

Hydrogéologie et géothermie des venues d'eau du tunnel du Rawyl (Valais, Suisse)

par G. Bianchetti *

ABSTRACT

A confined thermal aquifer in the karstified limestone formations of the Wildhorn nappe has been drained by the Rawyl tunnel. After drilling the tunnel, the extremely high flow rates (approximately 50'000 l/min) dropped rapidly (currently approximately 1'200 l/min). The water temperature has decreased (maximum 30° C) and corresponds to a regional geothermal gradient of around 25-30°C/km. The water chemical composition of the sodium/bicarbonate and sulphurated type, with a low mineral content (< 400 mg/l for the warmest water) and a high fluoride content (> 7 mg/l) is fairly unusual in an alpine context. Its genesis can be explained by the evolution of cold surface water, of the calcium bicarbonate type, which acquires a predominantly sodium character by the cationic exchange during the slow infiltration through the marine marls. The thermal water is of meteoric origin and the infiltration took place for the most part prior to 1953. The recharge area of the thermal aquifer is probably located in a region situated only a few kilometres NNE of the tunnel, at an average altitude of approximately 2'600 metres. Here, the infiltration water can penetrate to a depth of several kilometres thanks to regional faults.

KEY WORDS

Hydrogeology, geothermics, limestone, hydrochemistry, Rawyl, Valais

RESUME

Un aquifère thermal captif dans des formations calcaires karstifiées de la nappe du Wildhorn a été drainé par le tunnel du Rawyl. Après le percement, les débits très élevés (environ 50'000 l/mn) ont rapidement diminué (actuellement environ 1200 l/mn). Les températures des eaux sont modérées (au maximum 30°C) et correspondent à un gradient géothermique régional de l'ordre de 25-30°C/km. Le chimisme, de type bicarbonaté-sodique et sulfuré, avec une faible minéralisation (< 400 mg/l pour les eaux les plus chaudes) et une forte teneur en fluor (> 7 mg/l), est assez particulier en contexte alpin. Sa genèse est expliquée par l'évolution des eaux froides de surface, de type bicarbonaté calcique, qui acquièrent un caractère sodique prédominant par échange cationique lors de l'infiltration lente à travers les marnes marines. Les eaux thermales ont une origine météorique et se sont infiltrées en grande partie avant 1953. Le bassin d'alimentation de l'aquifère thermal se situe probablement dans une région située quelques km seulement au NNE du tunnel, à une altitude moyenne d'environ 2600 mètres. Ici les eaux d'infiltration peuvent pénétrer à plusieurs kilomètres de profondeur à la faveur de failles régionales.

MOTS-CLES

Hydrogéologie, géothermie, calcaire, hydrochimie, Rawyl, Valais

* Centre de Recherches Scientifiques Fondamentales et Appliquées, Industrie 45, CH-1951 Sion.

1. Introduction

1.1. Contexte de l'étude

De nombreuses émergences thermales (sources et forages) se trouvent en Valais et dans les régions alpines environnantes. Les conditions hydrogéologiques et géochimiques des eaux de treize zones thermales, dont neuf situées sur territoire valaisan ont été étudiées dans le cadre d'un projet financé par le Fonds national suisse de la recherche scientifique et en collaboration avec le programme GEOTHERMOVAL (CRSFA 1992). L'étude des venues d'eau du tunnel du Rawyl s'inscrit dans le cadre de ces projets.

1.2. Situation géographique et historique

Le tunnel du Rawyl se situe dans la vallée de la Lienne à une altitude de 1180 mètres, 15 km environ au NE de Sion (figure 1). Le tunnel, qui aurait dû relier les cantons du Valais et de Berne, rencontra, au cours de l'automne 1978, de fortes venues d'eau thermique, avec un débit total de 50'000 l/mn (BADOUX 1982a). En même temps, des déplacements anormaux du barrage de Tseuzier, situé environ 1,5 km à l'ouest du tunnel furent observés, indiquant une déformation de l'ouvrage. Les travaux souterrains, soupçonnés d'être la cause de ces désordres, furent stoppés : le tunnel avait alors atteint 3236 mètres. Depuis, les travaux de percement n'ont jamais repris.

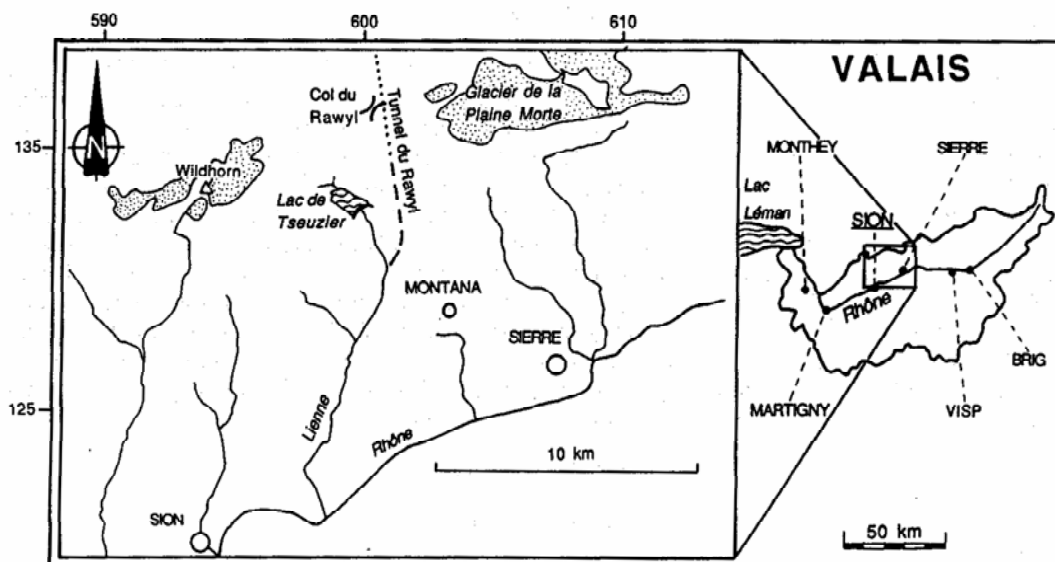


Figure 1 : Situation géographique de la région étudiée. Le tracé du tunnel prévu et qui n'a pas été achevé est représenté en pointillé.

Actuellement l'accès aux sources du tunnel n'est pas possible, notamment à cause de la présence de gaz (méthane et dans une moindre mesure hydrogène sulfuré). L'eau des différentes sources thermales est collectée par un canal qui la rejette dans la Lienne, affluent du Rhône entre Sierre et Sion.

2. Contexte géologique et hydrogéologique

2.1. Géologie

La région du Rawyl appartient au domaine Helvétique et est caractérisée par des roches sédimentaires (calcaires, marnes et schistes plus ou moins argileux). Le tunnel du Rawyl se situe dans les terrains appartenant à la nappe du Wildhorn (BADOUX 1982a). La séquence lithologique des séries sédimentaires qui constituent cette nappe est représentée à la figure 2.

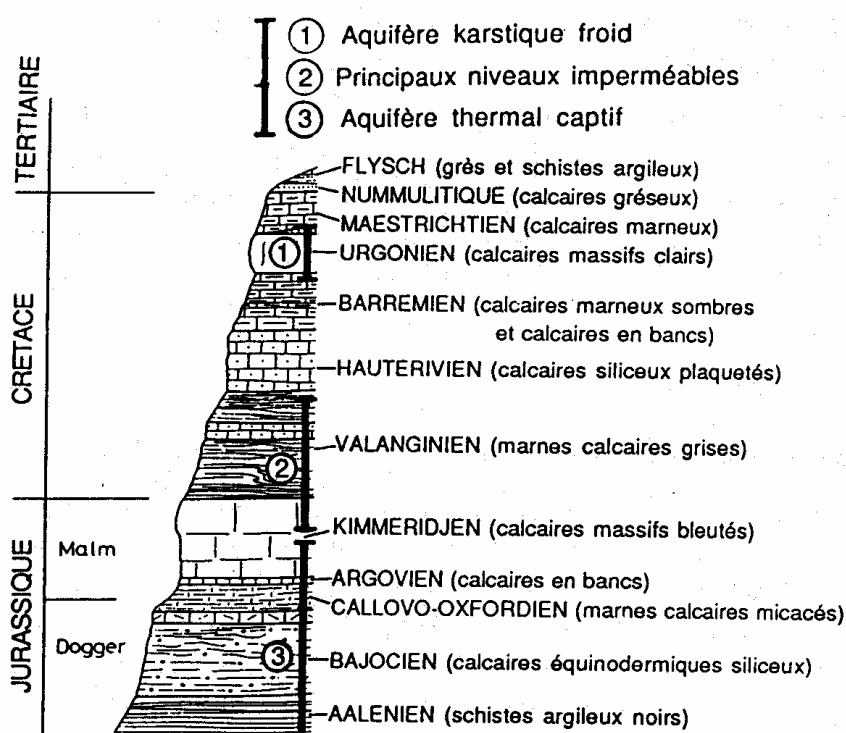


Figure 2 : Coupe litho-stratigraphique "type" de la nappe du Wildhorn (d'après SCHNEIDER 1982). Des formations calcaires compétentes alternent avec des formations marneuses. Les principales circulations d'eau s'observent dans les calcaires karstifiés de l'Urgonien (aquifère karstique froid) et dans les calcaires fissurés du Malm (aquifère thermal captif). Les marnes du Barrémien, du Valanginien et du Callovo-Oxfordien, ainsi que les schistes argileux de l'Aalénien représentent les aquicludes.

