Allevard thermal spring.

4 - CARACTÉRISTIQUES DES EAUX DU MASSIF D'ALLEVARD

Sur le tableau 1 figurent les analyses représentatives des eaux issues des différentes formations du Massif d'Allevard. Sur la figure 4 (diagramme de Piper) a été reporté l'ensemble des analyses répertoriées dans les diverses études réalisées sur les eaux de la bordure occidentale du Massif de Belledonne.

Eaux des micaschistes. Elles sont peu minéralisées et à faciès bicarbonaté calcique en surface. En semi-profondeur (observations en galeries), elles présentent un faciès bicarbonaté sodique par suite de phénomènes d'échanges de bases liés à une circulation plus lente. La participation éventuelle de telles eaux à la minéralisation des eaux d'Allevard pourrait expliquer le déséquilibre chloro-alcalin ($Cl^- < Na^+$) observé.

Eaux des terrains triasiques. Elles sont sulfatées calciques avec un rapport $SO_4/Cl > 100$. La minéralisation des eaux semi-profondes (galeries) est comparable à celle des eaux de surface (Source tuffeuse). Les teneurs en éléments traces, pratiquement nulles pour les eaux de surface, sont légèrement plus élevées dans les eaux semi-profondes (PK 670)* tout en restant largement inférieures à celles des eaux d'Allevard et d'Uriage. Les teneurs en tritium relevées sur le PK 670 ($59 < {}^3H < 87$ UT), attestent d'une eau d'infiltration récente.

Eaux des terrains liasiques : exception faite des eaux de surface (Source Tartas) à faciès bicarbonaté-calcique, les venues d'eau en galerie sont sulfatées calciques. Toutefois, les concentrations en sulfates sont toujours inférieures à celles relevées sur les eaux des terrains triasiques traduisant un envahissement par des eaux lessivant les évaporites du Trias. Les teneurs en chlorure restent très faibles ($Cl^- < 5 \text{ mg.l}^{-1}$). Les teneurs en tritium sont élevées (69 UT) et du même ordre que pour les eaux superficielles.

Cas des eaux anormales. Certaines analyses de venues d'eau en galeries, tant dans le Trias (PM 681)** que dans le Lias (PM 522 à 535) ont montré des eaux fortement minéralisées notamment en Cl^- et K^+ ($60 < K^+ < 141 \text{ mg.l}^{-1}$) qui pouvaient faire penser à des circulations aux caractéristiques chimiques voisines de celles de la Source d'Allevard. L'examen de ces analyses révèle en fait qu'il s'agit d'eaux contaminées par l'injection, pendant les travaux de creusement de la galerie, d'un ciment à base de chaux et à forte proportion de KCl.

Eaux du Lias profond. Le forage Austerlitz, implanté à proximité de l'émergence d'Allevard, capte ces eaux à 150 m de profondeur dans le Lias. La composition chimique de ces eaux ($Cl^- > 500 \text{ mg.l}^{-1}$) montre un faciès identique à celui d'Allevard (eau sulfatée sodique). Par rapport aux eaux précédentes, leur minéralisation se rapproche de celle de la source d'Uriage (source émergeant dans le même contexte géologique que

* Point localisé à partir de l'entrée de la galerie de Belledonne (distance en mètres).

** Point localisé à partir de l'entrée de la galerie d'Allevard (distance en mètres).

Tableau 1.- Composition chimique des eaux du massif d'Allevard.

Table 1.- Chemical composition of waters from the Massif of Allevard.

	z	t °C	Q	res.	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	OH ⁻	SiO ₂	H ₂ S	date	réf.
A 1	467	--	--	1 020	7,9	6,9	0,8	23,4	224,8	2,0	560	109,8	0,0	6,0	0,0	11.73	(1)
A 2	467	--	--	4 759	7,6	1,8	0,8	5,9	33,0	1,0	83	43,0	0,0	3,6	0,0	11.77	(1)
B 3	920	7,0	60,0	2 618	8,0	5,0	2,8	3,4	59,1	2,4	0	197,7	0,0	--	0,0	05.80	(2)
B 4	490	14,3	60,0	1 215	7,5	14,7	1,5	41,8	102,2	2,0	298	180,6	0,0	--	0,0	11.79	(2)
B 5	490	16,0	65,4	1 330	7,3	4,0	1,0	33,0	140,0	2,0	197	330,0	0,0	9,5	0,0	4.57	(1)
B 6	490	13,7	0,8	727	7,4	3,4	1,4	51,2	252,0	2,4	580	293,0	0,0	10,0	0,0	11.78	(3)
B 7	490	16,8	19,8	535	11,2	141,0	115,0	5,0	213,0	370,0	436	33,0	25,0	13,0	16,2	06.57	(1)
B 8	490	17,0	60,0	642	11,2	132,0	95,0	7,0	208,0	275,0	414	61,0	31,5	11,0	2,8	06.57	(1)
B 9	500	10,6	180,0	492	7,2	24,2	8,8	74,1	517,0	1,5	1 400	167,1	0,0	6,0	0,0	10.79	(2)
B 10	490	17,1	300,0	623	7,3	20,0	1,2	45,5	359,0	4,4	900	276,0	0,0	13,0	0,0	11.78	(3)
B 11	490	18,0	--	507	7,2	32,0	3,0	54,0	490,0	11,0	1 233	238,0	0,0	11,5	0,0	07.57	(1)
B 12	490	16,9	1,5	2 654	--	65,5	6,0	11,4	23,2	1,7	13	252,5	0,0	--	0,0	11.79	(2)
B 13	490	15,0	1,0	2 141	--	144,9	8,0	2,7	8,6	5,5	23	285,0	0,0	--	0,0	11.78	(2)
B 14	490	15,1	2,0	2 266		155,2	12,0	0,5	8,4	4,9	14	306,2	0,0	--	0,0	05.79	(2)
C 15	468	17,7	54,0	365	7,0	450,0	7,0	67,0	217,0	480,0	777	451,0	0,0	13,0	27,8	05.57	(1)
C 16	466	10,2	0,5	925	7,2	99,0	2,0	31,0	125,0	107,0	312	238,0	0,0	7,0	3,5	03.57	(1)
C 17	470	16,7	10,0	340	7,0	498,9	8,6	102,0	236,0	567,3	1 077	353,6	0,0	22,2	25,8	03.84	(4)
D 18	422	27,0	250,0	61	6,6	3 600,0	51,0	118,0	469,0	4 295,0	2 720	408,0	0,0	28,0	13,8	12.77	(3)

A : Eaux de surface (rivière Bréda à Allevard).

B : Eaux semi-profondes (B3 à B6 ; Eaux du Lias ; B7 à B8 : Eaux anormalement minéralisées ; B9 à B11 : Eaux du Trias ; B12 à B14 : Eaux des micaschistes).

C : Eaux d'origine profonde.

D : Source d'Uriage (massif de Belledonne).

B3 : Source Tartas ; B4 : PK 260 ; B5 : PM 467 ; B6 : PK 550 ; B7 : PM 528,6 ; B8 : PM 532,7 ; B9 : Source tuffeuse ; B10 : PK 670 ; B11 : PK 709 ; B12 : PK 1 645 ; B13 : 2 055 ; B14 : PK 2 150 ; C15 : Source d'Allevard ; C16 : Source rive droite ; C17 : Forage Austerlitz.

PM : Venues d'eau dans la galerie d'Allevard ; PK : Venues d'eau dans la galerie de Belledonne ; z : Altitude (m) ; Q : Débit ($l.mn^{-1}$) ; res. : résistivité (ohm.cm à 18 °C) ; Concentrations en $mg.l^{-1}$; réf. : Références avec : 1 : Rapports EDF ; 2 : MASSONAT (1981) ; 3 : DAZY (1982) ; 4 : LEMAHIEU (1985).

A : Surface waters (Bréda river at Allevard).

B : Subterraneous waters (B3 to B6 : Waters from Lias ; B7 and B8 : Contaminated waters in Lias formations ; B9 to B11 : Waters from Trias (anhydrite) ; B12 to B14 : Waters from micaschists).

C : Deep origin waters.

D : Uriage thermomineral spring (massif of Belledonne).

B3 : Tartas spring ; B4 : PK 260 ; B5 : PM 467 ; B6 : PK 550 ; B7 : PM 528,6 ; B8 : PM 532,7 ; B9 : Tuffeous spring ; B10 : PK 670 ; B11 : PK 709 ; B12 : PK 1 645 ; B13 : 2 055 ; B14 : PK 2 150 ; C15 : Spring of Allevard ; C16 : "Rive droite" spring ; C17 : Austerlitz borehole.

