

# La grotte du Chaudron

## Eine Thermalquelle im Karst von Derborence

### *Une source thermique dans le karst de Derborence (VS)*

Das Interesse des Spéléo-Club Jura an der Region Derborence geht auf die Sechzigerjahre zurück (Vouillamoz 1968). Seit dieser Zeit haben mehrere Höhlenforschergenerationen die Forschungsarbeiten in dieser wunderbaren Region voran getrieben. Die Grotte du Chaudron (A2) wurde im Frühling 2001 bei einem Besuch der Quellen der Airette entdeckt. Wir erforschten damals einen grossen Teil der Höhle. Da wir das geeignete Material nicht hatten, liessen wir gewisse Gänge beiseite.

Wir kommen im Frühling 2002 zurück und erforschen die Höhle vollständig. Wie vermessen die Höhle und nehmen verschiedene Wasserproben. Nach einer Analyse des Wassers erweist es sich als Thermalwasser. Eine Messsonde wird im Oktober 2002 eingerichtet, damit während des Winters der Pegel, die Temperatur und die Leitfähigkeit des Wassers registriert werden können. Diese Daten zeigen, dass unter gewissen hydrologischen Bedingungen der Temperaturverlauf des Wassers stark mit den terrestrischen Gezeiten korreliert. Es wird ein Model für das Funktionieren der Quelle vorgeschlagen.

#### Lage

Das Tal von Derborence bildet ein Einzugsgebiet von circa 6200 ha (Kuonen 2000). Das Tal wird im Norden vom Massiv Les Diablerets, im Westen von der Tête à Pierre Grept und die Haut de Cry, im Osten vom Mt. Gond und südlich vom Rhonetal begrenzt. Die Schlucht der Lizerne schliess das Tal im Südosten und verbindet die Gegend von Derborence (1350 m) mit dem Rhonetal (495 m). Beinahe alle bekannten Ausflüsse befinden sich in dieser Schlucht (Abb. 1).

Die Quellen erreicht man entweder durch Folgen des Baches von Derborence (Servaplane) aus oder durch Absteigen durch die Felsen der Westflanke von der Stelle, die l'Airette genannt wird (1205 m, Abb. 2).

Die Quelle l'Airette/A1 (Abb. 3) und die Grotte du Chaudron/A2 bilden die wichtigsten Karsterscheinungen und befinden sich auf dem Gebiet der Gemeinde Ardon, auf einer Höhe von etwa 900 m.

Die Höhle beginnt in der Westflanke der Schucht (rechtes Ufer) ungefähr 5 Meter über der Lizerne. Der

L'Intérêt porté au site de Derborence par le Spéléo-Club Jura remonte aux années soixante (Vouillamoz 1968). Depuis lors, plusieurs générations de spéléos ont poursuivi les travaux d'exploration dans cette magnifique région. La découverte de la Grotte du Chaudron (A2) a eu lieu au printemps 2001 lors d'une visite aux sources de l'Airette. Nous explorons alors une grande partie de la cavité mais n'ayant pas le matériel adapté nous délaissions certains conduits.

De retour au printemps 2002, nous explorons et topographions intégralement la grotte, et prélevons différents échantillons d'eau. Après analyse, l'eau récoltée dans la grotte révèle qu'elle présente toutes les caractéristiques d'une eau de source thermique. Au mois d'octobre 2002, une sonde est placée afin de suivre l'évolution du niveau, de la température et de la conductivité de l'eau dans la grotte durant la période hivernale. Ces données démontrent que dans certaines conditions hydrologiques, la température de l'eau est fortement corrélée avec les marées terrestres. Un modèle de fonctionnement de la source est proposé.

#### Situation

La vallée de Derborence constitue un bassin versant d'environ 6200 ha (Kuonen 2000). Ses limites sont au nord le massif des Diablerets, à l'ouest la Tête à Pierre Grept et le Haut de Cry, à l'est le Mt. Gond et au sud la Vallée du Rhône. Les gorges de la Lizerne ferment ce bassin au sud-est en reliant le cirque de Derborence (1350 m) avec la vallée du Rhône (495 m). La quasi totalité des exutoires connus s'ouvrent dans ces gorges (fig. 1).

L'accès aux sources peut s'effectuer soit en suivant à pied le torrent depuis Derborence (Servaplane) soit en descendant les falaises du flanc ouest depuis le lieu dit de l'Airette (1205 m, fig. 2).

La source de l'Airette/A1 (fig. 3) et la Grotte du Chaudron/A2 forment les phénomènes karstiques principaux et se situent sur le territoire de la Commune d'Ardon, à une altitude voisine de 900 m.

La grotte s'ouvre sur le flanc ouest des gorges (rive droite) environ 5 mètres en dessus de la Lizerne. L'orifi-

- V. Chopard (SCJ),
- D. Linder (SCJ),
- J. Farine (GS-Tro),
- J. Perrin (SCVJ),
- E. Weber (SCJ)

#### Übersetzung:

Marie et  
Jean-Louis Regez

Abb. 1: Lage der Ausflüsse des Val Dorbon in der Lizerneschluchten (VS). Abkürzungen gemäss Tabelle 1.

Fig. 1: Situation des exutoires du Val Dorbon dans les Gorges de la Lizerne (VS). Abbréviations selon le Tableau 1.



Abb. 2: Abseilen zur Airette-Quelle. Von der gegenüberliegenden Seite aus gesehen, erscheint diese Felsplatte als bequemer Pfad (Abb. 3)!

Fig. 2: Descente en rappel à la source de l'Airette. Vue d'en face, cette dalle semble dotée d'un sentier confortable (fig. 3)!



Abb. 4: Lage der Höhle A2 in der Lizerneschlucht. Die Airette Resurgenz befindet sich am linken Bildrand, hinter den Bäumen.

Fig. 4: Situation de la grotte A2 au fond des gorges de la Lizerne. La résurgence de l'Airette se situe à l'extrémité gauche de la photo, derrière la zone d'arbres.

ce est bien visible sur une vire éboulée au pied de la falaise (fig. 4).

## Description

La figure 5 montre la topographie de la cavité. Après avoir franchi la voûte d'entrée (3.0 m x 0.70 m), on se trouve dans un boyau remontant qui se rétrécit. La zone d'entrée a nécessité quelques aménagements étant donné que plusieurs blocs mêlés de graviers encombraient le passage.

Après cinq mètres le conduit devient exigü, une étroiture en boîte-aux-lettres remontante permet d'accéder à une courte et étroite galerie s'agrandissant progressivement. La progression dans ce niveau de conduits se termine dans une chambre. Seuls des diverticules impénétrables se prolongent sur encore quelques mètres.