Le levé géologique du tunnel a montré une succession de roches sédimentaires d'âge mésozoïque, allant des schistes sombres argileux de l'Aalénien aux calcaires plaquetés du Barrémien (figure 3). Le tunnel s'ouvre dans le Barrémien et traverse un pli-faille très fracturé (Anticlinal de Tseuzier), dessiné par les calcaires massifs du Malm et séparé du synclinal suivant (Synclinal du Lac) par une faille inverse située entre les km 2,72 et 2,75 (BADOUX 1982a ; figure 3). L'axe de l'Anticlinal de Tseuzier se prolonge vers le SW, où le pli détermine le verrou qui supporte le barrage de Tseuzier, dont les appuis sont constitués par des calcaires massifs du Malm (figure 3). Dans le tronçon qui a traversé le Synclinal du Lac ont été recoupées les venues d'eau avec les débits les plus élevés.

Au NNE du tunnel et du lac de Tseuzier se trouve une région d'environ 50 km², constituée par des plateaux calcaires fissurés, dont l'altitude s'étale entre 2300 et 3200 m (Plaine Morte, Col du Rawyl, Glacier de la Plaine Morte). Les calcaires de l'Urgonien qui affleurent dans cette région sont fortement fissurés et karstifiés (WILDBERGER 1981). Plusieurs failles régionales à l'échelle kilométrique affectent les séries sédimentaires jusqu'à quelques milliers de mètres de profondeur, traversant les épaisses assises marneuses du Barrémien et du Valanginien (BADOUX 1984).

Pour conclure, il faut signaler que la région du Rawyl fait partie de la zone sismique du Wildhorn, caractérisée par une intense activité sismique. L'épicentre du fort tremblement de terre ressenti dans la région de Sierre en 1946 (magnitude I_0 estimée à 5,7 MSK) se situe dans cette région (PAVONI 1980). Une forte augmentation de la microsismicité a été enregistrée depuis l'automne 1978 (SCHNEIDER 1982).

2.2. Hydrogéologie

Deux aquifères principaux sont actuellement connus dans la région du Rawyl :

- Un *aquifère karstique froid*, relativement bien connu, situé dans les calcaires massifs très purs de l'Urgonien (WILDBERGER 1981). Les circulations d'eau sont liées à des systèmes karstiques avec des écoulements rapides (> 100 m/jour) qui suivent généralement les axes des synclinaux (direction SW-NE). La base de l'aquifère est généralement délimitée par les calcaires marneux du Barrémien, même si des écoulements de moindre importance s'observent parfois dans les formations sous-jacentes (Hauterivien, Valanginien calcaire). Plusieurs grosses sources froides, situées dans la partie supérieure de la vallée de la Lienne, mais aussi plus au nord sur le versant bernois, constituent les émergences de cet aquifère. Leur débit, influencé par la fonte des neiges et les orages, est soumis à d'importantes fluctuations au cours des saisons. Le chimisme est de type bicarbonaté-calcique, avec faibles teneurs en sodium. Des essais de traçage ont notamment mis en évidence une liaison hydraulique entre la région karstifiée du col du Rawyl et des sources dans la partie supérieure de la vallée de la Lienne, en amont du lac de Tseuzier.

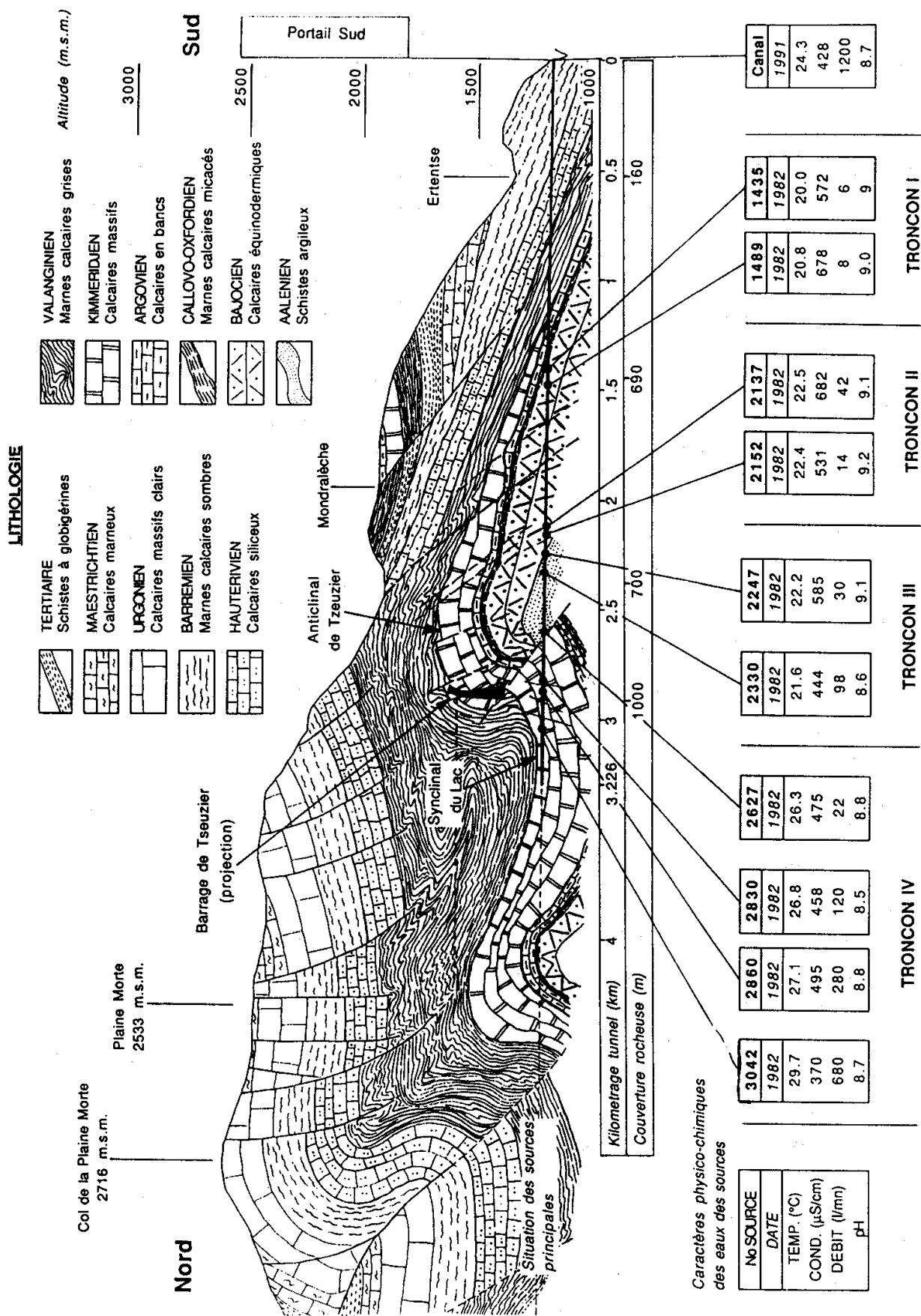


Figure 3 : Profil géologique du tunnel (modifié d'après BADOUX 1982a), avec situation et principales caractéristiques physico-chimiques des venues d'eau.

- Un *aquifère thermal captif*, situé dans les formations marno-calcaires du Dogger et dans les calcaires massifs du Malm. Cet aquifère était complètement inconnu avant la réalisation du tunnel du Rawyl. Lors du percement, des venues d'eau thermale qui se différencient chimiquement des eaux de surface et des sources froides ont été rencontrées.

Leur chimisme est particulier, de type bicarbonaté-sodique avec présence de H_2S . Les venues d'eau les plus importantes sont associées à des fractures subverticales perpendiculaires à l'axe du tunnel, qui se sont développées dans les calcaires rigides du Malm, au voisinage de l'importante faille inverse située près du km 2,7 (figure 3). La rencontre d'une faille aquifère par les forages de reconnaissance qui précédaient le front d'attaque, provoquait un afflux d'eau sous pression depuis le plafond et les parois. Au début les débits étaient considérables (environ 40'000 l/mn pour la seule venue d'eau au km 3,042), mais ensuite diminuaient rapidement. Le niveau des exutoires s'abaissait ainsi en quelques jours jusqu'au plancher de la galerie. L'avancement des travaux reprenait alors jusqu'à la prochaine fissure, où le même scénario se reproduisait : la vidange de la première fissure n'avait donc pas influencé la pression d'eau de la suivante (BADOUX 1982a). Pourtant, plus d'un mois pouvait s'écouler entre la rencontre des deux fissures. Ces observations indiquent la présence d'un aquifère fissural captif cloisonné, avec des réseaux de fissures saturées assez indépendants les uns des autres.

Aucune connexion semble exister entre ces deux aquifères : le percement du tunnel n'a pas entraîné un changement de débit des sources karstiques froides (WILDBERGER 1981 ; BADOUX 1982c).

La perméabilité des formations calcaires compétentes du Malm est essentiellement liée à leur état de fracturation et de karstification, et peut varier fortement d'une région à l'autre. Dans la région du lac de Tseuzier, les roches du Malm sont peu karstifiées et de nombreux forages réalisés lors de la construction du barrage ont révélé une perméabilité très faible. Par contre, des fissures élargies par des phénomènes tectoniques ou par la dissolution ont été observées dans le tunnel du Rawyl (ouverture de l'ordre du décimètre), sans pourtant que la karstification soit autant développée que celle des calcaires de l'Urgonien.

2.3. Situation et description des sources du tunnel du Rawyl

Le tunnel était pratiquement sec jusqu'au km 1,2, à l'exception de quelques faibles infiltrations depuis la surface entre les km 0,4 et 0,6 (BADOUX 1982a ; CRSFA 1991). Plus loin, 70 venues d'eau ont été répertoriées et regroupées dans quatre tronçons aquifères séparées par des zones sèches (tableau 1 et figure 3).