PM : Water outlets in the Allevard drift ; PK : Water outlets in the Belledonne drift ; z : altitude (m) ; Q : Discharge ($l.mn^{-1}$) ; res. : Electrical resistivity (ohm-cm at 18 °C) ; concentrations in $mg.l^{-1}$; réf. : References with : 1 : EDF reports ; 2 : MASSONAT (1981) ; 3 : DAZY (1982) ; 4 : LEMAHIEU (1985).

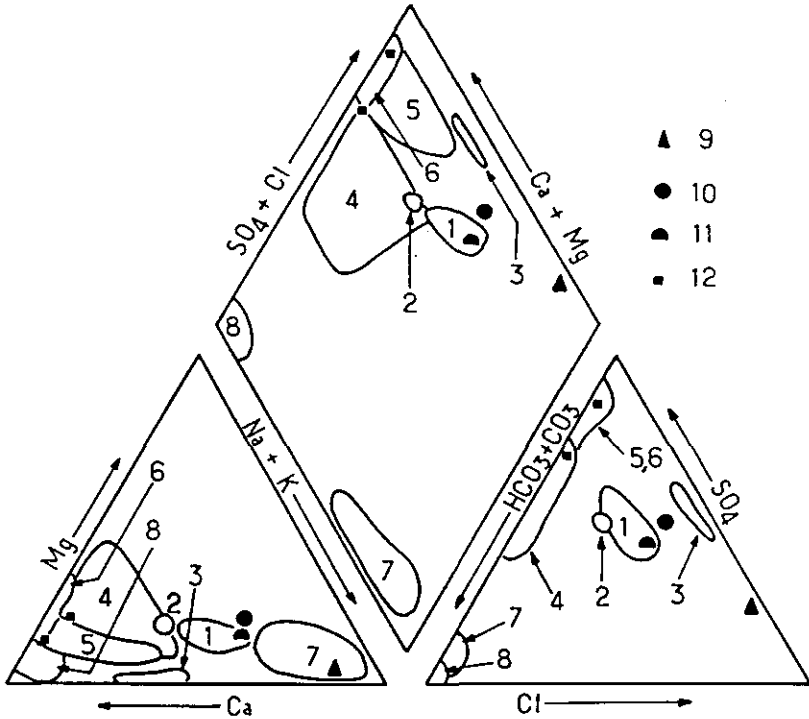


Figure 4.- Représentation graphique des caractéristiques chimiques des eaux du Massif d'Allevard.

Figure 4.- Trilinear diagram showing the chemical characteristics of Allevard Massif groundwaters.

1 : Source thermale d'Allevard ; 2 : Source "Rive Droite" ;
 3 : Venues d'eau "anormales" en galeries (Lias) ;
 4 : Venues d'eau en galeries (Lias) ; 5 : Venues d'eau en galeries (Trias) ; 6 : Sources superficielles (Trias) ; 7 : Venues d'eau en galeries dans les Micaschistes (socle) ; 8 : Sources superficielles (Lias) ; 9 : Source d'Uriage ; 10 : Forage "Austerlitz" ;
 11 : Echantillon à minéralisation maximum ; 12 : Rivière Bréda.

1 : Allevard thermal spring ; 2 : "Rive Droite" spring ; 3 : contaminated waters outlets in drifts (Lias) ; 4 : Water outlets in drifts (Lias) ; 5 : Water outlets in drift (Trias) ; 6 : Surface springs located in Trias ; 7 : Water outlets in the micaschists basement ; 8 : Surface springs (Lias) ; 9 : Uriage spring ; 10 : "Austerlitz" well ; 11 : The most mineralized sample ; 12 : Breda river.

la source d'Allevard), caractérisée par une forte teneur en chlorures ($4\ 000\ \text{mg.l}^{-1} < \text{Cl}^- < 5\ 000\ \text{mg.l}^{-1}$), une température élevée et l'absence de tritium... Ces caractéristiques sont reconnues comme celles d'eaux d'origine profonde (WHITE *et al.*, 1983 ; CHEBOTAREV, 1955).

5 - LE SYSTÈME THERMOMINÉRAL D'ALLEVARD

Travaux antérieurs

La source d'Allevard-les-Bains (Isère) émerge à 468 m d'altitude en rive gauche de la rivière du Bréda, affluent de l'Isère, au lieu-dit le Bout du Monde (fig.1). Il s'agit d'une eau sulfurée (H_2S) légèrement thermale (15 à 17 °C) de type sulfaté sodique.

Jusqu'à la fin du XVIII^è siècle, des venues d'eau minéralisée ne se manifestaient que par des suintements accompagnés de dépôts boueux et noirâtres. La tradition rapporte qu'à la suite du tremblement de terre de 1791, une source jaillit, dont l'eau noirâtre avait la réputation d'être curative. En 1834, des travaux de captage furent entrepris : partant du Bréda une galerie fut creusée dans le rocher, collectant les filets minéralisés jusqu'à un puits de captage. En 1838, fut construit un établissement thermal sur les lieux mêmes de la source, désignée depuis lors sous le nom de "source du Bout du Monde". L'établissement reçoit actuellement 11 000 curistes par saison pour le traitement des voies respiratoires. Au cours des vingt dernières années, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau ayant montré une sensible détérioration, un nouveau captage fut réalisé en 1983. Désigné sous le nom de Source Austerlitz, il s'agit d'un forage de 150 m, implanté dans le Lias (LEMAHIEU, 1985).

Depuis son apparition, la source d'Allevard a fait l'objet de nombreuses études pour préciser son origine et sa minéralisation particulière (URBAIN *et al.*, 1930 ; d'ARSONVAL *et al.*, 1924). A partir de 1956, dans le cadre du projet d'aménagement hydroélectrique Arc-Isère, plusieurs travaux souterrains furent réalisés par E.D.F. dans un secteur proche de la source) : creusement de la galerie d'Allevard de 1 km de longueur ; de la galerie de Belledonne et aménagement du Bassin du Flumet (lac tampon recevant les eaux de la galerie) ; de la galerie de Bramefarine. Du fait de leur incidence éventuelle sur la source, E.D.F. a réalisé 2 campagnes de mesures et d'analyses : l'une entre 1956 et 1958 ; l'autre entre 1972 et 1977 (EDF, 1964 ; 1973 ; MASSONNAT, 1981).

Enfin toutes ces études furent complétées durant ces dernières années par des analyses isotopiques (3H , ^{18}O , 2H et ^{34}S) et des analyses d'éléments traces (DAZY *et al.*, 1980).

Conditions hydrodynamiques

La source d'Allevard est captée en bordure immédiate du Bréda par un puits profond de 5,70 m (fig.5). L'eau minérale est pompée avec un débit maximum fixé par le service des Mines à $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. En absence de pompage dans le puits, le niveau piézométrique dans celui-ci est plus élevé que celui du torrent de 1,5 m environ. L'existence de relations entre le niveau piézométrique dans le puits et le niveau du Bréda ont été mises en évidence à partir de relevés quotidiens (fig.6). Ces relations s'effectuent par l'intermédiaire de la petite nappe alluviale (largeur moyenne de 20 m). Généralement la rivière draine la nappe alluviale. Par contre, on observe une inversion du gradient hydraulique en période de très hautes eaux ou lors de pompages provoquant de forts rabattements dans le puits. Ces conditions donnent lieu à un écoulement de la nappe alluviale vers le puits.

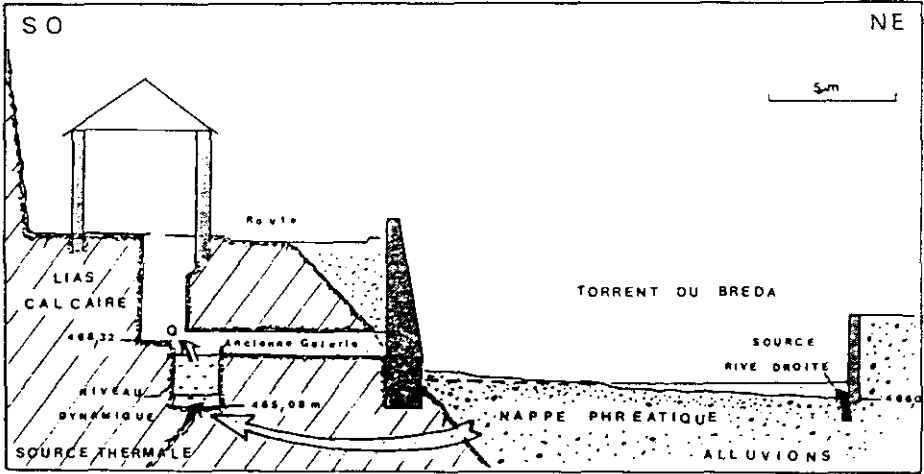


Figure 5.- Coupe schématique montrant les conditions d'émergence de la source d'Allevard.