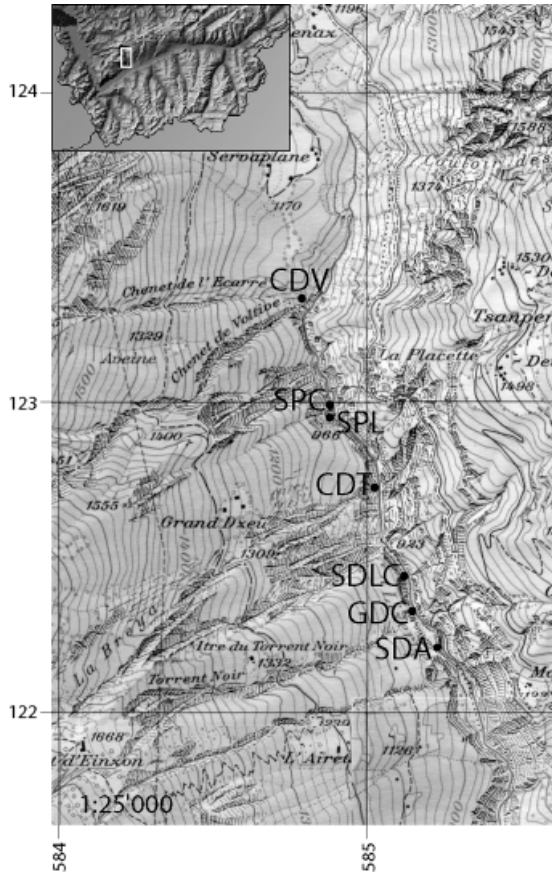
La chambre constitue le sommet d'un puits d'une dizaine de mètres de hauteur, au bas duquel on rencontre un écoulement souterrain. L'eau sort d'une faille d'un bon mètre de largeur au pied du P10. A priori le conduit s'enfoncé rapidement en profondeur. L'eau qui en remonte constitue certainement la totalité du débit observé. La sonde de mesure mentionnée plus loin fut positionnée à cet endroit (fig. 6).

Une fois sortie de ce siphon (principal), l'eau s'écoule environ 5m en aval (à l'est). Après une petite chambre, la voûte s'abaisse jusqu'à former un deuxième siphon. Ce dernier est proche du torrent de la Lizerne (8 à 10 m). Toutefois nous n'avons pu déterminer l'endroit où l'eau qui se perd dans le 2<sup>ème</sup> siphon réapparaît à l'extérieur.

En bas du P10 et juste en dessus du siphon principal, un conduit sec se développe en direction de l'ouest. Il aboutit après 6 m sur une dernière nappe d'eau sans écoulement. Celle-ci constitue un second regard sur le siphon principal.

Abb. 3: Sicht von der Strasse aus, auf die 300 m weiter unten entspringende Airette-Quelle bei Hochwasser.

Fig. 3: Vue plongeante de la route sur la source de l'Airette en crue, 300 m plus bas.



Eingang befindet sich gut sichtbar auf einem Felsband mit Geröll am Fuss des Felsens (Abb. 4).

## Beschreibung

Die Abbildung 5 zeigt die Topographie der Höhle. Nach dem Gewölbe des Einganges (3.0 m x 0.70 m), befindet man sich in einem ansteigenden Gang, der sich verschmälert. Die Eingangsregion hat einige Einrichtungen bekommen, weil mehrere mit Kies vermischte Blöcke den Durchgang besetzt haben. Nach fünf Metern wird der Gang

eng, ein briefkastenartiger und ansteigender Schluf führt zu einem kurzen und engen Gang, der nach und nach grösser wird. Die Fortbewegung in diesem Gangstockwerk endet in einem Saal. Er hat nur unbegehbare kurze Seitengänge, die nach einigen Metern enden.

Der Saal befindet sich am oberen Ende eines Schachtes, der etwa zehn Meter tief ist. Am Boden dieses Schachtes stösst man auf ein unterirdisches Gewässer. Das Wasser fliesst aus einer ein Meter breiten Spalte am Boden des P10. Die gefüllte Spalte ist steil in die Tiefe gerichtet. Das ausfliessende Wasser entspricht der ganzen Abflussmenge. Die erwähnte Messsonde wurde an diesem Ort installiert (Abb. 6).

Nach dem Austritt aus diesem (Haupt-) Siphon, fliesst das Wasser ungefähr 5 m abwärts (nach Osten). Nach einem kleinen Saal senkt sich die Decke und bildet einen zweiten Siphon. Dieser befindet in der Nähe der Lizerne (8 bis 10 m). Es ist uns allerdings nicht gelungen, den Ort festzustellen, wo das Wasser vom zweiten Siphon nach draussen fliesst.

Am Boden des P10 und gleich über dem Hauptsiphon entwickelt sich ein Gang Richtung Westen. Dieser Gang führt nach 6 m zu einer stillen Wasserfläche. Diese bildet eine zweite Sicht auf dem Hauptsiphon.

Wenn man einige Meter der Lizerne gegen oben folgt, sieht man verschiedene kleine Löcher, die sich in derselben Schichtebene befinden. Nur zwei Eingänge können auf 12 m und 7 m begangen werden. Diese Gänge sind Bestandteil der Höhle A2, weil verschiedene Verbindungen mit Schall und Licht hergestellt werden konnten (siehe die Vermessung). Ein Luftzug kann bei den verschiedenen Eingängen beobachtet werden. Er könnte durch Austausch zwischen den Eingängen verursacht werden.

## Geologie

Die Schluchten der Lizerne schneiden den Normalschenkel der Morcle-Decke (Helvetikum). Die Schichten fallen steil in der Richtung der Schlucht ab und sind durch Falten verformt, die eine grosse Amplitude aufweisen und von ONO nach WSW gerichtet sind (Badoux 1971). Die Schichtreihe, die uns interessiert, ist die folgende:

**Aalénien:** dunkle tonhaltige Schiefer, erzeugen Erdstösche (z. B. der bekannte Erdstoss Montagnon, der regelmässig die Strasse Leytron – Ovronnaz verformt).

**Bajocien inférieur:** dunkle Schiefer mit Ton und Mergel oder dunkler tonhaltiger Mergel.

**Bajocien supérieur:** Silikathaltige Kalke in kleinen Streifen mit feinen dazwischen liegenden Ton Schichten.

**Bathonien:** Silikathaltige Kalke mit zahlreichen Fossilfragmente.

**Calovo-Oxfordien:** graue schieferhaltige Mergel mit schwarzen Einschlüssen und phosphathaltigen Ammonit Fragmenten.

**Malm:** grau-blaue Klake mit Mergel an der Basis. Kompakter Kalk von 200-300 Metern Mächtigkeit.

Darüber bildet die Kreide mit ihrer Wechsellagerung von Mergel und Kalkbänken schöne Strukturen (Berriasien, Kalk Valanginien, Hauterivien, Drusbergschichten, Schrattenkalk=Urgonien).



Abb. 6:  
Platzieren der  
Messsonde im Siphon.

Fig. 6:  
Pose de la sonde  
dans le siphon.

En remontant encore quelques mètres le torrent de la Lizerne, on peut apercevoir différents petits orifices situés dans un même plan subhorizontal (pendage). Seules deux entrées sont pénétrables; elles n'offrent que 12 et 7 m de progression. L'ensemble de ce petit réseau fait partie intégrante de la grotte A2, puisque plusieurs jonctions par la voix et la lumière ont pu être réalisées (voir topo). A noter encore qu'un courant d'air peut être perceptible aux différentes entrées et doit être causé par un échange entre ces dernières.