Tronçon aquifère	Kilométrage tunnel (km)	Nombre de venues d'eau	Débit total fin 1982 (l/mn)	Température fin 1982 (°C)
I	1,203 - 1,684	environ 25	42	19,6 - 21,9
II	2,081 - 2,158	environ 10	105	22,2 - 22,7
III	2,244 - 2,402	environ 10	165	21,6 - 23,7
IV	2,627 - 3,042	environ 20	1100	26,2 - 29,7
Total	1,203 - 3,042	environ 65	1412	24,3 (canal en 1990)

Tableau 1 : Principaux tronçons aquifères du tunnel avec caractéristiques physiques des eaux rencontrées.

Les sources les plus importantes ont été captées dans la partie profonde du tunnel et sont les suivantes :

SOURCE	LOCALISATION	DEBIT EN 1982	TEMPERATURE
3042	km 3,042	environ 680 l/mn	29,7 °C
2860	km 2,860	environ 280 l/mn	27,1 °C
2830	km 2,830	environ 120 l/mn	26,8 °C

Ces trois sources totalisent le 80% environ du débit total drainé à fin 1982 (1400 l/mn) et la source 3042 représente à elle seule presque la moitié. La situation des principales sources dans le tunnel, leur débit initial et à fin 1982, ainsi que toutes les mesures réalisées entre 1979 et 1982 ont fait l'objet d'une compilation (CRSFA 1991).

En dehors du tunnel, des eaux subthermales bicarbonatées sodiques sous pression (6 bars en tête de forage), ont été captées par le forage X/3 réalisé à la base du barrage de Tseuzier en automne 1979 (figure 10). Ces venues d'eau se situent à la limite entre les marnes du Callovo-Oxfordien et les calcaires spathiques du Bajocien sous-jacent (altitude 1350 m). Pour conclure, une petite source tiède sulfureuse a été signalée dans le lit de la Lienne à la cote 1320 m, avec un chimisme de type bicarbonaté-sodique (FARDEL, communication personnelle). Lors d'une reconnaissance du torrent en août 1990, cette source n'a pas été retrouvée : le drainage du massif par le tunnel a probablement entraîné sa disparition.

3. Travaux réalisés

Au cours de la période 1990-92, le canal du tunnel a été mesuré à 11 reprises et échantillonné à quatre reprises pour des analyses chimiques et isotopiques (tableau 2). Les mesures et les prélèvements ont été effectués à l'entrée du tunnel. Un échantillonnage de la Lienne et d'une source froide en aval du barrage, ainsi que de l'eau du forage X/2, situé dans le Malm à la base du barrage de Tseuzier, ont complété les prélèvements. Depuis novembre 1989 un enregistreur en continu de température et niveau (appareil MADD) a été installé à la sortie du canal, quelques mètres à l'intérieur du tunnel.

BIANCHETTI : HYDROGÉOLOGIE ET GÉOTHERMIE DANS LE TUNNEL DU RAWYL

GENERALITES	CANAL DU TUNNEL				FORAGE X2	SOURCE FROIDE	TORRENT LIENNE
N° échantillon	152	252	352	452	653	251	350
Date	08-16v-90	30-mai-90	17-aoû-90	15-nov-90	10-jun-91	30-mai-90	17-aoû-90
MESURES IN SITU							
Température (°C)	24.2	24.3	24.3	24.3	7.1	9.4	11.3
Conductiv. (µS/cm)	421	416	422	416	81	335	214
Débit (l/mn)	1200			1100	5		
pH	8.46	8.63	8.70	8.66	9.52	8.57	8.40
Eh (mV)		74	126	141		335	134
Temp. air (°C)	7	13	20	6		13	20
ANALYSES							
TSD (mg/l)	418	413	430	418	75	314	203
CATIONS (mg/l)							
Li	0.354	0.374	0.327	0.253	<0.1	0.004	0.005
Na	107	103	115	103	2.16	2.1	2.2
K	1.2	1.1	1.17	1.2	0.48	0.3	0.1
Pb	0.003	0.003	0.003	0.004		0.000	0.001
Cs	0.002	0.003	0.003	0.003		0.000	0.000
Mg	1.565	1.7	1.7	1.84	6.1	17.7	8.7
Ca	2.4	2.5	2.7	2.6	5.62	5.1	35.1
Sr	0.3	0.3	0.4	0.2	0.15	1.3	0.5
Ba	0.030		0.035	0.036			0.008
Al	0.034	0.009	0.000	0.000		0.006	0.000
U	0.000			0.001			
Ge		0.003	0.003	0.004		0.000	0.000
Pb	0.000		0.000	0.000			0.000
Ti		0.001	0.000	0.001		0.000	0.000
As	0.000	0.001	0.000	0.000		0.000	0.000
V		0.001	0.001	0.011		0.000	0.000
W	0.000		0.001	0.002			0.000
Mn	0.001	0.000	0.000	0.001		0.000	0.000
Fe	<0.1	<0.1	<0.1	0.038	0.028	0.018	0.008
Zn	0.002	0.013	0.003	0.031		0.007	0.003
ANIONS (mg/l)							
F	7.8	7.5	7.3	7.4	0.9	0.9	0.3
Cl	4.6	4.4	4.6	5.1	1.66	0.1	0.4
Br	0.095	0.078	0.079	0.110		0.008	0.004
I	0.109	0.317	0.372	0.474		0.000	0.002
SO4	15	12	13	12.5	3.14	55	24
HCO3	264	265	270	269	55	180	129
INDISSOCIES (mg/l)							
SiO2	13.5	14.8	13.3	14.1	0.2	5.1	2.6
B	0.410	0.249	0.485	0.250		0.011	0.000
BALANCE IONIQUE							
Cations (méq/l)	4.99	4.83	5.36	4.83	0.89	4.13	2.58
Anions (méq/l)	5.18	5.12	5.21	5.21	1.06	4.15	2.64
Différence	1.9%	2.8%	1.4%	3.7%	8.6%	0.2%	1.2%
ISOTOPES							
Tritium (UT)	9.6	11.1	11.2	12.1		26.1	22.2
Deuterium (‰)	-109.0	-110.3	-107.3	-109.0		-93.4	-89.4
Oxyg.-18 H2O (‰)	-15.41	-15.39	-15.45	-15.18		-12.64	-12.84
Oxyg.-18 SO4 (‰)				1.8			
Soufre-34 SO4 (‰)				9.1			

Tableau 2 : Données analytiques des eaux du canal, du forage X/2, d'une source froide et du torrent Lienne (BIANCHETTI, en préparation).

4. Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Les sources thermales du tunnel du Rawyl sont inaccessibles depuis 1983 à cause de la présence de gaz, ainsi les mesures et analyses physico-chimiques sont relativement peu récentes (1979-1982). Par contre, l'eau du canal qui draine l'ensemble des sources est régulièrement mesurée et analysée depuis 1987.

4.1. Paramètres physiques

TEMPÉRATURE

La température des sources du tunnel, mesurée à fin 1982, variait entre 19,6°C (source 1419) et 29,7°C (source 3042). Ces valeurs augmentent en général au fur et à mesure que l'on pénètre dans le massif et correspondent à un gradient géothermique de l'ordre de 25-30°C/km (figures 3 et 10). Les mesures effectuées entre 1979 et 1982 ont permis d'observer pour plusieurs sources une tendance à la hausse des températures (quelques degrés), alors que les débits baissaient fortement (BADOUX 1986 ; CRSFA 1991).

Par contre, la température de l'eau du canal a légèrement diminué au cours de la même période, passant de 25,4°C en mai 1979 à 24,2°C en décembre 1982. Cette baisse coïncide avec la forte diminution des débits qui a suivi l'arrêt des travaux de percement. Elle est probablement liée à une augmentation du refroidissement de l'eau par l'air du tunnel suite à la diminution de débit. Depuis fin 1982, la température s'est stabilisée à environ 24°C et les variations saisonnières sont de faible amplitude ($\pm 1,0^\circ\text{C}$). Les valeurs extrêmes, observées par les mesures manuelles et les enregistrements MADD, montrent un maximum à 24,8°C et un minimum à 22,9°C. Un fléchissement des températures est mis en évidence par le MADD en 1990 et 1991, au cours de la période janvier-mars (figure 4). Ce phénomène ne s'est pas reproduit en 1992 et 1993.

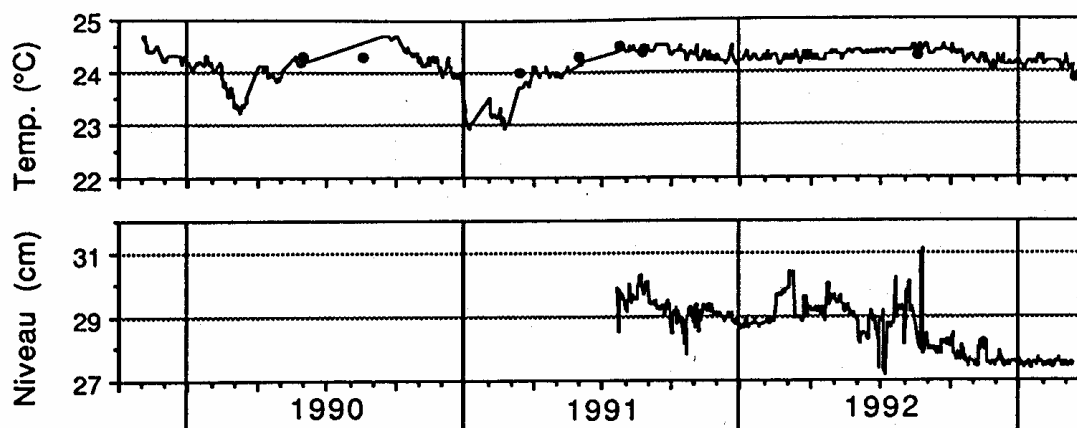


Figure 4 : Evolution de la température et du niveau de l'eau du canal du tunnel au cours de la période novembre 1989 - mars 1993 (relevés MADD). Les mesures ponctuelles manuelles de température sont représentées par des points. Les variations de niveau sont représentatives de l'évolution des débits. Une diminution de la température se produit à deux reprises (hiver 1990 et 1991), mais ne se répète plus en 1992 et 1993. Dans l'ensemble, ces deux paramètres ne présentent pas de variations saisonnières importantes qui pourraient être corrélées avec des phénomènes météorologiques.

CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE

Les valeurs de conductivité des eaux du tunnel sont faibles comparées à la grande majorité des eaux thermales suisses. Elles varient entre 350 et 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valeurs toujours supérieures à celles des sources froides de l'aquifère karstique de l'Urgonien et des eaux de surface de la région (100 à 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, WILDBERGER 1981). Les différentes températures et conductivités des sources du tunnel ne permettent pas de mettre en évidence un phénomène de mélange avec les eaux froides de surface, car les eaux les plus chaudes parmi les sources thermales sont aussi les moins minéralisées (figure 7, temp./TSD).

Entre 1985 et 1991 la conductivité de l'eau du canal a été remarquablement stable, avec des valeurs proches de 420 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (CRSFA 1991). Cette observation, liée à la stabilité de la température et du débit, confirme l'absence de mélanges importants avec les eaux froides de l'aquifère karstique dans l'Urgonien ou avec les eaux de surface.

DÉBIT

Les débits les plus élevés ont été rencontrés lors de l'avancement du tunnel dans le Synclinal du Lac, avec les venues d'eau provenant des calcaires fissurés du Malm. Des valeurs > 12'000 l/mn et jusqu'à 36'000 l/mn ont été estimées séparément pour les sources 2830, 2860 et 3042. Ces débits ont rapidement baissé pour se stabiliser au bout de quelques mois (figure 5). Le débit de ces sources peut être estimé aujourd'hui entre 100 l/mn (source 2830) et 600-650 l/mn (source 3042).

Le débit du canal peut être mesuré avec une précision de l'ordre de 10% avec un déversoir situé à la sortie du tunnel. Depuis l'arrêt des travaux de percement une forte diminution du débit a été observée. Celui-ci a été estimé à 50'000 l/mn en février 1979, alors que des mesures ont montré 4'500 l/mn en mai 1979 et 1'800 l/mn en décembre 1982. Depuis 1987, une stabilisation est observée, avec un débit moyen d'environ 1200 l/mn et des valeurs extrêmes de 1100 et 1300 l/mn. Les variations saisonnières sont peu importantes et aucune relation n'a été mise en évidence avec les périodes de fonte des neiges ou d'orages.

4.2. Typologie géochimique

Une trentaine d'analyses chimiques des sources du tunnel ont été réalisées entre 1977 et 1980, mais pour la plupart elles sont incomplètes (BADOUX 1982b). Une analyse partielle de l'eau du forage X/3 a été réalisée en 1979 (SCHNEIDER, communication personnelle). Les résultats de ces analyses sont présentés dans le tableau 3. Toutes ces eaux appartiennent à une même famille géochimique bicarbonatée-sodique et se différencient nettement des eaux karstiques froides de type bicarbonaté-calcique (figure 6). Les ions Na et HCO_3 représentent le 80% au moins de la minéralisation totale exprimée en méq/l. La présence d' H_2S , les pH assez basiques (8,3 à 9,2), les teneurs élevées en fluor (6,5 à 10 mg/l) et faibles en sulfates, magnésium et calcium (quelques mg/l) sont caractéristiques des eaux thermales du tunnel.

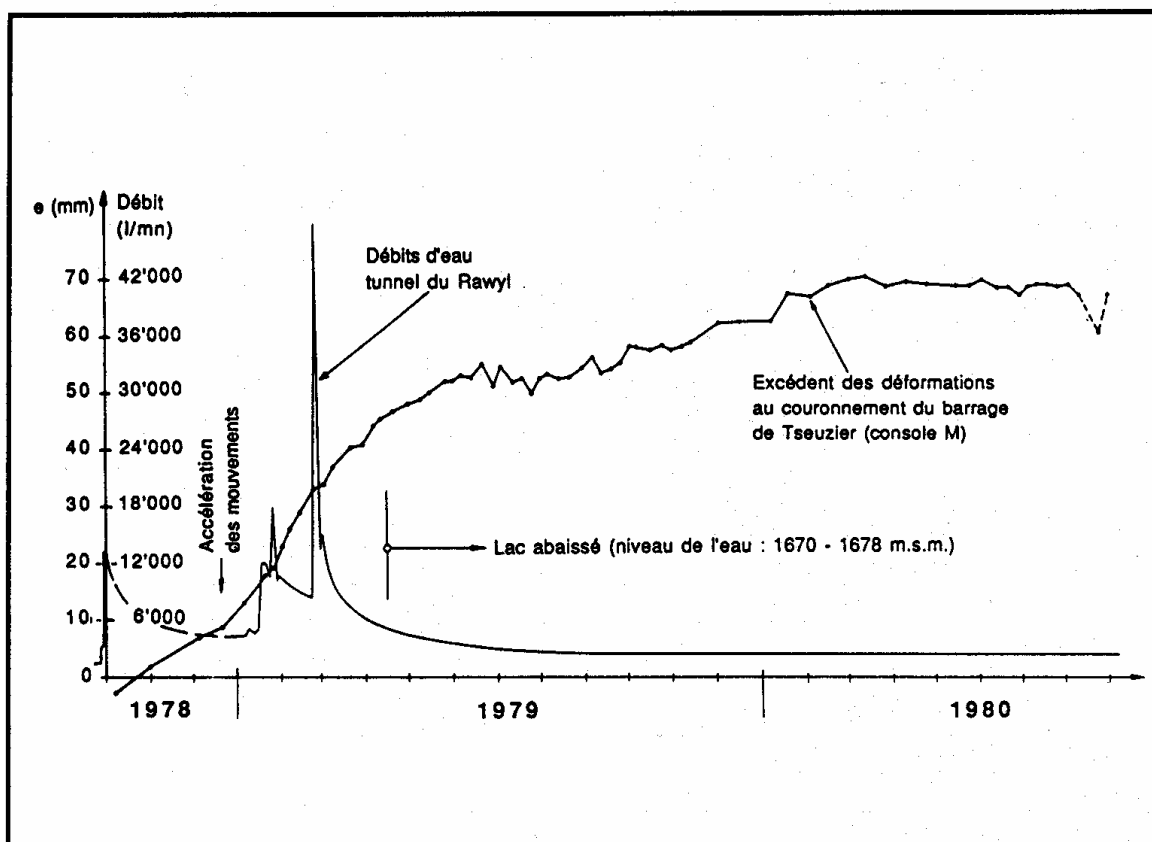


Figure 5 : Comparaison entre l'évolution du débit drainé par le tunnel et le développement des déformations (e) au couronnement du barrage de Tseuzier (d'après BADOUX 1982a). Les pointes de débit correspondent à la rencontre des sources du Synclinal du Lac (2760, 2830, 2860 et 3042). Le début des mouvements de tassement du barrage de Tseuzier s'observe déjà quelques jours seulement après la rencontre de la grosse source 2760 à fin septembre 1978 (environ 13'000 l/mn). Toutefois, une accélération des tassements intervient à partir de fin 1978, sans que de nouvelles venues d'eau soient rencontrées entre-temps. Le ralentissement et la stabilisation des mouvements du barrage coïncident avec la stabilisation du débit drainé par le tunnel.

La composition chimique de l'eau du canal reflète bien l'apport des différentes sources du tunnel (tableau 2). Sa minéralisation (410 à 430 mg/l) correspond au mélange des trois sources les plus volumineuses (2830, 2860 et 3042), dont les minéralisations varient entre 360 et 500 mg/l. Les ions majeurs sont toujours le sodium et le bicarbonate, le pH est basique (8,4 - 8,7) et les teneurs en fluor sont élevées (7,3 à 7,8 mg/l). Les teneurs en silice sont relativement faibles (13 à 15 mg/l) et aucune concentration particulière en éléments en trace n'a été décelée (tableau 2). A remarquer par contre la présence en teneurs appréciables d'ammonium et nitrites, avec respectivement 0,2 et 0,29 mg/l (CRSFA 1991).