Figure 5.- Simplified cross-section showing the outlet conditions of Allevard Spring.

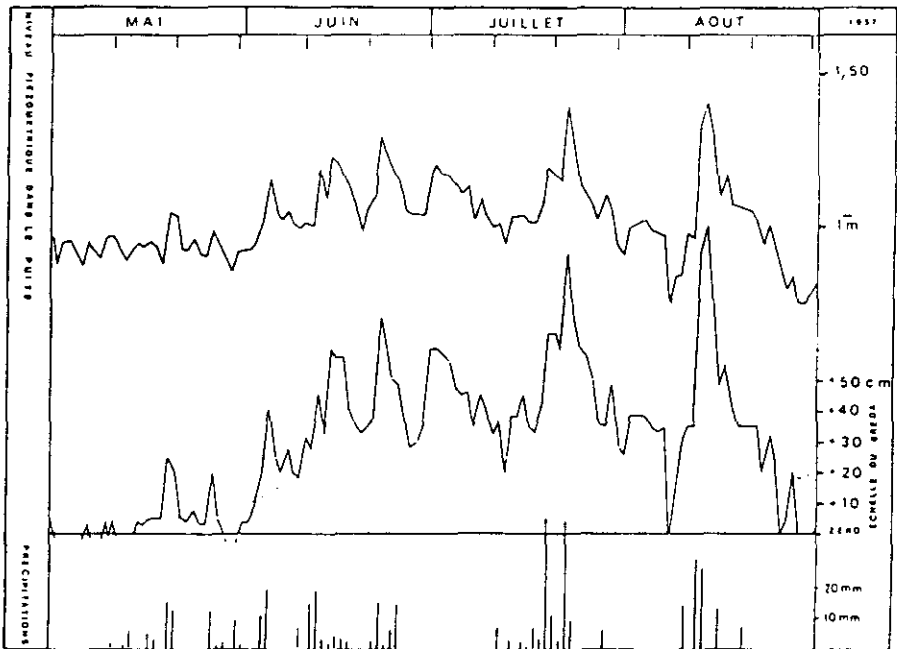


Figure 6.- Variations de niveau enregistrées sur la source d'Allevard et sur le Bréda en fonction des précipitations.

Figure 6.- Variations of water-level recorded on the Allevard spring and on the Bréda River in connection with precipitations.

Les essais réalisés par E.D.F entre 1956 et 1958 ont mis aussi en évidence une liaison hydraulique entre le puits thermal et une petite émergence non captée, située sur la rive droite du Bréda, dite "Source Rive Droite" (GIGNOUX C., 1960). Ses caractéristiques hydrochimiques sont voisines de celles de la source d'Allevard (présence de H_2S). Elle émerge au-dessus du niveau d'étiage du torrent avec un débit oscillant entre 0,5 et 2 $l.s^{-1}$. Ces observations mettent ainsi en évidence des conditions d'émergence très complexes en ce qui concerne la source d'Allevard.

6 - CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA SOURCE D'ALLEVARD

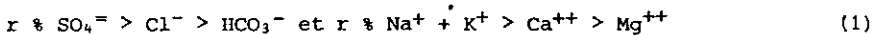
Origine des données

La majeure partie des données provient des analyses effectuées lors des 2 campagnes E.D.F. Entre 1956-58 E.D.F. a fait procéder à 29 analyses par l'I.R.H. (Institut de Recherches Hydrologiques) de Nancy, et entre 1972-77 à 64 analyses par l'Institut Pasteur de Lyon. Pour la période récente (1977-80), on dispose d'une analyse effectuée par le B.R.G.M. (Bureau de Recherches Géologiques et Ministères, Orléans) et 2 analyses effectuées à l'Institut Dolomieu. Parmi les analyses anciennes, ont été retenues celle de d'ARSONVAL (1922) (d'ARSONVAL *et al.*, 1924) ; celle d'Urbain (1925) (URBAIN *et al.*, 1930) et celle de WILLM (JACQUOT et WILLM, 1894), réinterprétée sous forme ionique.

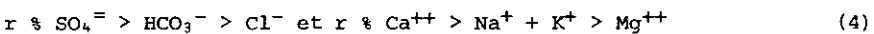
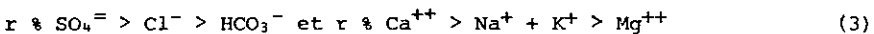
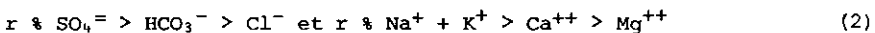
Dans ces analyses, réparties sur une centaine d'années (1888-1980), figurent les éléments majeurs (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO_4 , HCO_3) exprimés en $mg.l^{-1}$, la température, le pH, la résistivité (ohm-cm à 18 °C), le résidu sec ($mg.l^{-1}$ à 110 °C), ainsi que la silice (en SiO_2 , $mg.l^{-1}$) et la teneur en H_2S ($mg.l^{-1}$).

Interprétation des données - Faciès chimiques

L'examen des 99 analyses répertoriées montre que l'eau d'Allevard présente un faciès sulfaté-sodique dont la formule ionique est la suivante :



Toutefois certaines analyses présentent des formules ioniques différentes, modifiant le faciès sulfate sodique (1), (2) en faciès sulfate calcique (3), (4) :



Le domaine de variation du chimisme de l'eau d'Allevard est illustré sur la figure 7. Cette grande variabilité des paramètres (concentrations en éléments majeurs, température, pH, SiO_2 , gaz dissous ...) est synthétisée dans le tableau 2. Outre les valeurs maximales et minimales des paramètres, y figurent également l'analyse la plus ancienne (1888) et une analyse récente (1977) mettant bien en évidence la détérioration des caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'Allevard au cours d'une longue période. Les variations les plus importantes s'observent pour Na^+ , Cl^- et H_2S . Les eaux les plus minéralisées montrent une forte teneur en SiO_2 et un faible pH. Les températures, les plus élevées s'observent en mai, les plus basses en période hivernale. Toutefois, la température n'a pas été relevée systématiquement.

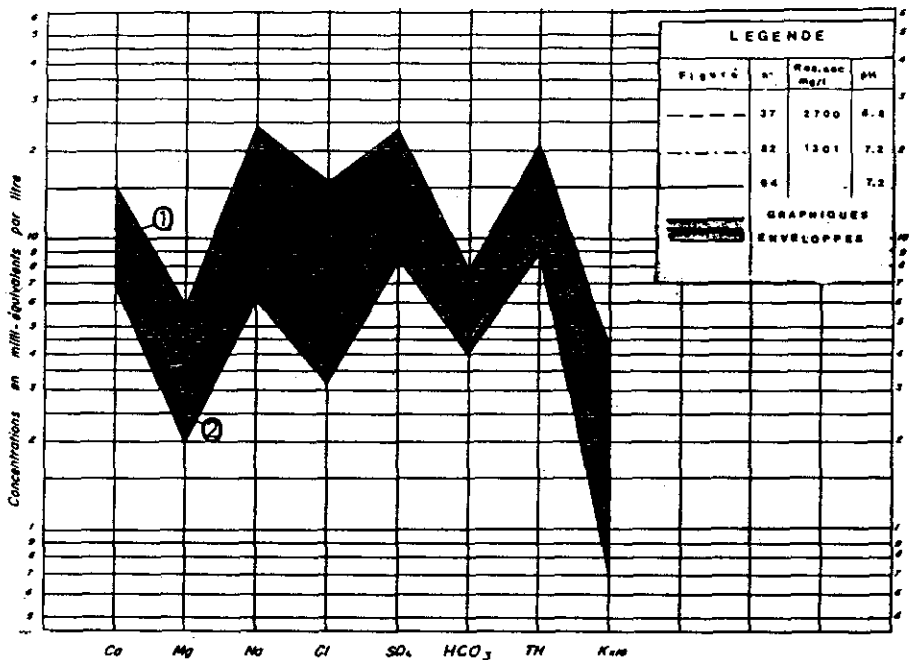


Figure 7.- Domaine de variation du chimisme de la source d'Allevard. 1 et 2 courbes enveloppes des valeurs extrêmes.