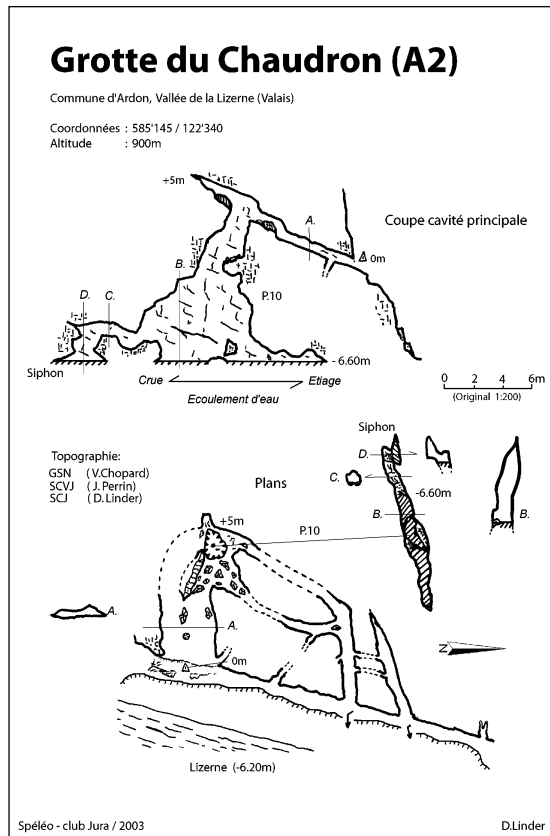


Abb. 5:  
Plan der Höhle A2

Fig. 5:  
Topographie de  
la grotte A2

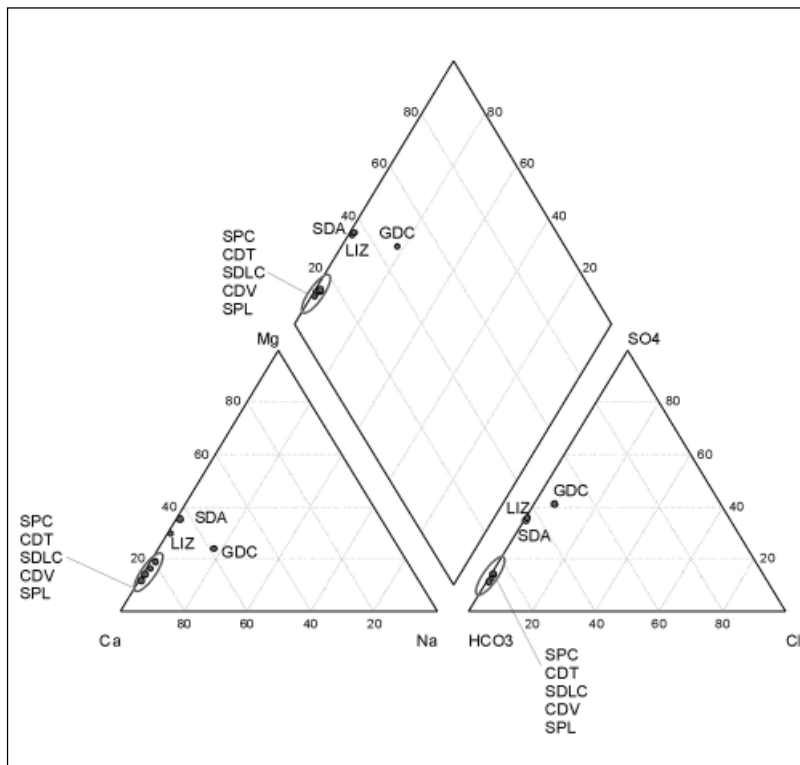


Abb. 7:  
Piper-Diagramm  
der Wasserproben.

Fig. 7:  
Diagramme de Piper  
des eaux échantillon-  
nées.

Zur Hydrologie muss gesagt werden, dass mehrere Karstwasserträger durch wasserdichte Schichten getrennt sind. Es gibt folgende Karstwasserträger, der Malm, das Valanginien calcaire, das Hauterivien, der Schrattenkalk, und die Tertiären Kalke. Die Verformungen und Brüche sind zahlreich, und zeigen a) dass gewisse Karstwassergebiete strukturell getrennt sind, so die hochgelegene Synklinale des Schrattenkalks am Mont-à-Cavouère und des Valanginien Kalks auf der Chaux d'Einzon, und b) dass Verbindungen zwischen den Einzugsgebieten vorhanden sein können. Der Färbversuch im Jahr 1992 (Jeannin et Beuret 1995) hat zum Beispiel ein Aufsteigen des Wassers vom Malm zur Kreide (Tsermettes – Quelle des Lac de Derborence) sowie eine Verbindung von der Kreide zum Malm (Mont-à-Cavouère – Airette) gezeigt.

### Hydrogeologische Beobachtungen

In der Schlucht der Lizerne gibt es mehrere, unterschiedlich grosse Karstquelle. Sie befinden sich am rechten Ufer und bilden die Ausflüsse der Wasserleiter der Morcles Decke, deren Einzugsgebiet zwischen dem Tal der Derbonne und der Haut-de-Cry liegt. Wenn man die Schlucht hinunter steigt, trifft man der Reihe nach (für die Abkürzungen, siehe die Tabelle 1) auf CDV, die aus den silikathaltigen Gesteinen des Hauterivien kommt, SPC und SPL, die aus dem Tertiärkalk fließen, CDT und SDLC aus den Schichten des kalkigen Valanginien, GDC (Chaudron Höhle) und die SDA (Airette Quelle), die sich im Kalk des Malm<sup>1</sup> befinden.

Die Wasserchemie ist in der Tabelle 1 eingetragen. Mit Ausnahme der nahe beieinander liegenden Quellen SPC und SPL ist die Chemie überraschend wechselhaft für Quellen, die aus demselben Gebiet stammen. Dieser Befund führt zur Hypothese, dass die Quellen Gebiete

### Contexte géologique

Les gorges de la Lizerne recourent le flanc normal de la nappe de Morcles (Helvétique). Les couches plongent fortement en direction des gorges et sont déformées par des plis de large amplitude à axe orienté en moyenne ENE-WSW (Badoux 1971). La série sédimentaire qui nous intéresse est la suivante:

**Aalénien**: schistes argileux sombres, génèrent des glissements de terrain à l'affleurement (dont le célèbre glissement de Montagnon qui déforme régulièrement la route Leytron – Ovronnaz).

**Bajocien inférieur**: schistes marneux à argileux sombres.  
**Bajocien supérieur**: calcaires siliceux en petits bancs avec intercalations de fins niveaux argileux.

**Bathonien**: calcaires siliceux à nombreux débris de fossiles.

**Callovo-Oxfordien**: marnes schisteuses à patine grise, avec nodules noirs et débris d'ammonites phosphatées.

**Malm**: calcaires gris-bleutés avec intercalations marneuses à la base, calcaire compact de 200-300 m d'épaisseur au sommet.

Au-dessus, le Crétacé est constitué d'une alternance de formations marneuses et calcaires (Berriasien, Valanginien calcaire, Hauterivien, couches du Drusberg, Urgonien).

Sur le plan hydrogéologique, plusieurs aquifères karstiques, séparés par des couches imperméables, peuvent être définis: le Bajocien-Bathonien, le Malm, le Valanginien calcaire, l'Hauterivien, l'Urgonien, et les calcaires du Tertiaire. La déformation et la fracturation sont intenses dans la région, et impliquent à la fois a) que certains aquifères sont compartimentés, tels les synclinaux perchés de l'Urgonien au Mont-à-Cavouère et du Valanginien à la Chaux d'Einzon, et b) que des relations entre les aquifères sont possibles. La coloration de 1992 par exemple (Jeannin et Beuret 1995) a démontré une remontée de l'eau du Malm vers le Crétacé (Tsermettes – sources du Lac de Derborence) ainsi qu'une relation du Crétacé vers le Malm (Mont-à-Cavouère – Airette).