BIANCHETTI : HYDROGÉOLOGIE ET GÉOTHERMIE DANS LE TUNNEL DU RAWYL

DESIGNATION	DATE	TEMP (°C)	COND (μS/cm)	pH	TSD (mg/l)	Li (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	F (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	SiO2 (mg/l)
SOURCE ?	13-nov-80		460	8.5			169		1.8	2.4		7.9	2	282	
SOURCE ?	13-nov-80		349	8.7			125		2.1	2		6.1	5	204	
SOURCE 3042	12-fév-80	29.2	370	8.7	334	0.29	91	1	1.5	3.2	8	5.5	5	218	
SOURCE 3042	26-sep-79	28.0	365	8.61			89		2.8	5				220	
SOURCE 3042	30-mai-79	28.0	375	8.6			62		1	3.4		6.7		230	
SOURCE 3042	26-fév-79	27.6	365	8.4			75		1.2	4.2		4.9	3	223	
SOURCE 2860	26-jan-79	26.4	389	8.6			78		1.8			3.4	4	243	
SOURCE 2860	12-fév-80	26.8	495	8.8	451	0.36	126	1.1	1.2	3.2	9.4	8	2	300	
SOURCE 2838	26-jan-79	26.3	412	8.6			75		1.6			3.3	3	260	
SOURCE 2838	30-mai-79	26.3	458	8.5										304	
SOURCE 2760	30-nov-78	26.0	385	8.5			62		1.5	3.2		2.8		258	
SOURCE 2636	11-nov-78	28.0	394	8.5			85			2.8		4.3	5.3	245	
SOURCE ?	05-oct-78		398				62		4.6	3.6		2.8	0.5	217	
SOURCE 2627	12-fév-80	26.2	475	8.8	428	0.36	120	1.2	1.3	2.6	9.9	7	2	283	
SOURCE 2330	29-fév-80	21.0	444	8.6										284	
SOURCE 2252	29-fév-80	21.0	575	9.1			165							378	
SOURCE 2248	29-fév-80	21.0	602	9.1										397	
SOURCE 2243			678	9.1									3	464	
SOURCE 2158	29-fév-80	21.0	536	9.2										344	
SOURCE 2152	29-fév-80	20.0	531	9.2										343	
SOURCE 2149	29-fév-80	20.0	542	9.1										351	
SOURCE 2146	29-fév-80	21.0	554	9.1			158						1	366	
SOURCE 2142	29-fév-80	21.0	606	9.1										400	
SOURCE 2137	29-fév-80	21.0	682	9.1			169			1			0.6	450	
SOURCE 1489	29-fév-80	20.0	678	9.0			198						4	452	
SOURCE 1474	03-mar-79	20.8	739	9.1					0.5	2.4				521	
SOURCE 1443	29-fév-80	20.5	656	9.0										423	
SOURCE 1435	29-fév-80	19.0	572	9.0			135			2	6.7	2	6	343	
SOURCE 1431	29-fév-80	19.0	572											360	
SOURCE 1427	29-fév-80	20.2	572	8.9										360	
SOURCE 1419	03-mar-79	19.3	558	8.9			165						6	356	
SOURCE 1280	10-mai-77		746	8.9								5	3.2	503	9.3
FORAGE X3	13-sep-79	13.4	888	8.8	591		242			12		3.1	0.5	635	
VATSERET 1 ?	07-oct-80		472	7.9			124		6.7	16		2.3	23	300	
VATSERET 2 ?	07-oct-80		475	8.0			109		5	31		2.2	21	300	
FORAGE X1	28-aoû-79	7.2	308	7.7	212		2.9			47		0.1	17	212	
LAC ZEUZIER	28-aoû-79	5.4	125	7.9	95		0.6			23		0.1	7.8	91	
SOURCE AROLLES	28-nov-80	<10	266	7.9			1.3		10	43		0.1	30	146	
SOURCE VATSERET	28-nov-80	<10	282	7.6			1.6		12	43		0.1	39	145	1.6
SOURCE STUMP	13-nov-80	<10	318	7.1			1.8		16	45		0.3	56	146	1.6

Tableau 3 : Analyses chimiques partielles des venues d'eau du tunnel, des forages X/1 et X/3, du lac de Tseuzier et de quelques sources froides de la région (BIANCHETTI, en préparation).

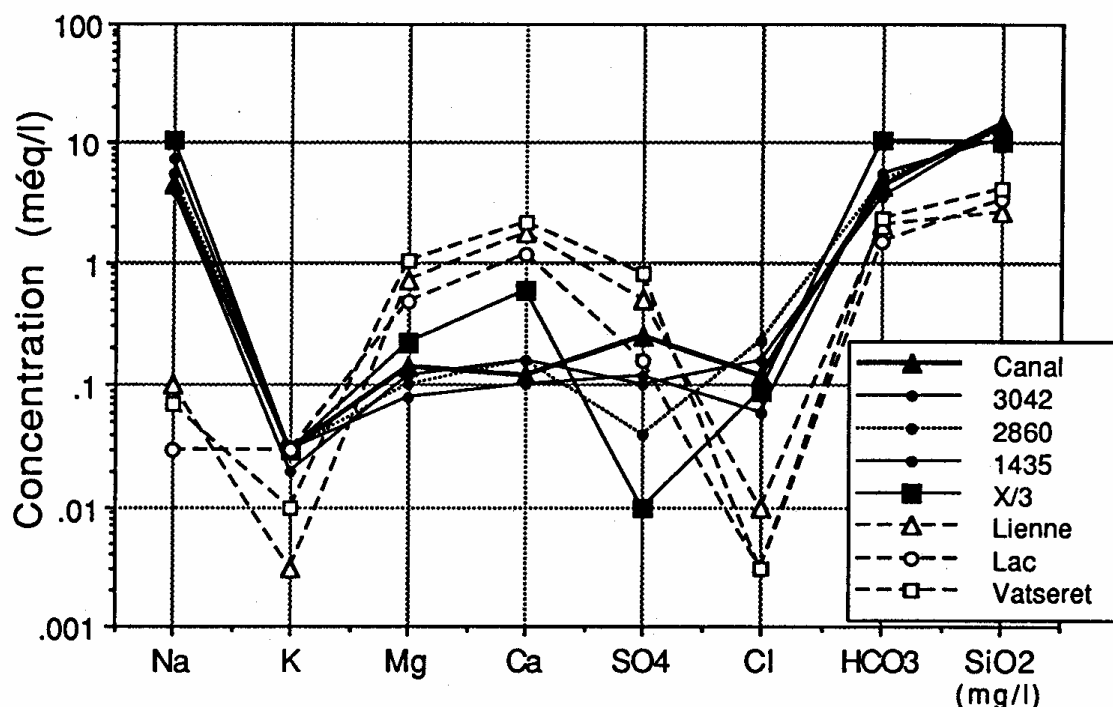


Figure 6 : Représentation avec diagramme de Schoeller de la concentration des ions principaux et de la silice des eaux du tunnel et de la région. Les eaux du tunnel et du forage X/3, dont la minéralisation dépend presque entièrement du sodium et du bicarbonate, se distinguent nettement des eaux froides de l'aquifère karstique de l'Urgonien et des eaux de surface (torrent Lienne, lac de Tseuzier et source de Vatseret). Les eaux bicarbonatées-sodiques thermales représentent probablement une évolution par échange cationique des eaux bicarbonatées-calciques.

Parmi les eaux de type Na ; HCO₃, celles recoupées dans les formations du Dogger sont les plus minéralisées, alors que les eaux du Malm, plus chaudes, deviennent de moins en moins minéralisées lorsqu'on s'éloigne du Dogger (figure 7). En général, les eaux les plus chaudes sont moins basiques et moins minéralisées ; par contre, les teneurs en fluor augmentent avec la température.

5. Interactions eau-roche

Le chimisme particulier des eaux thermales de la région du Rawyl n'est pas comparable à d'autres eaux dans les Alpes. En Suisse, elles se rapprochent des sources d'Unterreichstein et Walzenhausen dans le canton d'Appenzell Rhodes extérieures, situées dans la Molasse en bordure nord des Alpes (HÖGL 1980 ; BADOUX 1982a). Les eaux profondes rencontrées dans