Figure 7.- Range of variations of chemical characteristics of the Allevard spring with 1 and 2 : limit curves according to extreme values.

Tableau 2.- Variations dans la composition chimique de l'eau d'Allevard.

Table 2.- Variations observed in the chemical composition of Allevard spring water.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
t °C	17.7	11.0	16.9	12	14.3	1.6	11	51
RS	2 700	1 031	1 790	1 632	1 874.4	372.3	20	92
resis.	758	314	--	552	480.1	98.8	21	92
pH	7.7	6.8	--	7.2	7.1	2.1	4	92
Ca ⁺⁺	305.0	36.0	184.4	167.2	195.9	36.4	18	92
Mg ⁺⁺	71.0	24.0	54.9	51.7	54.3	9.0	16	92
Na ⁺	550.0	143.0	348.3	260	323.5	91.4	28	92
K ⁺	17.9	3.0	9.8	4.4	6.9	2.7	39	92
Cl ⁻	562.5	116.2	329.7	243.0	322.9	98.7	30	92
SO ₄ ⁻⁻	1 100	390	647	580	652.1	139.4	21	92
HCO ₃ ⁻	476.0	245.0	388.4	277.0	354.6	53.6	15	92
SiO ₂	24.5	9.0	22.8	11.0	12.5	2.1	17	92
H ₂ S	46.5	11.2	37.7	34.0	25.3	7.7	30	92

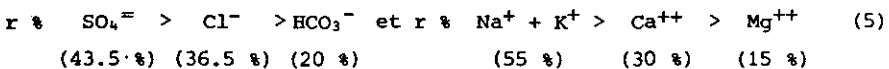
1 : Paramètres physico-chimiques avec t °C : température en degrés C ; RS : Résidu sec à 110 °C en mg.l⁻¹ ; resis : Résistivité en ohm-cm à 18 °C ; les concentrations des éléments sont en mg.l⁻¹.

2 : Valeurs maximales. 3 : Valeurs minimales. 4 : Valeurs des paramètres dans l'échantillon le plus ancien (année 1888). 5 : Valeurs dans un échantillon récent (année 1977). 6 : Moyenne arithmétique. 7 : Ecart-type. 8 : Coefficient de variation (%). 9 : Effectif.

1 : Physical and chemical parameters with t °C : temperature in degrees C ; RS : Dry residual at 110 °C in mg.l⁻¹ ; resis : Electrical resistivity in ohm-cm at 18 °C ; concentrations are given in mg.l⁻¹. 2 : Maximal observed values. 3 : Minimal observed values. 4 : Oldest available analysis (1888). 5 : A recent analysis (1977). 6 : arithmetic mean. 7 : Standard deviation. 8 : Variation coefficient (%). 9 : Sample size.

Composition chimique de l'eau d'Allevard

Analyse type. Etant donnée la variabilité importante des paramètres physico-chimiques due à la complexité des conditions d'émergence de la source et à son mode d'exploitation, une analyse représentative ne peut être définie qu'à partir des critères suivants : température élevée, résidu sec important, forte teneur en chlorures qui témoignent d'une origine profonde (WHITE *et al.*, 1963 ; CHEBOTAREV, 1955). L'analyse chimique d'un tel échantillon (tableau 1) peut donc être retenue comme caractéristique de l'eau d'Allevard :



Éléments traces. La présence de certains éléments traces témoignent aussi d'une origine profonde de l'eau. Certains ont été reconnus depuis longtemps dans les analyses anciennes (URBAIN *et al.*, 1930) les plus complètes (Brome : 0.8 mg.l^{-1} ; Fluor : 0.3 mg.l^{-1} ; Bore : 0.3 mg.l^{-1}). Des dosages par des méthodes modernes (ionométrie, spectrométrie d'absorption atomique) montrent des teneurs comparables (Fluor : 0.74 mg.l^{-1} ; Bore : 0.4 mg.l^{-1} ; Strontium : 4.2 mg.l^{-1}). Ces teneurs restent cependant inférieures à celles reconstruites dans les eaux thermominérales émergeant dans un contexte géologique comparable (Uriage), ou géographiquement proche (Challes) (fig. 1A). En particulier, on trouve pour l'iode dosé par activation neutronique au Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble : 0.085 mg.l^{-1} à Allevard ; 0.22 mg.l^{-1} à Uriage ; 10.6 mg.l^{-1} à Challes (DAZY et GRILLOT, 1982/83).

Tableau 3.- Composition des gaz dissous de l'eau d'Allevard (les teneurs sont exprimées en $\text{cm}^3.\text{l}^{-1}$, à 0°C et à 760 mm de Hg).

Table 3.- Composition of the dissolved gases in the spring water of Allevard (contents are expressed in $\text{cm}^3.\text{l}^{-1}$, at 0°C and at 760 mm of Hg).

	CO ₂	H ₂ S	O ₂	N ₂	He + Ne	He	Ar + Kr + Xe	Ar	G.C.	CH ₄	Référence
1	23.8	13.9	0	24.13	0.119	--	0.79	--	1.69	--	URBAIN, 1925
2	91.0	25.9	--	24.8	0.13	--	0.96	--	--	--	GUERIN, 1957
3	91.0	38.5	--	24.6	--	0.97	--	0.58	--	--	BRGM, 1984
4	35.8	53.9	0.2	48.8	--	0.10	--	0.56	--	0.62	BRGM, 1985

G.C. : Gaz combustibles (CO, CH₄, etc.).

1, 2, 3 : Source d'Allevard.

4 : Forage Austerlitz.

G.C. : Inflammable gases (CO, CH₄, ...).

1, 2, 3 : Samples from Allevard spring.

4 : Sample from Austerlitz borehole.

Les gaz libres. (Tableau 3). Une des caractéristiques géochimiques de la source d'Allevard est la présence d'un dégagement gazeux. Toutefois le volume des gaz libres semble avoir subi d'importantes variations dans le temps. La présence de CO₂ est en effet souvent mentionnée dans les analyses anciennes (d'ARSONVAL *et al.*, 1924). Ce qui conférerait à l'origine un caractère carbo-gazeux à cette source. CHATAING (1837) relate le fait que la source dégage continuellement et à courts intervalles, de grosses bulles d'acide carbonique mêlées à un peu d'azote. Par contre MORET (1946) signale d'abondants dégagements d'hydrogène sulfuré (H₂S). Cette variation au cours du temps de la composition chimique des gaz libres, qui s'observe aussi sur la source d'Uriage, pourrait être liée à l'intensité de l'activité sismotectonique régionale souvent à l'origine des venues profondes de CO₂. Actuellement, ces dégagements gazeux spontanés apparaissent comme relativement réduits. La seule analyse volumétrique disponible (URBAIN *et al.*, 1930) donne un débit gazeux de 0.030 l.mn^{-1} , composé essentiellement d'azote (91.8 %) et de CO₂ (4.3 %) et avec des traces de H₂S. Des mesures récentes sur le forage Austerlitz donnent des pourcentages similaires avec toutefois un débit gazeux plus important qu'à la source.

Les gaz dissous. (Tableau 3). Les analyses mettent aussi en évidence des variations de la composition chimique des gaz avec toujours présence de soufre sous forme de H_2S dissous. L'analyse la plus ancienne effectuée en 1837 (GUEYMARD, 1844) montre une teneur de 21.1 mg.l^{-1} en H_2S . Une analyse effectuée par DUPASQUIER en 1839 (d'ARSONVAL *et al.*, 1924) donne une teneur en H_2S de 37.7 mg.l^{-1} , avec une minéralisation totale de $2\,240 \text{ mg.l}^{-1}$. L'examen des données montre que la teneur en H_2S varie dans de larges limites, entre 46.1 et 11.0 mg.l^{-1} . En profondeur, les teneurs en H_2S , sont plus importantes (82 mg.l^{-1} sur le forage d'Austerlitz).

Les analyses effectuées sur les gaz associés montrent que si l'azote est prépondérant dans les gaz libres, H_2S est présent essentiellement comme gaz dissous. On remarque aussi que le CO_2 est en proportion variable, mais toujours supérieur à H_2S . Ce qui tend à confirmer le caractère carbo-gazeux de cette source. Enfin la présence constante de gaz rares associés à l'azote et la présence de gaz hydrocarbonés est à noter.