### Observations hydrogéologiques

Les gorges de la Lizerne renferment plusieurs sources karstiques de tailles diverses. Celles-ci sont situées en rive droite et constituent les exutoires des aquifères de la nappe de Morcles alimentés par les massifs allant de la vallée de la Derbonne au Haut-de-Cry. En descendant la gorge, on rencontre successivement (voir le Tableau 1 pour les acronymes) CDV, qui sourd des calcaires siliceux de l'Hauterivien, SPC et SPL issues des calcaires du Tertiaire, CDT et SDLC alimentées par les couches du Valanginien calcaire, GDC (Grotte du Chaudron) et SDA (Source de l'Airette) situées dans les calcaires du Malm<sup>1</sup>.

La chimie des eaux est reportée dans le Tableau 1. A l'exception des sources SPC et SPL très proches, la chimie est étonnamment contrastée pour des eaux issues d'un même contexte. Ce résultat suggère que les sources sont alimentées par des aquifères compartimentés ayant peu de connexion entre eux. La minéralogie, les bassins d'alimentation et les temps de séjour de l'eau souterraine sont différents d'un aquifère à l'autre; il en résulte

<sup>1</sup> La liste donnée ici complète celle de Jeannin et Beuret 1995 et utilise d'autres abréviations

<sup>1</sup> Die hier gegebene Liste ergänzt die von Jeannin et Beuret 1995 und verwendet andere Abkürzungen.

entwässern, die wenige Zwischenverbindungen haben. Die Mineralogie, die Sammelbecken und die Aufenthaltsdauer des unterirdischen Wassers sind unterschiedlich. Die Chemie variiert stark, mit zum Beispiel sulfatreichem Wasser (Chaudron-Höhle), stärker mineralisiertem aber sulfatarmem Wasser (CDT) oder schwach mineralisiertem Wasser (CDV). Diese Aufteilung des Aquifers vervollständigt die Ergebnisse aus früheren Färbungen (Jeannin und Beuret 1995).

Die Quelle des Chaudron (GDC) unterscheidet sich vollständig von den anderen Quellen und kann als Thermalquelle angesehen werden. Der erste Unterschied liegt in der Temperatur, die bei Niedrigwasser 10°C höher ist als die der umliegenden Quellen (Tab. 1). Der zweite Unterschied betrifft den Mineraliengehalt, der nicht mit demjenigen der Lizerne, 15 Meter entfernt, oder demjenigen der Quelle der Airette, 100 Meter talwärts liegend, korrelierbar ist. Bei der Entdeckung des Siphons schien es klar zu sein, dass dieser von einem dieser zwei Zuflüsse gefüllt wird.

In Wirklichkeit ist bei Hochwasser das Karstwasser, das in die Quelle der Airette fließt, auch in der Grotte des Chaudron vorhanden. Man sieht in der Probe vom Mai 2003 (Tab. 1), dass die Temperatur und die Chemie des Wassers dieser Höhle derjenigen des Quellwassers der Airette sehr ähnlich sind. Allerdings sieht man noch eine Spur von Thermalwasser (Sulfate, Chloride, Natrium und Kalium in grösserer Konzentration). Bei tiefem Pegel unterscheidet sich das Wasser eindeutig von den anderen Gewässern in der Gegend (Abb. 7). Die Natrium- und Chlorid-Konzentrationen sind bemerkenswert. Diese Chemie ist ganz anders als diejenige aus der Thermalquelle von Salentze, die einige Kilometer südlich entspringt (Dubois und al. 1993). Tatsächlich beinhaltet das Wasser der letztgenannten höhere Sulfat – (500 mg/l) und Kalzium (200 mg/l) –, was auf einen Einfluss von evaporitischem Gestein hindeutet. In der Airette sind die

Chemie variiert mit zum Beispiel des wasserreichen sulfates (Grotte du Chaudron), des wassermineralisierten ohne sulfates (CDT) und des wasserfaiblement mineralisierten (CDV). Ce compartimentage des aquifères complète les résultats d'essais de traçage antérieurs (Jeannin et Beuret 1995).

Cependant la source du Chaudron (GDC) se distingue complètement des autres sources karstiques de la région et peut être qualifiée de thermale. La première différence vient de sa température qui, en étiage, est 10°C plus élevée que les sources environnantes (Tableau 1). La deuxième est sa minéralisation qui ne semble corrélée ni à celle de la Lizerne, distante de 15 mètres, ni à celle de l'Airette située 100 mètres en aval. Lors de sa découverte, il semblait pourtant évident que le siphon était alimenté par l'un de ces deux écoulements.

En fait, lors des crues, l'eau du karst alimentant en majeure partie la grosse source de l'Airette est bel et bien présente dans la grotte du Chaudron. On voit que sur l'échantillonnage de mai 2003 (Tableau 1), la température et la chimie des eaux de la grotte deviennent très semblables à celles de la source de l'Airette. Toutefois on remarque encore une empreinte chimique de l'eau thermale (sulfates, chlorures, sodium et potassium plus concentrés). En étiage, l'eau de la grotte se distingue clairement des autres eaux de la région (fig. 7). Elle atteint des concentrations remarquables en sodium et chlorures. Cette chimie est bien différente de celle de la source thermale de la Salentze émergeant quelques kilomètres au sud (Dubois et al. 1993). En effet, cette dernière est beaucoup plus chargée en sulfates (500 mg/l) et en calcium (200 mg/l), démontrant une influence de roches évaporitiques. Alors que les concentrations en sodium et chlorures sont plutôt basses (respectivement 10 et 5 mg/l).

Assurément l'eau du Chaudron est le mélange d'une composante chaude et profonde avec une composante issue du karst, froide et peu minéralisée. Les proportions

	date	altitude	débit	K	T.	pH	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	BI
			[l/s]	[µS/cm]	[°C]		[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[%]
LIZ	25-08-02	1100	150	540	10.8	8.3	0.7	0.3	14.8	57	0.6	70.4	0.7	166	2.9
LIZ	11-05-03		1500	303	10.1	8.2	0.4	0.2	8.3	54	0.1	50.6	0.8	143	3.4
CDV	25-08-02	1055	5	253	9.9*	8.4	0.3	0.1	4.8	48	0.6	16.4	1.0	146	1.6
SPC	25-08-02	1005	0.02	290	7.6	7.8	0.9	0.1	6.3	53	0.5	21.4	0.9	163	2.6
SPL	25-08-02	1005	0.07	285	6.7	7.8	0.9	0.2	6.1	51	0.6	20.5	0.9	162	0.9
CDT	25-08-02	975	0.3	390	12.8*	8.2	1.5	0.4	10.3	71	0.7	29.9	0.4	232	1.7
SDLC	25-08-02	970	3	341	8.6	8.1	0.5	0.1	5.6	69	0.6	20.0	0.6	201	3.8
SDA	25-08-02	905	100	303	6.1	7.1	0.7	0.1	14.5	43	0.6	56.6	1.0	128	4.7
SDA	11-05-03		400	191	5.8	8.1	0.2	0.1	5.3	29	0.1	15.8	1.2	105	2.5
GDC	25-08-02	905	5	591	16.6	7.6	25.2	1.1	18.6	75	14.9	132.3	0.7	216	2.2
GDC	11-05-03			226	6.1	8.1	0.3	0.2	5.1	30	0.3	25.4	1.0	106	5.4

LIZ = Oberflächenfluss Lizerne,  
 CDV = Quelle beim Chenet de Voltive,  
 SPC = Quelle des kleinen Wasserfalls,  
 SPL = Quelle des kleinen Sees,  
 CDT = Quelle des Tuffwasserfalls,  
 SDLC = Quelle der Verdrehung,  
 SDA = Airette Quelle,  
 GDC = Chaudron-Höhle. Temperaturen, die mit einem Stern markiert sind, wurden flussabwärts der Quelle gemessen.