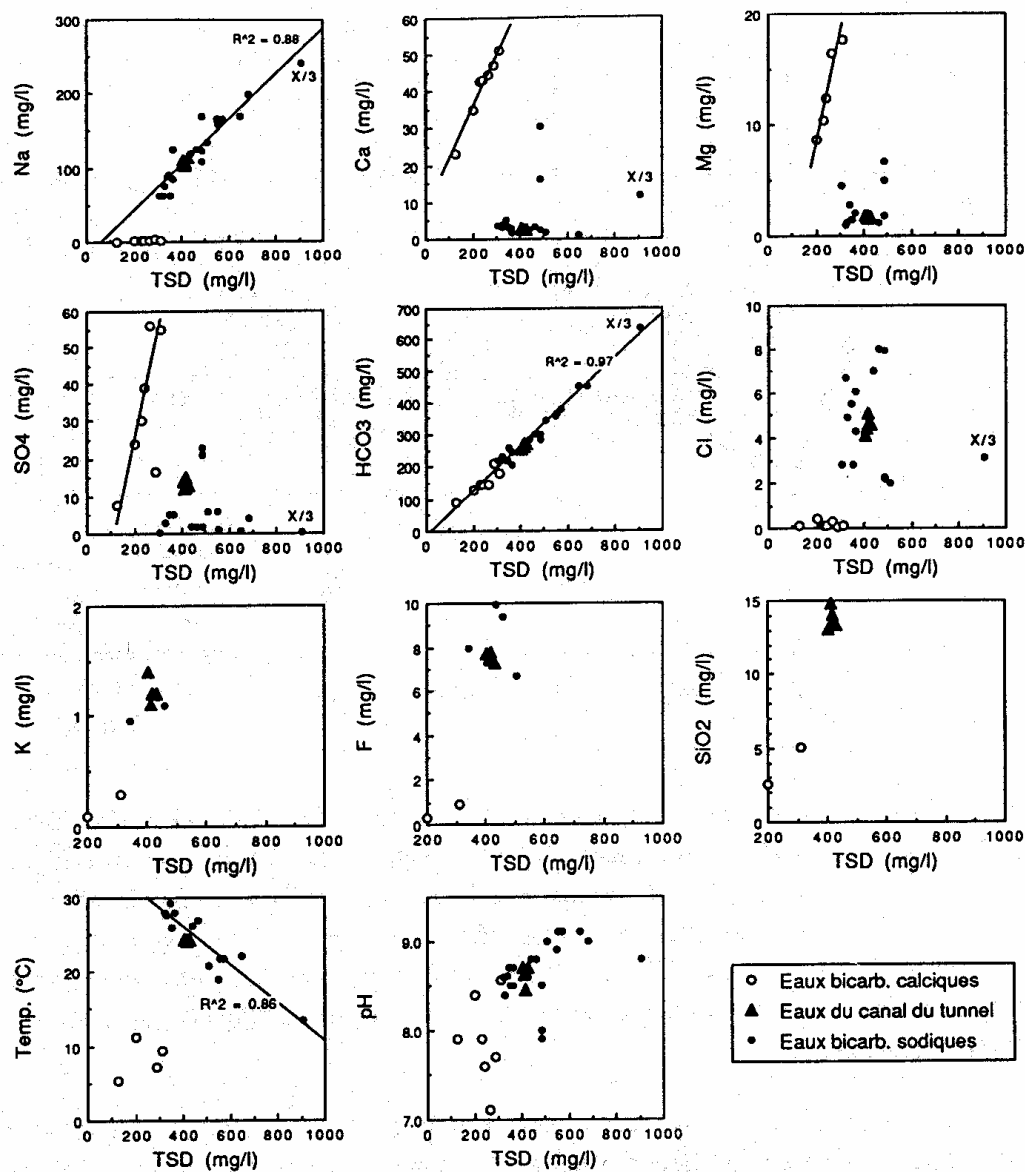


Figure 7 : Comportement des paramètres principaux en fonction de la minéralisation totale (TSD). La plupart des sources représentées n'ont été analysées qu'une seule fois, alors que l'eau du canal l'a été 4 fois. Entre les eaux du tunnel et du forage X/3, de type bicarbonaté-sodique (•), un système de mélange peut être mis en évidence (diagrammes Na/TSD et HCO₃/TSD). Le pôle faiblement minéralisé est représenté par les eaux les plus chaudes, qui proviennent des calcaires fissurés et karstifiés du Malm. Les eaux du pôle plus minéralisé sont les moins chaudes et proviennent des formations marno-calcaires du Dogger. Sur le diagramme HCO₃/TSD, les eaux froides de type bicarbonaté-calcique (○) et les eaux subthermales et thermales de type bicarbonaté-sodique (•) s'alignent sur une même droite de corrélation. Cette observation tend à démontrer que toutes ces eaux ont une origine commune.

l'aquifère de la Molasse marine supérieure (grès calcaires) dans la région du Plateau, sont aussi bicarbonatées-sodiques mais nettement plus minéralisées (BALDERER 1990 ; SCHMASSMANN 1990). Les eaux captées par le forage profond Reine Hortense à Aix-les-Bains (Savoie), dans des calcaires du Jura (Malm) sont sulfureuses, peu minéralisées (400 à 500 mg/l) et avec de fortes teneurs en Na et HCO_3 . Toutefois, les teneurs en calcium, sulfate et chlorure sont plus élevées que celles des eaux thermales du Rawyl (VUATAZ, communication personnelle). Pour conclure, BADOUX (1980) constate une ressemblance chimique (faible minéralisation, Na, H_2S) avec les eaux thermales peu minéralisées des Pyrénées, qui circulent dans un contexte essentiellement cristallin.

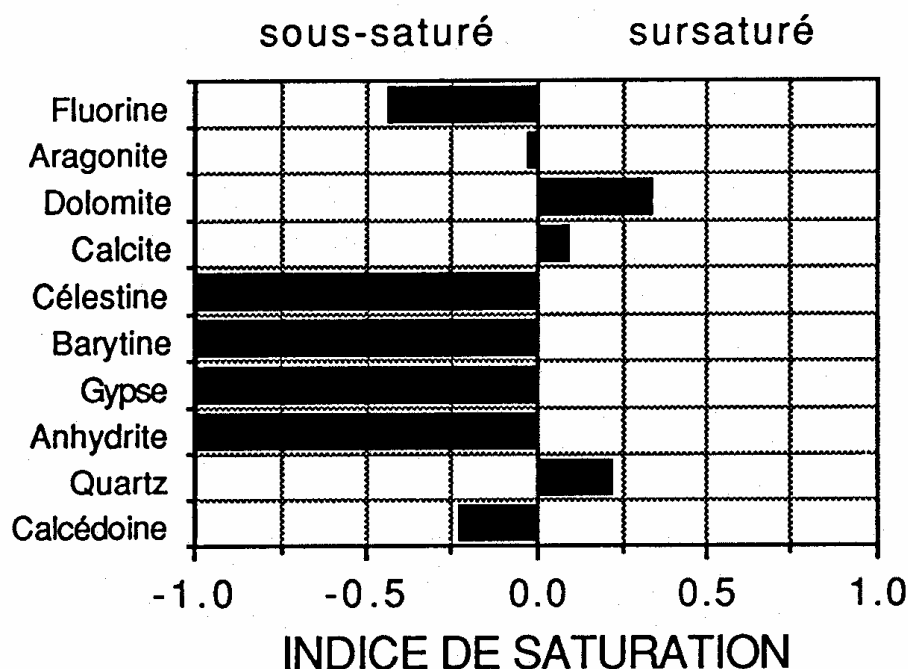
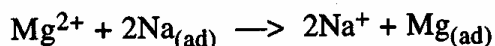
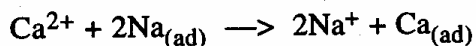


Figure 8 : Degré de saturation de l'eau du canal par rapport à différents minéraux (BIANCHETTI, en préparation). Les indices de saturation ont été calculés avec le programme PHREEQE (PARKHURST et al. 1980). Les principaux minéraux carbonatés sont à l'équilibre ou faiblement sursaturés, alors que la fluorine est sous-saturée malgré les fortes teneurs en fluor dans l'eau.

Les eaux thermales du tunnel sont saturées par rapport aux principaux minéraux carbonatés (figure 8). Par contre elles sont sous-saturées par rapport à la fluorine : les fortes teneurs en fluor ne proviennent donc pas de la dissolution de ce minéral. Pour expliquer l'origine de ces eaux, une hypothèse qui s'adapte au contexte géologique et hydrogéologique régional a été présentée (CRSFA 1991). Les eaux d'infiltration, bicarbonatées-calciques, évoluent progressivement vers une composition sodique par échange cationique au cours d'un long séjour souterrain dans les séries sédimentaires. La présence d'épaisses formations marneuses

marines permet d'envisager le remplacement progressif du calcium et du magnésium des eaux d'infiltration par le sodium contenu dans la structure moléculaire des argiles, selon les réactions suivantes (FREEZE & CHERRY 1979) :



où (ad) représente le cation adsorbé par les argiles; le processus d'adsorption a pour effet de fortement abaisser les teneurs en calcium et magnésium dissous.

Les carbonates sont mis en solution en présence du CO_2 dissous dans l'eau lors de l'infiltration. Ensuite, un apport supplémentaire de HCO_3^- peut être dû à l'oxydation de la matière organique, présente dans les marnes, par les sulfates, selon la réaction suivante (FREEZE & CHERRY 1979) :



Cette réaction permet d'expliquer en même temps la présence d'hydrogène sulfuré dans les eaux du tunnel. Toutes ces réactions entraînent une augmentation du pH de l'eau et aboutissent à des eaux caractérisées par de très faibles teneurs en calcium, magnésium et sulfate.

Dans l'eau du canal, l'hydrogène sulfuré est par contre complètement absent, en raison du dégazage et de l'oxydation de l'eau qui intervient dans le tunnel lors du trajet à l'air libre. Une augmentation de la teneur en sulfates dissous par rapport à l'eau des sources est alors observée (CRSFA 1991). Les teneurs élevées en ammonium et nitrites ne sont pas d'origine anthropogène, le contraire aurait pu indiquer un mélange avec des eaux de surface. Il s'agit d'éléments originels propres à l'eau thermale. En effet, en milieu anaérobique, confirmé par le caractère réduit de ces eaux, les nitrates peuvent être réduits en nitrites, grâce à des bactéries de type *Pseudomonas* qui jouent le rôle de catalyseur lors de cette réaction (LLOYD & HEATHCOTE 1985). La présence de ce type de bactéries dans l'eau du canal a été décelée (CRSFA 1991). L'absence de germes fécaux (coliformes et entérocoques) dans l'eau du canal constitue un argument supplémentaire pour exclure l'origine anthropogène de l'ammonium et des nitrites.

D'autres hypothèses ont été proposées pour expliquer l'origine des eaux thermales du Rawyl :

- Circulation dans des roches cristallines profondes, sur la base d'une similitude chimique avec certaines eaux thermales des Pyrénées (BADOUX 1980). Cette hypothèse impliquerait une remontée des eaux du Rawyl depuis le socle cristallin, qui, dans la région, se situe à une profondeur de l'ordre de 5-6 kilomètres (EPARD & MASSON 1988). L'infiltration des eaux à cette profondeur pourrait être envisagée, grâce à des failles régionales qui atteignent probablement le socle (failles du Wildhorn et d'Iffigen). Toutefois, les teneurs en silice,

tungstène, lithium, césium et rubidium, éléments caractéristiques du cristallin, sont trop faibles pour envisager une circulation dans ce type de roches. Le calcul de la température atteinte en profondeur au moyen des géothermomètres ne confirme pas la température élevée ($> 100^{\circ}\text{C}$), que les eaux devraient atteindre à ces profondeurs.

- Evolution, par échange ionique, d'eaux fossiles de composition chimique sulfatée-calcique (BADOUX 1982a). L'absence d'évaporites triasiques dans les nappes du Wildhorn et de Diablerets ne permet pas d'envisager ce type de chimisme pour les eaux de la région étudiée. D'autre part, la minéralisation relativement élevée qui caractérise les eaux de type Ca ; SO_4 contraste avec la faible minéralisation des eaux bicarbonatées-sodiques du tunnel.

6. Caractéristiques isotopiques et géothermométrie

6.1. Tritium et temps de séjour souterrain

Les teneurs en tritium de sept sources du tunnel et du forage X/3 ont été mesurées en 1981 (CRSFA 1991) et quatre analyses de l'eau du canal ont été réalisées en 1990 (tableau 4). Les teneurs en tritium des sources (0 à 24 UT) sont faibles comparées à celles des précipitations à la même période (90 ± 20 UT). Elles indiquent des temps de séjour souterrain longs, avec infiltration des eaux avant 1953 pour les sources du Synclinal du Lac. En général les eaux sont de plus en plus anciennes au fur et à mesure de la pénétration dans le massif. L'eau du forage X/3 (82 UT) pourrait être âgée de 8 à 10 ans (BADOUX 1983). Les teneurs de l'eau du canal en 1990 sont faibles (10-12 UT). Elles indiquent qu'une grande majorité des eaux drainées par le tunnel s'est infiltrée avant 1953.