7 - LES DONNÉES ISOTOPIQUES (tableau 4)

Le tritium

Les concentrations en 3H mesurées entre 1977 et 1979 sont comprises entre 94 et 54 UT. Ces valeurs, élevées pour une eau thermale, montrent qu'il s'agit d'une eau contenant un pourcentage important d'eau d'infiltration récente. En effet pour une même période (oct. 79) la teneur en tritium (54 UT) mesurée sur l'eau d'Alleverd est nettement inférieure aux teneurs relevées dans les eaux de surface (71 UT), ainsi que dans l'eau de la "Source Rive Droite" (62 UT). Ces résultats peuvent s'expliquer par l'existence d'un mélange entre des eaux dépourvues de tritium issues d'un réservoir profond (ou semi-profond) et des eaux d'origine superficielle.

Oxygène 18

Les concentrations en ^{18}O (isotope stable) montrent pour l'année 79, une variation saisonnière (- 11.7 % en mai et - 11.3 % en octobre). A partir de la concentration en ^{18}O mesurée à l'émergence, des relations empiriques permettent de déterminer un ordre de grandeur de l'altitude de l'aire de recharge. La relation de SIEGENTHALER et OESCHGER (1980) :

$$A(m) = - 367 \times \delta^{18}O \text{ ‰} - 3\,110 \quad (6)$$

établie pour le versant Nord des Alpes (non soumis à l'influence méditerranéenne), donne respectivement une altitude moyenne de $1\,200 \pm 120 \text{ m}$ et $1\,037 \pm 100 \text{ m}$ pour les zones de recharge correspondant aux concentrations en ^{18}O ci-dessus.

PONTES (1976) et BLAVOUX (1978) ont proposé pour les Préalpes (Région du Léman) un gradient moyen situé entre - 0.28 et - 0.30 $\delta^{18}O \text{ ‰}/100 \text{ m}$. Ce qui permet de définir la relation (7) entre la concentration en ^{18}O des eaux à l'émergence et celles des précipitations :

Tableau 4.- Analyses isotopiques des eaux du Massif d'Allevard.

Table 4.- Isotopic contents of Massif Allevard waters.

Points d'eau	Dates	³ H	¹⁸ O	² H	³⁴ S **	S ⁼ (H ₂ S)
		(UT)	δ ‰ v. SHOW		SO ₄ ⁼	
Précipitations	06.79	119 ± 2	8,38*			
Bréda (Pinsot)	10.79	69 ± 2	- 12,8			
Bréda (Allevard)	10.79	71 ± 2	- 12,4			
PK 260 (Lias)	11.79	69 ± 2	- 10,6			
PK 550 (Lias)	11.79	68 ± 2	- 10,6			
PK 670 (Trias)	05.79	87 ± 5	- 10,96		+ 13,2 ± 0,2	
PK 670 (Trias)	11.79	59 ± 2	- 10,6		(anhydrite)	
PK 1 645 (mica- PK 2 055 schistes)	11.79	49 ± 2	- 11,7			
	11.79	56 ± 2	- 11,4			
PK 2 150	05.79	95 ± 2	- 11,04			
See Rive Droite	10.79	62 ± 2	- 11,7			
See Allevard	13.12.77	72 ± 2			+ 16,1 ± 0,2	
"	18.01.78	62 ± 1				
"	25.05.79	94 ± 2	- 11,74		+ 17,4 ± 0,2	- 7,7
"	24.10.79	54 ± 2	- 11,3	- 78,2		
Forage Austerlitz	03.84	0 ± 2				
See Uriage	20.12.77	5 ± 2	- 11,9	- 82,9	+ 14,7 ± 0,2	- 5,3

³H, ¹⁸O, ²H : Analyses effectuées au C.R.G. (Thonon) ; ³⁴S : Analyses effectuées au B.R.G.M. (Orléans).

Source d'Uriage : B.R.G.M. (Orléans).

* : Valeur moyenne de ¹⁸O dans les précipitations à Thonon (Sud Léman).

** : Teneurs exprimées en δ ‰ par rapport à la troilite de Canon Diablo.

³H, ¹⁸O, ²H : Analyses from C.R.G. (Thonon) ; ³⁴S : Analyses from B.R.G.M. (Orléans) Uriage Spring : B.R.G.M. (Orléans).

* : Average concentration of ¹⁸O in the precipitation at Thonon (South Leman).

** : Contents expressed in δ ‰ versus the troilite of Canon Diablo.

$$A(m) = [(\delta_S - \delta_P) \times 100/G] + A_S \quad (7)$$

avec :

δ_S : teneur en ¹⁸O (δ ‰) à la source ;

δ_P : teneur en ¹⁸O (δ ‰) dans les eaux de précipitations ;

G : gradient de teneur en ¹⁸O (δ ‰/100 m) ;

A_S : altitude de la source (m).

Comme la teneur en ¹⁸O n'a pas été mesurée dans les précipitations à Allevard, on a considéré pour δ_P la valeur mesurée au Lac Léman (altitude de 372 m) corrigée de la variation due au gradient. On obtient ainsi pour δ_P à Allevard (altitude : 468 m) une valeur de - 8.66 ‰. L'application de l'expression (7) permet de situer l'aire de recharge de la source d'Allevard entre 1 000 et 1 200 m d'altitude.

Pour la source d'Allevard, une zone d'infiltration située à une altitude moyenne de 1 000 ± 100 m est tout à fait envisageable compte tenu des reliefs immédiats et du contexte hydrogéologique (fig. 2). Une altitude supérieure, 1 200 ± 120 m, bien que possible, est plus difficile à envisager car elle n'intéresse que la zone d'affleurement des

micaschistes. Par contre, cette valeur peut être attribuée au mélange avec l'eau infiltrée à partir du Bréda. Les précipitations alimentant ce cours d'eau ont lieu sur les sommets du bassin versant à une altitude de $1\ 500\text{ m} \pm 150\text{ m}$ (pour $\delta^{18}\text{O} = -12.8\%$).

Soufre 34

La composition isotopique ($\delta^{34}\text{S} = +17.4\%$) des sulfates dissous, confirme l'hypothèse souvent émise que la minéralisation en ions sulfates des eaux d'Allevard résulte du lessivage de gypse et d'anhydrite du Trias. Cette valeur du rapport $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, du même ordre que celles obtenues sur les autres sources thermominérales des Alpes françaises (BOSCH *et al.*, 1976) est typique des évaporites d'âge triasique.

8 - DISCUSSION - GENÈSE DES EAUX

Dans la plupart des cas, les eaux thermales présentent à l'émergence des caractéristiques physico-chimiques soit acquises dans un réservoir profond, soit résultant d'un mélange d'eaux d'origines différentes. Généralement des eaux chaudes d'origine profonde sont mélangées avec des eaux superficielles froides des nappes alluviales. Ce cas est fréquent dans les Alpes où les sources thermales émergent en bordure des grandes vallées (Tarentaise, Maurienne, Val d'Aoste ...).

Parfois, on est en présence de mélange avec des eaux semi-profondes qui ont déjà acquis une certaine température et une minéralisation élevée. En conséquence, le mélange avec les eaux profondes est plus difficile à mettre en évidence. Dans ces conditions, l'étude de l'origine de certains composés dissous, confrontée au contexte structural et fissural, peut constituer un moyen d'approche de la genèse des eaux.

Origine des composés du soufre

L'émergence de la source s'effectuant à travers le Lias calcaire, sa minéralisation (teneur élevée en sulfates, forte proportion de Cl et Na présence d'éléments traces), ne peut provenir des formations du Lias essentiellement carbonatées et argileuses. Ceci implique que l'eau a au préalable circulé dans les évaporites du Trias. Ce qui se trouve confirmé par la composition isotopique du soufre des sulfates dissous. Dans ce contexte, on rejoint l'hypothèse que l'eau d'Allevard a principalement pour origine des eaux qui s'infiltrèrent à une altitude moyenne de $1\ 100\text{ m}$ dans les niveaux cargneulisés du Trias (fig. 8A). Après y avoir acquis rapidement leur minéralisation (en particulier CaSO_4) les eaux d'infiltration pénètrent jusqu'à une certaine profondeur dans les calcaires schisteux diaclasés du Lias où elles circulent lentement.