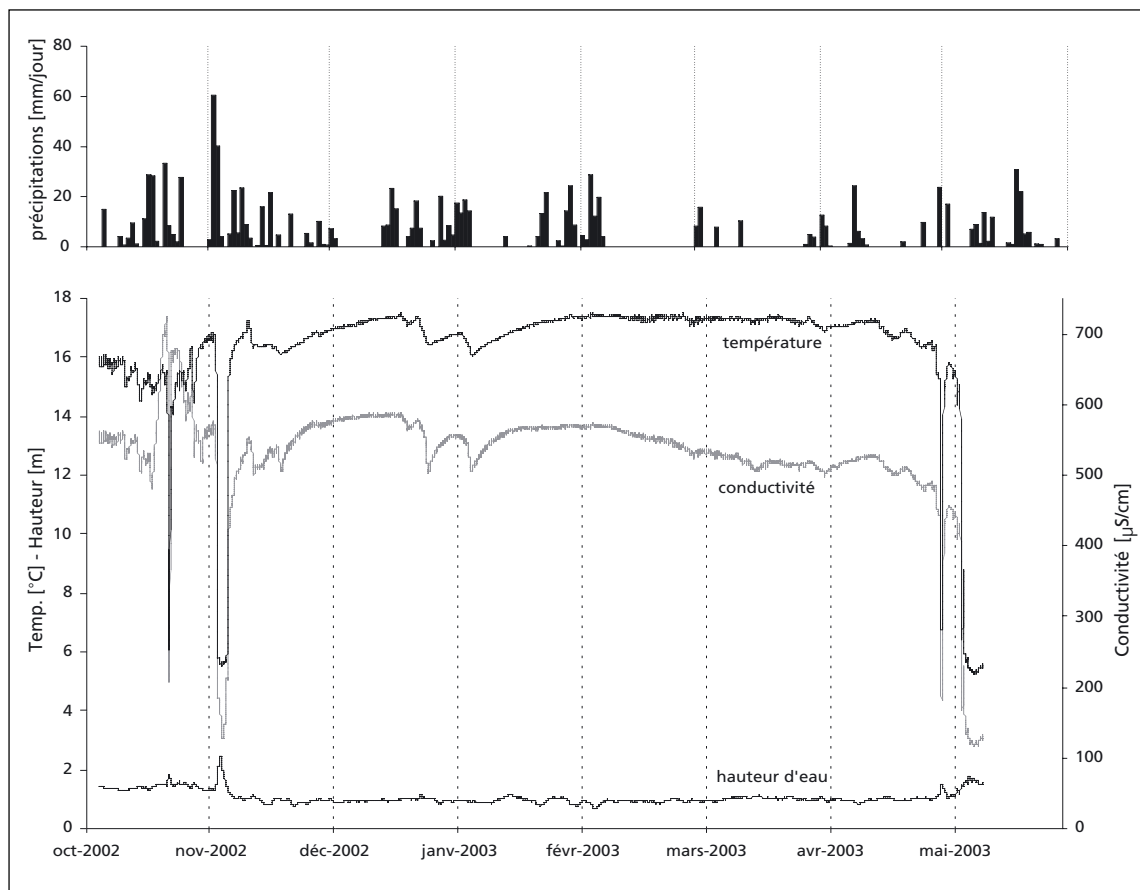
LIZ = rivière de surface la Lizerne,  
 CDV = source du Chenet de Voltive,  
 SPC = source de la petite cascade,  
 SPL = source du petit lac,  
 CDT = source de la cascade de Tuf,  
 SDLC = source de la contorsion,  
 SDA = source de l'Airette,  
 GDC = grotte du Chaudron. Les températures marquées d'une astérisque (\*) ont été mesurées en aval de la source.

**Table 1:**  
**Chemische Analysen der in der Lizerne-schlucht beobachteten Quellen.**

**Tableau 1:**  
**Analyses chimiques des sources observées dans la vallée de la Lizerne.**

**Abb. 8: Chronik des Wasserpegels, der Temperatur und der Leitfähigkeit gemessen im Siphon der Chaudron Höhle / A2, von Oktober 2002 bis Mai 2003. Die Niederschlagsdaten kommen von der SIM Station Les Diablerets (1162 m ü.M.).**

**Fig. 8: Chronique de la hauteur d'eau, de la température et de la conductivité mesurées dans le siphon de la grotte du Chaudron / A2 d'octobre 2002 à mai 2003. Les données de précipitations proviennent de la station ISM des Diablerets (1162 m d'altitude).**



Natrium- und Chlorid-Konzentrationen eher tief (10 bzw. 5 mg/l).

Das Wasser des Chaudron ist somit eine Mischung einer tieferen und wärmeren Komponente mit einer aus dem Karst stammenden Komponente, welche kalt ist und wenige Mineralstoffe enthält. Die Anteile der Mischung verändern sich unter anderem mit den hydrologischen Bedingungen. Wir werden sehen, dass uns noch eine andere Überraschung erwartet.

Um das Verhalten dieser Quelle besser zu verstehen, haben wir eine Messsonde eingerichtet. Die Sonde misst die Leitfähigkeit (was dem gesamten Mineralstoffgehalt entspricht), die Temperatur und den Wasserpegel in 30-Minuten-Abständen. Die Sonde war sieben Monate, von Oktober 2002 bis Mai 2003, aktiv. Die Daten sind in der Abb. 8 dargestellt. Die Messung der Leitfähigkeit weist Fehler auf: Einerseits gab es eine instrumentbedingte systematische Verschiebung von 66 mS/cm während der Aufnahmezeit. Andererseits zeigt die Sonde Schwingungen mit einer Amplitude von 18 µS und einer Periode von 7 – 9 Std.

Diese Fehler wurden in der Abb. 8 nicht korrigiert. Die Temperatur und Wasserpegelmessungen sehen ganz kohärent aus. Es muss präzisiert werden, dass der Einfluss des Luftdruckes auf den Wasserpegel nicht korrigiert wurde. Interessante Phänomene erscheinen in zwei Massstabsbereichen:

### 1. Hochwasser

Man beobachtet auf Abb. 8 vier durch den Temperatur- und Leitfähigkeitsabfall charakterisierte Hochwasser: Am 22 – 23.10.2002, 2 – 5.11.2002, 30.4 – 1.5.2003

du mélange changent entre autres en fonction des conditions hydrologiques. Nous allons voir qu'une autre surprise nous attendait.

Afin de mieux comprendre le comportement de cette source, nous y avons installé une sonde mesurant la conductivité (équivalent de la minéralisation totale), la température et la hauteur de l'eau toutes les 30 minutes. La sonde a pu être laissée pendant sept mois, soit d'octobre 2002 à mai 2003. Les données sont présentées à la fig. 8. La mesure de conductivité est entachée d'erreurs: d'une part une dérive instrumentale de 66 µS/cm a eu lieu entre le début et la fin de la chronique. Cette dérive a été déterminée par mesure manuelle. D'autre part la sonde est sujette à des oscillations en dent de scie d'une amplitude de 18 µS et de 7 – 9 h de période.