Point-prélevé	3042	2860	2627	2330	2243	2152	1489	canal (moyenne)
Date	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1981	1990
TRITIUM (UT)	7,6	0,3	5,3	16,2	11,0	24,5	11,3	$11,0 \pm 1,2$
Débit (l/mn)	890	272	13	100	12	18	10	1200 ± 100
Température ($^{\circ}\text{C}$)	29,9	27,0	26,2	21,2	21,6	21,7	20,2	$24,3 \pm 0,1$
HCO_3 (mg/l)	223	300	283	284	464	343	452	268 ± 3

Tableau 4 : Teneurs en tritium des principales sources du tunnel (en 1981) et dans le canal (1990). La teneur moyenne en tritium du canal a été calculée sur la base de 4 analyses. Aucune corrélation n'a pu être mise en évidence entre le tritium et les paramètres physico-chimiques.

6.2. Isotopes stables de l'eau et altitude du bassin d'alimentation

A partir des quatre analyses d'oxygène-18 et deutérium réalisées en 1990 on obtient les valeurs moyennes suivantes :

Oxygène-18 : $-15,33\text{‰} \pm 0,11$ et deutérium : $-108,7\text{‰} \pm 0,8$

L'altitude d'infiltration moyenne des eaux du tunnel peut être estimée entre 2300 et 3000 m, en utilisant les relations de VUATAZ (1982) et de KULLIN & SCHMASSMANN (1991). Ces valeurs correspondent assez bien à l'altitude moyenne du bassin-versant supposé des eaux thermales, situé probablement dans les régions du Col du Rawyl et du glacier de la Plaine Morte. Les valeurs d'oxygène-18 des eaux de surface et de la neige de ces régions sont assez proches de celles des eaux du tunnel. Des teneurs moyennes de $-15,74\text{‰}$ (Rawylseeleni, altitude 2490 m) et de $-15,24\text{‰}$ (glacier de la Plaine Morte, altitude 2770 m) ont été mesurées (SCHÖTTERER et al. 1978 ; WILDBERGER 1981).

Les eaux thermales s'alignent sur la droite mondiale des eaux météoriques (CRAIG 1961), ce qui indique une origine météorique non modifiée. Toutefois, un faible excès en deutérium est systématiquement apparu au cours des quatre analyses de 1990 (figure 9). Les valeurs de $d = \delta D - 8 \times \delta^{18}O$ varient entre 12,4 et 16,3, au lieu de la constante $d = 10$ propre à la relation de Craig. Ce phénomène, qui a été mis en évidence avec d'autres eaux thermales (Bovernier, section nord du tunnel du Simplon, Bad Ragaz; BIANCHETTI, en préparation) ne peut pas être expliqué par une influence de précipitations d'origine méditerranéenne.

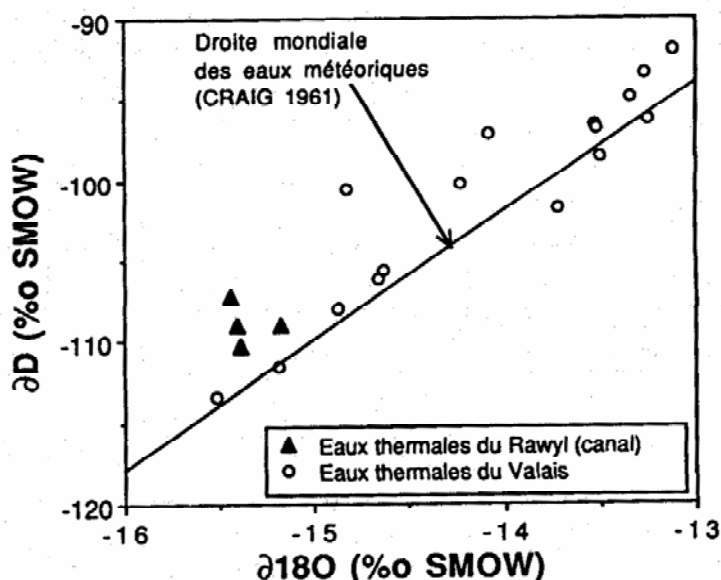


Figure 9 : Deutérium et oxygène-18 dans les eaux du canal comparé à d'autres eaux thermales du Valais (BIANCHETTI, en préparation). Les eaux thermales du tunnel du Rawyl ne s'alignent pas parfaitement sur la droite mondiale des eaux météoriques.

6.3. Température en profondeur

Seuls les géothermomètres Na/K et K²/Mg (ARNORSSON et al. 1983 ; GIGGENBACH et al. 1983) donnent des valeurs de température cohérentes avec le modèle hydrogéologique local. Les calculs montrent que la température du dernier équilibre chimique des eaux thermales n'est probablement pas très élevée (30 à 40°C), donc semblable ou légèrement supérieure aux températures des sources les plus chaudes (3042 et 2860). La base du circuit profond des eaux thermales ne doit pas se trouver très loin au-dessous du tunnel, à une profondeur estimée à 400-500 m, calculée avec un gradient géothermique de 25°C/km. Cette profondeur s'accorde assez bien avec la situation des terrains peu perméables qui pourraient constituer la base de l'aquifère thermal (schistes argileux de l'Aalénien, figure 10).

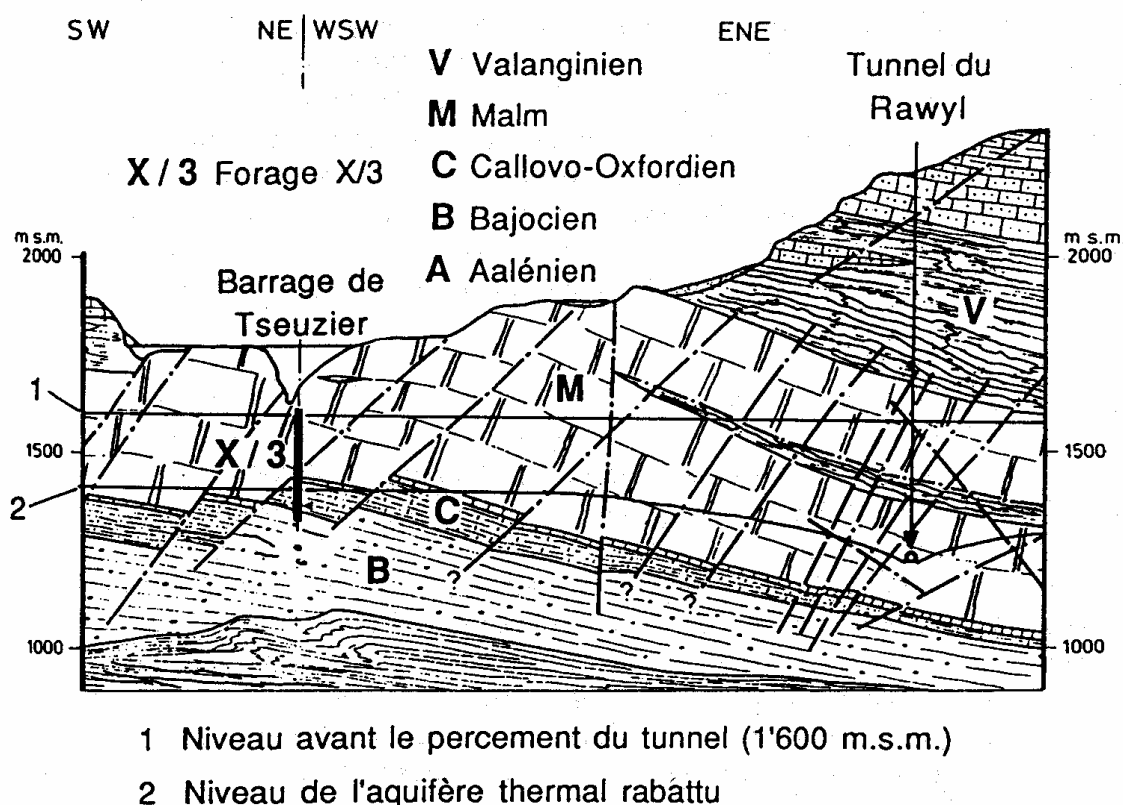


Figure 10 : Profil géologique entre le barrage de Tseuzier et le tunnel, avec situation du forage X/3 (d'après SCHNEIDER 1982). Le tunnel et le forage X/3 ont drainé des eaux bicarbonatées sodiques sous pression provenant d'un même aquifère captif. Les niveaux statiques hypothétiques de la nappe thermique captive avant (1) et après le percement du tunnel (2) ont été représentés.

7. Caractéristiques du système d'écoulement profond

Les eaux thermales drainées par le tunnel du Rawyl proviennent d'un aquifère fissural captif qui n'a pas d'exutoire naturel visible en surface. Cet aquifère se localise principalement dans les fractures des séries calcaires et marno-calcaires du Dogger et du Malm inférieur et moyen (figures 3 et 10). Les circulations d'eau les plus importantes sont associées à des zones de fractures ouvertes subverticales dans le Malm, observées dans le tunnel. L'aquifère captif est limité vers le haut par d'épais niveaux imperméables représentés par les calcaires massifs du Malm supérieur et par les marnes du Valanginien (figure 2). L'imperméable inférieur n'est pas connu, mais se situe vraisemblablement moins d'un km plus bas. Il pourrait être représenté soit par les schistes argileux de l'Aalénien de la nappe du Wildhorn, soit par les sédiments peu perméables tertiaires sous-jacents appartenant à la nappe des Diablerets.