La présence de matières organiques a souvent été mentionnée dans les formations liasiques des Alpes. De même la présence de méthane (CH_4) a été signalée lors de l'exécution de travaux souterrains dans un secteur de la vallée de l'Isère proche d'Allevard. Dans de tels milieux confinés et imprégnés de matières hydrocarbonées (SCHOELLER, 1962), des réactions biochimiques complexes peuvent entraîner une modification du rapport

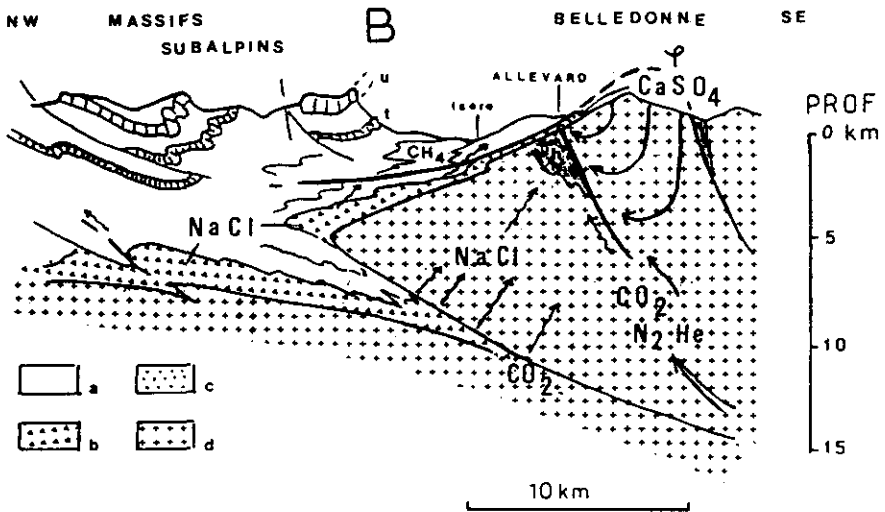
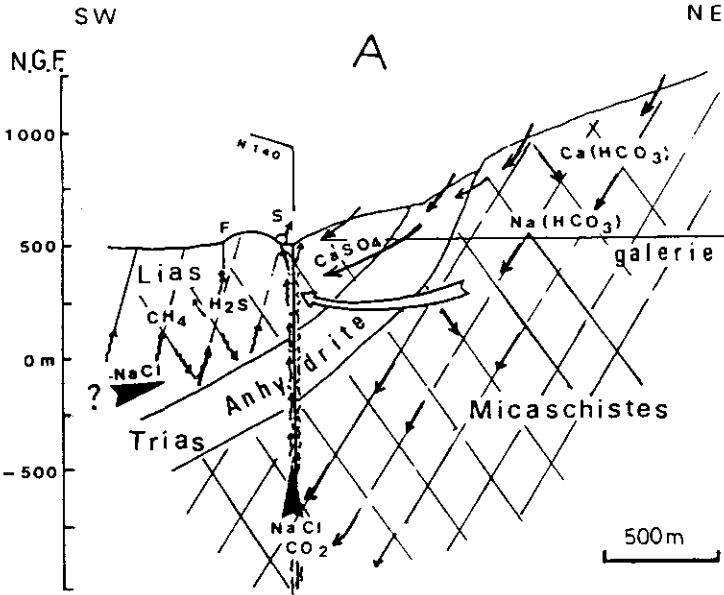


Figure 8.- Coupes géologiques à différentes échelles montrant les divers réservoirs à l'origine de la minéralisation de la source d'Allevard.

Figure 8.- Geological cross-sections at different scales showing the reservoirs taking part in the mineralization of the Allevard Spring.

- A : Coupe à échelle hectométrique selon l'accident N60. La flèche blanche indique une possibilité de circulation à travers le Trias dans le plan de la faille N60 (l'anhydrite en profondeur est imperméable d'après les observations en galeries).
- B : Coupe à échelle pluri-kilométrique tirée du programme ECORS (complétée) montrant la présence d'un gisement profond d'évaporites triasiques (halite) lié au décollement des massifs cristallins externes, a : Couverture sédimentaire ; b : Trias profond (halite) ; c : Trias de bordure (anhydrite et gypse) ; d : Socle.
- A : Hectometric cross-section according to N60 fault. The white arrow shows possible circulations along the N60 fault across the Trias formations (as observed in drifts, the anhydrite is impervious in depth).
- B : Kilometric cross-section after the ECORS program (completed) showing the occurrence in depth of Triassic evaporites (halite) associated to the decollement of the metamorphic basement, a : Sedimentary formations ; b : deep Trias (halite) ; c : subsurface Trias (anhydrite, gypsum) ; d : basement.

$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ du soufre des sulfates d'origine, par fractionnement dû à l'activité de thiobactéries (THODE, 1963). Les teneurs isotopiques obtenues sur les sulfates dissous de l'eau d'Allevard ($+ 16.1 < \delta \text{ ‰} < + 17.4$) peuvent résulter de réactions d'oxydo-réduction de ce type, à partir d'une valeur $\delta = + 13.2 \text{ ‰}$ mesurée sur un échantillon d'anhydrite du Trias.

La présence de H_2S dans l'eau d'Allevard avec $\delta = - 7.7 \text{ ‰}$ sur le soufre des sulfures peut s'expliquer aussi par des réactions semblables ayant lieu en milieu réducteur sur les sulfates dissous et non par la mise en solution des pyrites des gîtes filoniens.

Origine des chlorures

La présence dans l'eau d'Allevard de Cl^- et de Na^+ ainsi que des halogénures (I, Br, F) à l'état de traces pose un problème quant à leur origine. En effet l'hypothèse de l'origine triasique des chlorures couramment admise (MORET, 1946) n'a jamais été vérifiée. Les observations de surface et les nombreux travaux souterrains qui ont recoupé le Trias au contact du socle n'ont jamais révélé la présence significative de chlorure de sodium. De plus les teneurs dans les venues d'eau en galeries sont très faibles ($1.5 < \text{Cl}^- < 11 \text{ mg.l}^{-1}$).

Dans le but d'apporter une solution à ce problème, un échantillon d'anhydrite prélevé dans la galerie Arc-Isère a fait l'objet d'une analyse par diffraction X. Le spectre obtenu a mis en évidence en plus des raies de l'anhydrite, les raies caractéristiques de la halite, de la sylvinite et du quartz. Ces chlorures ne sont présents toutefois qu'à l'état de traces diffuses et ne peuvent expliquer les fortes teneurs observées sur les eaux thermominérales. Un autre échantillon d'anhydrite prélevé au PK 678 et soumis à une expérience de lixiviation a montré l'absence presque totale de NaCl (donnée inédite, GRIMAUD, 1985).

Cependant, compte tenu du fait que plusieurs sources thermominérales situées en bordure ou à l'intérieur de la zone externe (massifs cristallins) sont fortement minéralisées en chlorures (8.3 g.l^{-1} à Salins, 4.1 g.l^{-1} à Uriage), l'hypothèse de l'existence à très grande profondeur de NaCl ou de saumures hyperchlorurées est envisageable. La présence de chlorure pourrait s'expliquer par des anomalies salifères chlorobromurées type "oeil de sels" (DAZY *et al.*, 1980) liées aux conditions paléogéographiques de la sédimentation triasique. D'autre part MASCLE *et al.*, (1986) ont montré que le dépôt de halite au Trias est très vraisemblable dans les Alpes Occidentales. La disparition à l'affleurement des gisements de NaCl pourrait être imputée à des mouvements d'halocinèse précoces jurassiques, aux compressions alpines (MASCLE *et al.*, 1986) et au lessivage superficiel (GIGNOUX M., 1930).

La figure 8B traduit l'hypothèse d'un décollement du socle au front des massifs cristallins externes et met en évidence le rôle fondamental joué dans la tectonique alpine par les évaporites permotriasiques (coupe à échelle pluri-kilométrique déduite des profils sismiques et des travaux du programme ECORS). Par suite de cette tectonique de décollement, les dépôts évaporitiques n'affleurent que partiellement sur les bordures des massifs où ils ne sont alors représentés que par des niveaux sulfatés (gypse et anhydrite) et associés aux carbonates (dolomies). Par contre la présence en profondeur de niveaux chlorurés (halite) peut être envisagée sous forme d'amas résiduels (paléo-diapirs par exemple) coincés sous les unités chevauchantes. Ce cadre structural permet d'expliquer les fortes teneurs en chlorures observées dans les eaux thermominérales du

domaine alpin occidental. Leur émergence résulterait alors de la migration vers la surface de saumures hyperchlorurées riches en éléments traces, provenant du lessivage ancien ou récent par des eaux météoriques le plus souvent dépourvues de tritium. La remontée de ces solutions thermales s'accompagne de gaz d'origine endogène (CO_2 et gaz rares) et s'effectue à la faveur de grands accidents décrochants affectant le socle.