Ces erreurs n'ont pas été corrigées sur la fig. 8 Les mesures de température et hauteur d'eau semblent tout à fait cohérentes. Il faut préciser que l'influence de la pression atmosphérique sur la hauteur d'eau n'a pas été corrigée. Des phénomènes intéressants apparaissent à deux échelles:

### 1) Crues

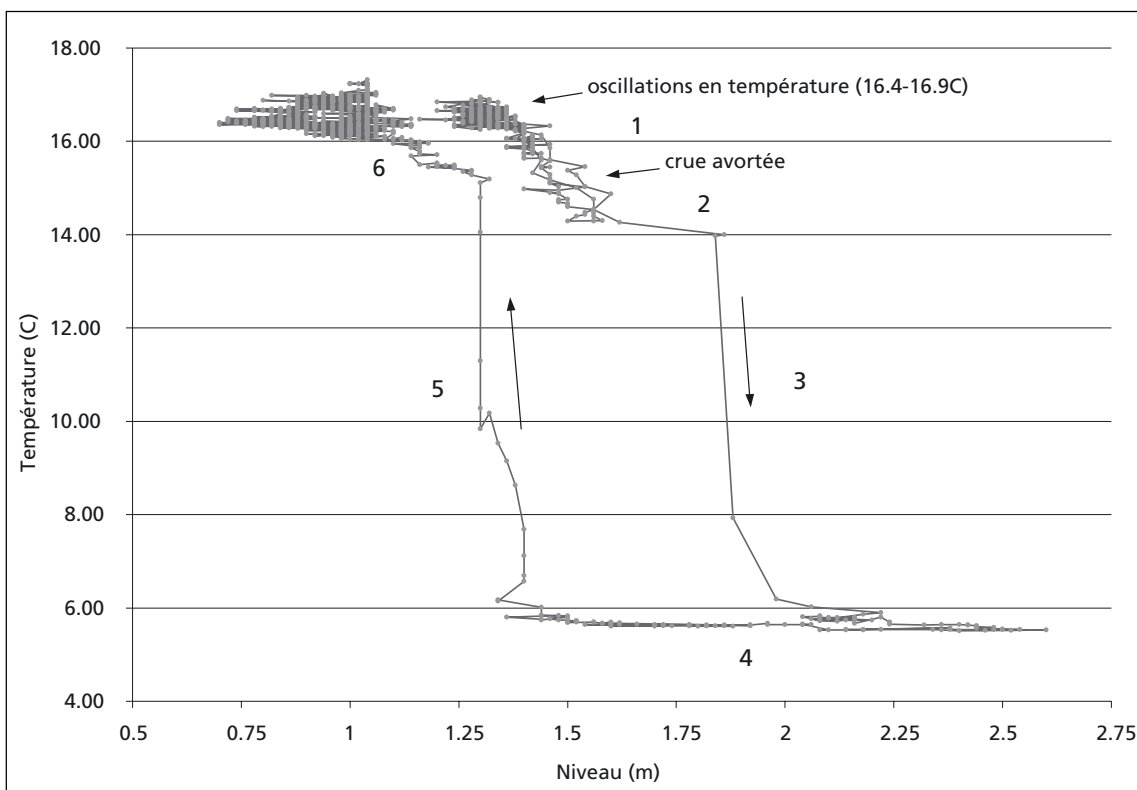
On observe sur la fig. 8 quatre crues bien marquées par la chute de la température et de la conductivité: les 22 – 23.10.2002, 2 – 5.11.2002, 30.4 – 1.5.2003 et la crue commençant le 5.5.2003. Les deux premières sont clairement associées à des épisodes pluvieux, alors que les deux crues de printemps sont vraisemblablement causées par la fonte des neiges. On remarque également deux crues avortées les 25.12.2002 et 5.1.2003 qui pourraient être dues à des pluies. Le temps de réponse aux précipi-

und das am 5.5.2003 beginnende Hochwasser. Die zwei ersten sind klar mit Regenperioden assoziiert, die Frühlingshochwasser im Mai jedoch eher durch Schneeschmelzen ausgelöst. Man bemerkt auch zwei unterbrochene Hochwasser am 25.12.2002 und 5.1.2003, die durch Regen verursacht sein könnten. Die Reaktionszeit auf Niederschlag liegt zwischen einem und zwei Tagen, wobei die Reaktionszeit bei Hochwasser sehr kurz ist: Die Temperatur kann in 30 Minuten um bis 6°C sinken! Während solchen Episoden sind Wasserpegel und Temperatur korrelierbar und man beobachtet eine Hysterese (Abb. 9), die in 6 Abschnitten beschrieben werden kann:

- 1) Zuerst erhöht sich der Durchfluss des Karstwassers, der Pegel steigt und die Temperatur sinkt;
- 2) ein kurzer (1/2h) Spüleffekt erhöht den Pegel bei konstanter Temperatur;
- 3) nachher sinkt die Temperatur kräftig bei leichtem Steigen des Pegels, die Mischung hört auf, weil der hydrostatische Druck jetzt reicht, um den Aufstieg des Thermalwassers, das langsamer reagiert, zu verhindern;
- 4) das kalte Wasser beherrscht die ganze Hochwasserperiode, dann sinkt der Pegel ohne Änderung der Temperatur;
- 5) wenn dann der Pegel unter den Wert 1.3 m sinkt, steigt die Temperatur schnell an (9°C in 8 Stunden). Dieser Effekt wird durch die Geometrie der Leitungen verursacht: Unterhalb eines Schwellwertes wird das kalte Wasser durch andere Leitungen umgelenkt, so dass ein Ausgleich der Drucke stattfindet und das Thermalwasser wieder aufströmt und an der Mischung teilnimmt. Es ist auch möglich, dass zu diesem Zeitpunkt die Hochwasserwelle das tiefere Gewässer erreicht hat.

tations est de l'ordre d'un ou deux jours, alors que la vitesse de réaction lors de crues est très rapide: la température peut perdre jusqu'à 6°C en 30 minutes! Lors de ces épisodes, la hauteur d'eau et la température sont corrélées et décrivent une hystérèse (fig. 9), que nous interprétons en 6 étapes:

- 1) D'abord le débit d'eau karstique plus froide augmente, fait monter le niveau et baisser la température;
- 2) un effet de chasse de courte durée (1/2h) fait monter le niveau à température constante;
- 3) ensuite la température chute brutalement avec une légère montée du niveau, le mélange cesse car la pression hydrostatique de l'eau froide est maintenant suffisante pour empêcher l'eau thermique, plus lente à réagir, de remonter;
- 4) l'eau froide domine tout l'épisode de crue, puis le niveau baisse sans changement de température;
- 5) enfin, lorsque le niveau descend sous la cote de 1.3 m, la température augmente rapidement (9°C en 8 heures). Cet effet peut être dû à la géométrie des conduits: en dessous d'un certain seuil l'eau froide est largement détournée vers d'autres conduits; ou alors, les pressions se rééquilibrent et l'eau thermique circule à nouveau et participe au mélange. Il est aussi possible qu'à ce moment, l'onde de crue ait atteint l'aquifère profond. Finalement, en
- 6) alors que le niveau continue de descendre, la température augmente graduellement car l'apport en eaux froides diminue. Il faut noter que la température de la petite crue avortée remonte sur la même branche, indiquant que l'eau thermique n'a pas cessé d'affluer pour cet épisode. La fig. 10 montre que la corrélation est plus forte entre la conductivité et la température pour la même période, mais présente également une hystérèse.