Les données isotopiques montrent que la zone de recharge de l'aquifère thermal captif est assez élevée (2300 à 3000 m). Elle pourrait se situer dans la région des plateaux calcaires du col du Rawyl, de la Plaine Morte et de son glacier, quelques kilomètres au NNE du tunnel. Dans ces régions l'infiltration est favorisée par de nombreuses pertes karstiques qui permettent d'alimenter l'aquifère karstique froid dans l'Urgonien. La présence de failles régionales kilométriques (faille d'Iffigenfall, faille du Wildhorn) et du réseau de fractures associées, qui se prolongent à des profondeurs de plusieurs kilomètres, permettrait aux eaux d'infiltration d'atteindre plus bas l'aquifère thermal captif (figure 3). D'autres zones d'infiltration pourraient se situer dans les calcaires du Malm dans la région des Outannes, au nord de Sierre (WILDBERGER, communication personnelle). Les circulations sont lentes et au moins 40 ans s'écoulent entre l'infiltration en altitude et la sortie au niveau du tunnel.

8. Potentiel géothermique

Avec une température de 24,3°C et un débit de 1200 l/mn, l'eau du canal pourrait être exploitée pour du chauffage avec des pompes à chaleur. La puissance thermique disponible, calculée avec un refroidissement arbitrairement fixé à 10°C, serait de 1,2 MW_t. Pour augmenter cette puissance, une solution onéreuse consisterait à capter uniquement les sources de la partie profonde du tunnel, et plus précisément les sources 3042, 2860 et 2830. Le débit serait alors d'environ 1050 l/mn à une température de 28,8°C et la puissance thermique atteindrait 1,4 MW_t. Cette solution nécessite la mise en place d'un système d'aération pour pouvoir accéder aux captages et la pose d'une conduite isolée de 2800 mètres dans le tunnel. Toutefois, les utilisateurs potentiels les plus proches se trouvent à plus de 2 km du portail, ce qui rend l'exploitation thermique des eaux du tunnel peu rentable.

Par contre, une société envisage d'exploiter les eaux du tunnel pour alimenter un centre thermal à construire dans la région de Montana. Ce projet consiste à pomper les eaux, depuis le portail du tunnel (1180 m d'altitude), jusqu'au plateau de Montana (environ 1300 m d'altitude), d'où elles seraient acheminées par gravité vers le futur établissement thermal. Malgré un parcours d'au moins trois kilomètres, les conduites devraient être dimensionnées pour transporter la totalité de l'eau disponible et non seulement le débit nécessaire au

remplissage des piscines, ce qui permettrait d'utiliser les eaux avec des pompes à chaleur pour chauffer l'eau des piscines, l'eau sanitaire et les bâtiments.

9. Conclusions

Le tunnel du Rawyl a démontré l'existence d'une karstification importante jusqu'à alors inconnue dans des formations calcaires profondes de la nappe du Wildhorn. La recharge de la nappe thermique captive est possible grâce à des fractures régionales qui permettent aux eaux d'infiltration d'atteindre des profondeurs de plusieurs km. Les volumes d'eau captés dans les calcaires karstifiés sont considérables, de l'ordre du demi million de m³ par an. D'épaisses formations marneuses peu perméables permettent de confiner ces eaux et de mettre en charge l'aquifère. Les résultats des investigations du tunnel du Rawyl pourraient être extrapolés à l'ensemble des nappes helvétiques calcaires, lorsque des conditions hydrogéologiques similaires sont observées. Ces conditions sont les suivantes : zone d'infiltration permettant d'alimenter un aquifère profond, présence de formations calcaires situées en profondeur à composition essentiellement carbonatée (Urgonien, Malm), fissuration importante de celles-ci (anticlinal, faille régionale) et existence d'épaisses assises marneuses peu perméables qui limitent ces formations calcaires. Il est ainsi possible d'envisager une prospection géothermique par forages profonds dans des régions situées sur le versant au nord du Rhône et caractérisées par la totale absence d'émergences thermales.

Remerciements

Nos remerciements s'adressent au Dr. F.-D. Vuataz, responsable scientifique du programme GEOTHERMOVAL auprès du Centre de Recherches Scientifiques Fondamentales et Appliquées de Sion (CRSFA), pour les suggestions et remarques intéressantes qui ont permis d'améliorer le manuscrit. Le texte a profité également d'une lecture critique de la part du Professeur F. Jaffé du Département de Minéralogie de l'Université de Genève, et du Dr. A. Wildberger du bureau Dr. von Moos AG à Zürich. Le CRSFA a mis à disposition la documentation concernant les mesures réalisées dans le tunnel du Rawyl. Cette étude a été financée par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique, projets No. 21-26632.89 et 20-31186.91, ainsi que par le CRSFA, programme GEOTHERMOVAL.

Références

- ARNORSSON S., GUNNLAUGSSON E. & SVAVARSSON H. 1983 : The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 567-577.
- BADOUX H. 1980 : Remarques sur les sources thermales bicarbonatées sodiques de l'Europe occidentale. – *Service des Routes Nationales, Sion, 3p., non publié.*
- BADOUX H. 1982a : Des événements de Zeuzier et de la galerie du Rawyl RN6. – *Bull. technique de la Suisse Romande, SIA, 12, 155-167.*

- BADOUX H. 1982b : Route nationale N6 - Galerie du Rawyl. Remarques sur le chimisme des sources de la galerie. – *Service des Routes Nationales, Sion, non publié.*
- BADOUX H. 1982c : Rapport hydrogéologique sur le comportement des sources valaisannes proches du tunnel du Rawyl d'octobre 1972 à septembre 1982. – *Service des Routes Nationales, Sion, 9 p., non publié.*
- BADOUX H. 1983 : Hydrogéologie de la galerie du Rawyl. – *Service des Routes Nationales, Sion, 8 p., non publié.*
- BADOUX H. 1984 : Relations galerie de sondage du Rawyl - barrage de Zeuzier. – *Service des Routes Nationales, Sion, 20 p., non publié.*
- BADOUX H. 1986 : Galerie 1200 du Rawyl. Courbes et cumulées des venues d'eau. – *Service des Routes Nationales, Sion, non publié.*
- BALDERER W. 1990 : Paleoclimatic trends deduced in groundwaters within Swiss Molasse basin as evidence for the flow systems definition. – *In Water resources in mountainous regions, Mém. XIInd Congress IAH, XXII, 1, 731-740.*
- BIANCHETTI G. en préparation : Circulations profondes dans les Alpes : hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de la Haute vallée du Rhône (Valais, Suisse et régions alpines limitrophes). – *Thèse d'hydrogéologie, CRSFA-CHYN.*
- CRAIG H. 1961 : Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen 18 in natural waters. – *Science, 133, No 3467, 1833-1834.*
- CRSFA 1991 : Sources thermales du tunnel du Rawyl. Rapport géothermo-hydrogéologique. – *Rapport CRSFA/91.33, 15 p., non publié.*
- CRSFA 1992 : Programme GEOTHERMOVAL : recherche et mise en valeur des ressources géothermiques du Valais. Phase I, rapport final. Synthèse. – *Rapport CRSFA/92.02, 35 p., non publié.*
- EPARD J.L. & MASSON H. 1988 : Le contact socle-couverture dans la dépression du Rawyl. – *Bull. du Programme National de Recherche 20, 6, juin 1988, 20 p.*
- FREEZE R.A & CHERRY J. A. 1979 : Groundwater. – *Prentice Hall, New Jersey, 604 p.*
- GIGGENBACH W. F., GONFIATINI R., JANGI B. L. & TRUESDELL A. H. 1983 : Isotopic and chemical composition of Parbati Valley geothermal discharges, NW Himalaya, India. – *Geothermics, 12, 199-222.*
- HÖGL O. 1980 : Die Mineral-und Heilquellen der Schweiz. – *Haupt, Bern, 302 p.*
- KULLIN M. & SCHMASSMANN H. 1991 : Infiltration conditions. In PEARSON et al. 1991 : Applied isotope hydrogeology. A case study in northern Switzerland. – *Studies in Environmental Sciences 43. Elsevier, Amsterdam, 65-116.*
- LLOYD J. W. & HEATHCOTE J. A. 1985 : Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. An introduction. – *Clarendon Press - Oxford, 296 p.*
- PARKHURST D. L., THORSTENSON D. C. & PLUMMER L. N. 1980 : PHREEQE - A computer program for geochemical calculations. – *U.S. Geological Survey Water. Resources Investigations, 80-96.*

PAVONI N. 1980 : Comparison of focal mechanisms of earthquakes and faulting in the Helvetic zone of the Central Valais, Swiss Alps. – *Eclogae geol. Helv.*, 70/2, 351-370. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.*, 116, 317-320.

SCHOTTERER U., WILDBERGER A., SIEGENTHALER U., NABHOLZ W. & OESCHGER H. 1978 : Isotopes study in the alpine karst region of Rawyl (Switzerland). – *IAEA - Symp. Isotope Hydrol.*, Neuherberg/München,

SCHMASSMANN H. 1990 : Hydrochemische Synthese Nordschweiz : Tertiär- und Malm-Aquifere. – *Nagra Techn. Bericht NTB 88-07*, Nagra, Baden.

SCHNEIDER T. 1982 : Comportement anormal du barrage-voûte de Zeuzier. Aspects géologiques du comportement extraordinaire du barrage de Zeuzier. – *Wasser Energie Luft*, avril 1982, 81-94.

VUATAZ F.-D. 1982 : Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. – *Matér. Géol. Suisse, sér. Hydrol.*, 29, Kümmerly & Frey, Berne, 174 p.

WILDBERGER A. 1981 : Zur Hydrogeologie des Karstes im Rawyl-Gebiet. *Beitr. Geol. – Schweiz - Hydrol.*, 27, Kümmerly & Frey, Bern, 175 p.