Dans le cas de la source d'Allevard, on peut envisager aussi la migration de saumures dans les fractures du socle chevauchant. Des traces de sel (NaCl) ont en effet été observées dans le remplissage des fissures à la faveur de travaux souterrains (donnée inédite, DABROWSKI, 1984). Ces saumures imprégnant les fissures seraient alors remobilisées par les eaux météoriques s'enfouissant à grande profondeur selon un circuit hydrothermal convectif.

Estimation de la température en profondeur

L'eau thermale lors de sa remontée, perd une partie de ses caractéristiques profondes. En particulier, sa température à l'émergence est pour diverses raisons (détente adiabatique des gaz profonds, mélange avec les eaux froides superficielles, colmatage par dépôts de phyllosilicates, etc.) nettement inférieure à celle acquise dans le réservoir profond. Aussi en se basant sur le fait que certains équilibres chimiques et isotopiques sont réalisés entre des minéraux de la roche réservoir et le fluide, des relations empiriques (ou géothermomètres) ont été proposées (ELLIS, 1970 ; FOURNIER *et al.*, 1974) pour estimer la température profonde du fluide.

La température des divers réservoirs profonds des sources des Alpes franco-italiennes a pu être estimée à partir de l'utilisation du géothermomètre de la silice corrigé de l'effet de sel (DAZY *et al.*, 1987). Cette température comprise entre 150 et 200 °C amène les auteurs à prévoir, en considérant un gradient géothermique normal, que la limite inférieure atteinte par les circulations, se situerait à une profondeur supérieure à 4 000 mètres. Il faut cependant mentionner que ce géothermomètre subit fortement l'influence d'une dilution avec une eau froide superficielle, ce qui est le cas de la source d'Allevard. Aussi, la température de 128 °C obtenue sur Allevard à l'aide de ce géothermomètre est à considérée avec précaution et constitue certainement une valeur minimale.

9 - LE CIRCUIT THERMOMINÉRAL - MODÈLE PROPOSÉ (fig. 9)

Au cours de leur infiltration dans les différentes formations fissurées au Massif d'Allevard, les eaux météoriques acquièrent au contact des évaporites du Trias une minéralisation sulfatée-calcaïque. Par enfouissement progressif dans les niveaux fissurés du Lias, les eaux souterraines se thermalisent et entrent au contact avec des eaux anciennes chaudes chlorurées-sodiques, ce qui entraîne une modification de leur chimisme. Le faciès résultant de ce mélange entre eaux profondes et semi-profondes est donné par l'eau extraite du forage Austerlitz, qui peut être considérée comme caractéristique de l'eau d'Allevard dans son gîte hydrothermal.

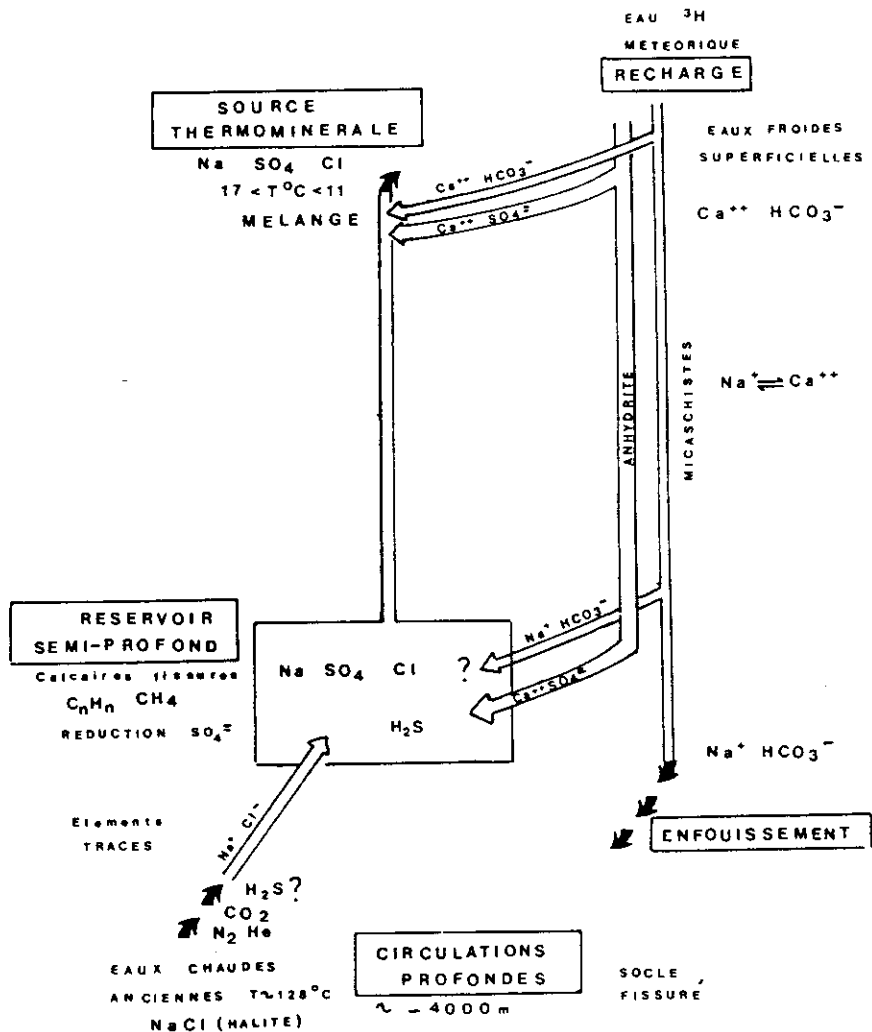


Figure 9.- Circuit thermal. Modèle illustrant le mélange entre eaux d'origine superficielle, semi-profonde et profonde.

Figure 9.- Model for the thermal circulations showing the mixing of waters from surficial, subsurface and deep origin.

Compte tenu du système fissural du Massif d'Alleverd et de la mise en évidence en galeries de circulations préférentielles selon les fractures décrochantes N60, l'hypothèse la plus vraisemblable est que le transit des eaux d'infiltration s'effectue selon l'accident N60 qui passe au droit de la source d'Alleverd. Dans cette hypothèse, la zone d'alimentation du circuit thermal se situerait au niveau de la zone d'affleurements triasiques s'étendant en rive droite du Bréda. L'intersection de la faille d'Alleverd par le grand accident N140 correspondant à l'axe du Bréda faciliterait la remontée des eaux profondes ; cet accident jouant

par ailleurs le rôle de drain pour les eaux semi-profondes. Cette hypothèse va dans le sens des conclusions sur le rôle, actuellement bien admis, des grands accidents décrochants comme facteur de perméabilité des réservoirs profonds en roches rigides (BHATTARAI, 1980 ; O'NEIL and HANKS, 1980 ; DROGUE, 1982 ; BERTHIER, 1982).

Dans ce schéma la source d'Allevard apparaît ainsi comme l'exutoire principal d'une nappe de fissures (aquifère liasique) ; la source Rive Droite, émergeant dans la nappe alluviale du Bréda, constitue un exutoire secondaire. Toutefois, il est probable que d'autres venues d'eau minéralisées et surtout des gaz (CO_2 , H_2S ,...) diffusent dans la nappe alluviale. Enfin au cours des derniers mètres de leur remontée, les eaux thermominérales se mêlent à des eaux d'origine superficielle (nappe alluviale du Bréda et circulations épidermiques dans le Lias).

10 - CONCLUSION

Le système d'Allevard constitue un exemple démonstratif d'une émergence thermominérale en domaine alpin occidental. L'interprétation des données recueillies sur cette source fait apparaître que sa composition chimique résulte de phénomènes plus complexes que ne le suggère le simple examen de quelques analyses ponctuelles. En effet, les informations apportées par les données chimiques et isotopiques confrontées au contexte structural régional et local, montrent que la source d'Allevard acquiert ses caractéristiques et son thermalisme à la suite de mélanges d'eaux provenant de réservoirs différents :

- des eaux superficielles et semi-profondes caractérisées par un pôle bicarbonate calcique et par un pôle sulfaté calcique en liaison avec des évaporites triasiques (gypse et anhydrite) localisées en bordure du massif cristallin de Belledonne ;
- des eaux d'origine profonde dépourvues de tritium, caractérisées par un thermalisme marqué et par un pôle chloruré sodique en liaison avec des évaporites triasiques (halite) localisés en profondeur sous les grandes unités chevauchantes.