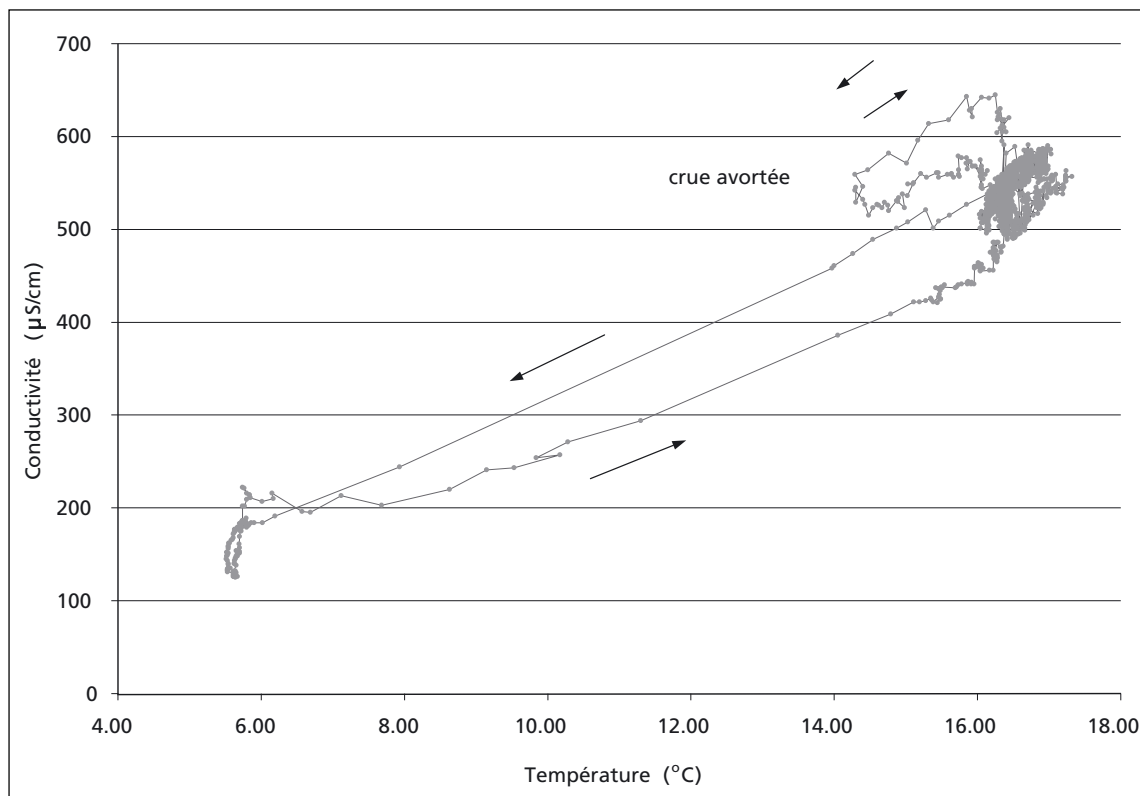
**Abb. 9: Hysteresiskurve Temperatur-Wasserpegel vom 2. zum 5.11.2002. Die steile Temperaturänderungen entsprechen wahrscheinlich der Unterbrechung/Herstellung von Thermalwasserzufuhr, durch den Druck des kälteren Hochwassers bedingt.**

**Fig. 9: Courbe d'hystérèse température – niveau d'eau du 2 au 5.11.2002. Les variations abruptes de température correspondent probablement à l'arrêt et au rétablissement de l'apport d'eau thermique, régulé par la pression de l'eau de crue plus froide.**



Abb. 10: Hysteresis-kurve Leitfähigkeit-Temperatur vom 2. bis 5.11.2002. Man beachte die Schleife eines unterbrochenen Hochwassers.

Fig. 10: Courbe d'hystérèse conductivité – température du 2 au 5.11.2002. Noter la boucle suivie par la crue avortée.



6) Schlussendlich – wenn der Wasserpegel weiter sinkt, steigt die Temperatur, weil die Kaltwasserzufuhr abnimmt. Es muss erwähnt werden, dass die Temperatur des unterbrochenen Hochwassers entlang desselben Astes wieder steigt, was zeigt, dass die Thermalwasserzufuhr für dieser Episode nicht unterbrochen wurde. Die Abb. 10 zeigt, dass die Korrelation zwischen Leitfähigkeit und Temperatur für dieselbe Periode noch besser ist. Sie zeigt aber auch eine Hysterese.

## 2. Periodische Änderungen der Temperatur durch die Erdzeiten verursacht

Wenn der Pegel sich nicht schnell verändert und die Temperatur über 15°C steigt, zeigt diese Schwingungen mit einer Periode, die sehr nah an 12 Stunden und 30 Minuten ist. Die Amplitude variiert zwischen 0.2 und 0.8°C und ist umso stärker, je weiter die Temperatur von der höchsten gemessenen Temperatur entfernt ist (17.6°C). Sie liegt deutlich über der Genauigkeit und Auflösung der Messsonde, welche 0.1 und 0.01°C beträgt. In Anbetracht der Probleme mit der Leitfähigkeit (siehe oben) haben wir die Messdaten, die mit dieser Messsonde vor dem Einsatz im Chaudron aufgenommen wurden, untersucht. Diese Daten zeigen, dass die Veränderungen der Temperatur kein Messartefakt, sondern real sind. Da die beobachtete Periode derjenigen der Gezeiten entspricht (siehe Kasten), haben wir die Koeffizienten der Gezeiten für die Koordinaten der Höhle bestimmt, und dann die theoretischen Gezeiten, nach der Entwicklung von Tamura, mit 1200 Wellen mit der Hilfe der TSoft Software berechnet (Van Camp 2003). Die Last der Ozeane wurde nicht korrigiert. Der Verlauf der Wassertemperatur und des Wasserpegels wurden mit der Vorhersage der Gezeiten für die erste Woche der Messungen (Abb. 11) verglichen. Die Temperatur korreliert über-

## 2) Fluctuations périodiques de la température dues à la marée terrestre

Lorsque le niveau ne varie pas trop rapidement, et que la température est supérieure à 15°C, celle-ci décrit des oscillations avec une période très proche de 12 heures 30 minutes. L'amplitude varie entre 0.2 et 0.8°C et est d'autant plus forte que la température est éloignée de la température maximale mesurée (17.6°C). Pour comparaison, la précision et la résolution de la sonde sont 0.1 et 0.01°C. Vu les problèmes rencontrés avec la conductivité (cf. plus haut), nous avons inspecté des données prises avec cette même sonde avant son utilisation au Chaudron. Ces données indiquent que la variation en température n'est pas un artefact de la sonde et qu'elle est bien réelle. La période observée rappelant celle des marées (cf. encadré), nous avons déterminé les coefficients de marée terrestre pour les coordonnées de la cavité, puis calculé la marée théorique selon le développement de Tamura comprenant 1200 ondes, à l'aide du logiciel TSoft (Van Camp 2003). La charge océanique n'a pas été corrigée. L'évolution de la température de l'eau et de son niveau sont comparées à la prédiction de marée pour la première semaine de données (fig.11). Si le niveau d'eau n'a pas été mesuré avec une sensibilité suffisante pour en tirer une conclusion, la corrélation est par contre très forte pour la température: à chaque maximum de température de l'eau correspond un maximum de marée, idem pour les minima. Cette corrélation est vérifiée durant toute la période de mesure.

Ces observations permettent de proposer le schéma de fonctionnement suivant (fig. 12). La source de l'Airette (à proximité de la grotte du Chaudron) est essentiellement alimentée par l'aquifère karstique du Malm. Il s'agit d'un aquifère à nappe libre aux eaux froides et peu mi-



schend gut mit den Gezeiten. Diese Korrelation besteht über die ganze Messdauer. Da der Pegel nicht mit genügender Empfindlichkeit gemessen wurde, können keine Schlüsse gezogen werden.