Ces résultats pourraient vraisemblablement servir de modèle pour l'interprétation d'ensemble des sources thermominérales émergeant dans le contexte structural des Alpes occidentales.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARSONVAL (d') E., BORDAS F., TOUPLAIN F., (1924). L'eau minérale d'Allevard (Isère). *Annales des Falsifications et Fraudes*, Paris, 18(99): 154-158
- BARFETY J.C., DEBELMAS J., MOUTERDE R. (1972). Caractères stratigraphiques, paléontologiques et structuraux du Jurassique inférieur et moyen des bordures Ouest et Sud-Est du massif de Belledonne (Isère). *Géologie Alpine*, 48: 61-86.
- BERTHIER F. (1982). Les circulations profondes en milieu fissuré de socle. *Doc. B.R.G.M.*, 45: 83-90.

- BHATTARAI D.R. (1980). Some geothermal springs of Nepal. *Tectonophysics*, 62: 7-11.
- BLAVOUX B. (1978). Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Thèse Doc. d'Etat, Univ. P.M. Curie, Paris, 332 p..
- BORDET C. (1961). Recherches géologiques sur la partie septentrionale du massif de Belledonne (Alpes françaises). Mém. Serv. Carte Géol., France, 218 p.
- BOSCH B., DAZY J., LEPILLER M., OLIVE Ph., POULAIN P., SARROT-REYNAULD J. (1976). Données nouvelles sur quelques sources thermominérales des Alpes françaises. *Proc. Int. Congress Thermal Waters, A.I.H.S., Athens*, 32-40.
- CHATAING D. (1837). La vallée d'Allevard. Album du Dauphiné (Grenoble), 187-203.
- CHEBOTAREV I.I. (1955). Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. *Geochem. Cosmochem. Acta*, 8: 22-48.
- DABROWSKI H. (1984). Communication personnelle. Univ. J. Fourier, Grenoble, France.
- DAZY J., ROCHAT J., OLIVE Ph., (1980). Nouvelles données géochimiques et isotopiques sur les eaux thermales d'Uriage les Bains (Isère). *C.R. 165ème Congrès Nat. Soc. Savantes, Caen, fasc. II*, 111-122.
- DAZY J., GRILLOT J.C. (1982-83). Le thermominéralisme péri-alpin : exemple de la région savoyarde (France). *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.*, 23, fasc. 4, 319-328.
- DAZY J., DRAY M., JUSSERAND C., PASQUALOTTO M., ZUPPI G.M. (1987). Caractérisation isotopique des eaux thermominérales des Alpes Franco-Italiennes. *Proc. Int. Symp. Isotope Tech. in Water Res. Dev.*, Vienna (Austria), 3-24.
- DEBELMAS J., KERKHOVE C. (1980). Les Alpes Franco-Italiennes. *Géologie Alpine*, 56: 21-58.
- DROGUE C. (1982). L'aquifère karstique : un domaine perméable original. *Le Courrier du C.N.R.S.*, 44: 18-32.
- DUCROS J.B. (1974). Etude géologique et géologique du massif d'Allevard (Chaîne de Belledonne, Savoie). Thèse Doc. 3ème cycle, Univ. J. Fourier, Grenoble, 172 p..
- ELECTRICITE DE FRANCE (1964). Chute Arc-Isère. Note générale. Etudes spéciales et travaux de reconnaissance (Chap. VI. Source thermominérale d'Allevard). Rapport interne, Région Equipement Alpes, Lyon, 25 p..
- ELECTRICITE DE FRANCE (1973). Chute Arc-Isère. Problème posé par la source d'Allevard. Rapport interne, Région Equipement Alpes, Lyon, 7 p..
- ELLIS A.J. (1970). Quantitative interpretation of chemical characteristics of hydrothermal systems. *Geothermics*, 516-528.
- FONTES J.Ch. (1976). Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles : quelques aspects. Thèse Doc. d'Etat, Univ. P.M. Curie, Paris, 218 p..
- FOURNIER R.O., TRUESDELL A.H. (1974). Geochemical indicators of subsurface temperature. Part. 2 : Estimation of temperature and fraction of water mixed with cold water. *Jour. Research U.S. Geol. Survey*, 2, 3: 263-270.
- FRANÇOIS J.M., MASSONNAT G. (1981/82). Relations entre fracturation et circulations aquifères dans le massif d'Allevard (Alpes, France). *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.*, 23, fasc. 4: 309-318.
- GIGNOUX C. (1960). Perforation d'une galerie au voisinage d'une source minérale. Soc. Hydrotechnique de France, Nancy, VIèmes journées de l'Hydraulique, *L'Hydraulique souterraine*, 4: 505-510.
- GIGNOUX M. (1930). La tectonique des terrains salifères. Son rôle dans les Alpes françaises. *Livre Jubilaire de la Soc. Géol. de France, Paris*.
- GRILLOT J.C., DAZY J. (1983). Photo-interprétation, tectonique cassante et thermominéralisme : exemple du domaine alpin (France). *Géol. Alpine*, 59: 45-60.
- GRIMAUD D. (1985). Communication personnelle. Université P.M. Curie, Paris, France.
- GUEYMARD E. (1844). *Statistiques de l'Isère. Tome 1*, 182 p., Grenoble.
- JACQUOT E., WILLM E. (1894). *Les eaux minérales de France*. Baudry Ed., Paris, 602 p..
- LEMAHIEU J.M. (1985). Condition de captage de nouvelles ressources en eau minérale d'Allevard (Isère). Direction Gén. de l'Ind. et de la Rech., Lyon, Rapport interne inédit, 32 p..
- MASCLE G., ARNAUD H., DARDEAU G., DEBELMAS J., DUBOIS P., GIDON M., DE GRACIANSKY P., KHERKHOVE C., LEMOINE M. (1986). Halocinèse précoce sur la marge téthysienne alpine : vers une réinterprétation des zones de gypse des Alpes. *C.R. Acad. Sciences, Paris, t. 302, ser. II, n°15*, p. 963-968.

- MASSONAT G. (1981). Hydrogéologie en milieu fissuré et thermominéralisme. Etude du Massif de Bramefarine et du Nord du Massif d'Alleverd (Isère, France). Thèse Doc. 3ème cycle, Univ. J. Fourier, Grenoble, 313 p..
- MORET L. (1946). *Les sources thermo-minérales*. Masson Ed., Paris, 146 p..
- O'NEIL J.R., HANKS Th. (1980). Geochemical evidence for water-rock interaction along the San Andreas and Garlock faults of California. *Journal of geophysical research*, 85(B 11): 6286-6292.
- PROGRAMME ECORS (1982). Etude de la croûte terrestre en France par méthode sismique. Inst. Fr. Pétrole et Inst. Nat. d'Astronomie et de Géophysique, Paris, Proposition de programme, 37 p..
- SARROT-REYNAULD J. (1965). Style tectonique et morphologie de la bordure occidentale de la chaîne de Belledonne au Sud d'Alleverd. Trav. Lab. Géol., Univ. J. Fournier, Fac. Sciences, t. 41:7-32.
- SCHOELLER H. (1962). *Les eaux souterraines*. Masson Ed., Paris, 640 p..
- SIEGENTHALER U., OESCHGER H. (1980). Correlation of ^{18}O in precipitation with temperature and altitude. *Nature*, 285: 314-317.
- THODE H. (1963). Sulphur isotopes geochemistry. In : *Studies of analytical geochemistry*. M. Shaw Ed., Roy. Soc., Canada, Spec. pub., n°6, 25-41.
- URBAIN P., MOUREU C., LEPAPE A. (1930). Analyse des eaux minérales de quelques stations des Alpes. *Ann. Inst. Hydro. Climat., Paris*, t. VIII, fasc. 1, n°23, 66 p..
- WEBER C., HIRN A., PHILIP H., ROCHE A., (1980). Tectonique récente et sismicité de la France. Image géophysique de la France, 26ème Congrès Int. Géol., Paris, Thème II, coll. 7, Ed. B.R.G.M., Orléans, 26-50.