Diese Beobachtungen erlauben folgendes Funktionsschema vorzuschlagen (siehe Abb. 12). Die Quelle der Airette wird grundsätzlich aus dem Karstwasser des Malm gespeisen. Es handelt sich um einen freien Aquifer mit wenig mineralisiertem und kaltem Wasser. Die Basis des Karstwassers bilden die dicken Mergelschichten des Callovien-Oxfordien. Darunter befindet sich der Aquifer des Doggers (Bajocien-Bathonien). Sein Sammelbecken befindet sich westlich des Haut de Cry (Gegend von Chamosentse). Dieser Aquifer ist gefangen, erwärmt sich und lädt sich mit Mineralien in der Tiefe auf. Auf der Höhe der Grotte du Chaudron steigt dieses Wasser durch einen Spalt und mischt sich mit dem kalten Wasser aus dem Malm. Das Mischungsverhältnis hängt vom Druckverhältnis zwischen den beiden Einzugsgebieten ab. Bei Hochwasser hat es im Wasser des Malm mehr Druck als im Wasser aus dem Dogger. Das Wasser in der Höhle ist kalt und beinhaltet wenig Mineralstoffe. Bei tieferem Pegel ist der Druck auf der Seite des Dogger relativ höher und das warme Wasser hat mehr Einfluss.

Im diesem Fall beeinflusst der Gezeiteneffekt auch das Mischverhältnis Warmwasser-Kaltwasser, und damit indirekt die Temperaturschwankungen. Eine weitere Beobachtung zeigt, dass die Amplitude abnimmt, wenn die Wassertemperatur höher wird. Jedoch kann die Tatsache, dass die Schwankungen auch bei den höchsten Temperaturen vorhanden sind, bedeuten, dass es immer eine Mischung gibt, dass also auch beim tiefen Pegel im Winter noch kaltes Wasser zugeführt wird.

Eine detaillierte Analyse zeigt, dass die Schwankung der Temperatur nicht trivial ist. Sie geht den Gezeiten

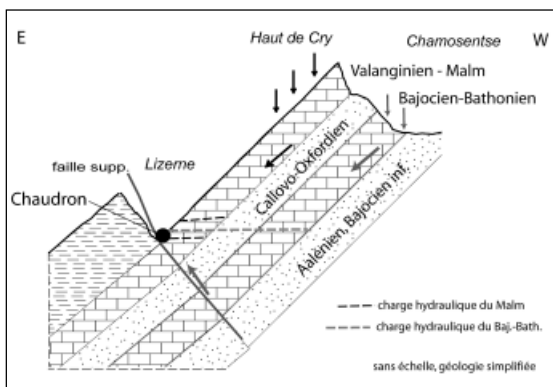
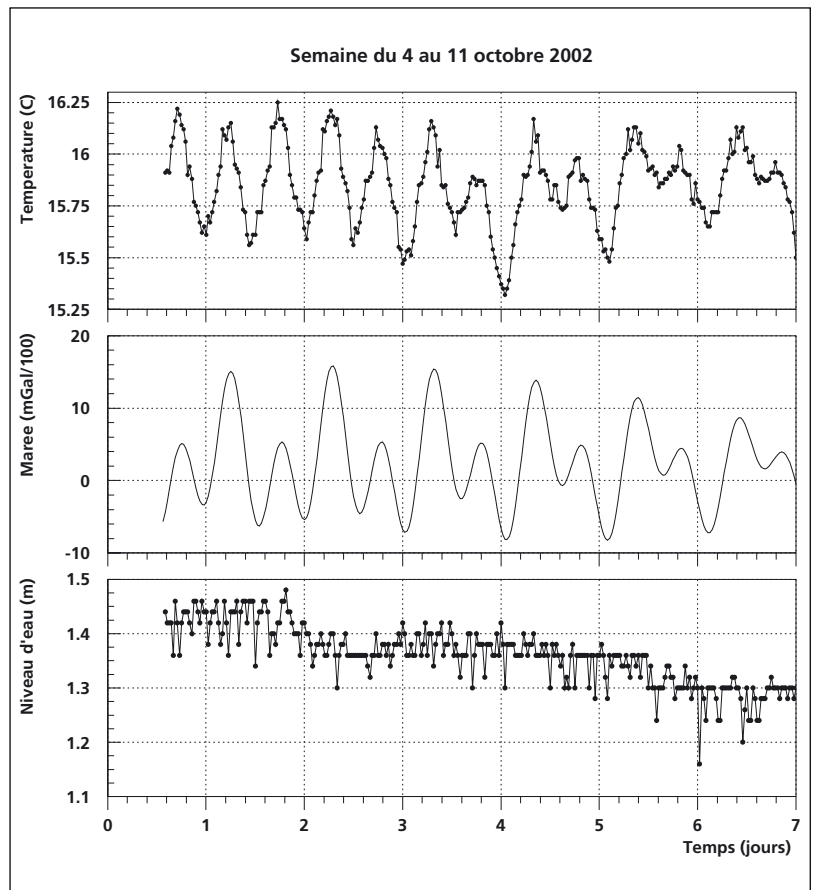


Abb. 12: Geologischer Schnitt durch das Gebiet. Im vorgeschlagenen Modell ist der Aquifer des Bajocien-Bathonien gefangen, und die Mischung von tieferem, wärmerem Wasser mit kälterem Karstwasser von der Oberfläche wird durch die Überlast, welche mit den Erdgezeiten variiert, beeinflusst.

Fig. 12: Coupe géologique schématique du secteur. Dans le modèle proposé, l'aquifère du Bajocien-Bathonien est captif et le mélange des eaux profondes plus chaudes avec les eaux karstiques de surface, plus froides, est modulé par la variation de charge due à la marée terrestre.



néralisées. La base de l'aquifère est constituée par les épaisses marnes du Callovo-Oxfordien. Au dessous vient l'aquifère Bajocien-Bathonien. Son aire de recharge est située à l'ouest du Haut de Cry (région de Chamosentse). L'aquifère est captif et ses eaux se réchauffent et se minéralisent en profondeur. Au niveau de la grotte du Chaudron, une faille permet à cette eau de remonter vers la surface et de se mélanger avec les eaux froides de l'aquifère du Malm. Le rapport de mélange est contrôlé par les rapports de charge dans les deux aquifères. En crue la charge de l'aquifère du Malm est supérieure à celle de l'aquifère Bajocien-Bathonien. L'eau de la grotte est froide et peu minéralisée. En étiage, la charge dans le Bajocien-Bathonien devient relativement plus élevée et les eaux chaudes prédominent.

Dans notre cas, l'effet de la marée contrôle également le rapport de mélange eau froide – eau chaude et donc indirectement les oscillations de température. L'observation détaillée des chroniques montre que l'amplitude diminue lorsque que la température de l'eau atteint les valeurs les plus élevées, traduisant une atténuation de l'effet des marées en période d'étiage. Cependant le fait que les fluctuations subsistent à la température limite supérieure pourrait signifier qu'un mélange se fait toujours, c'est à dire que l'apport en eau froide ne cesse pas complètement durant l'étiage hivernal.

Une étude plus approfondie montre que la réponse en température de la source n'est pas simple. L'amplitude de la variation ne suit pas toujours exactement la marée. Le déphasage de la réponse est de -50 minutes en moyenne avec une déviation standard de 45 minutes. Le signe négatif veut dire que la source semble réagir en

Abb. 11: Korrelation zwischen der Wassertemperatur (oben) und den Erdgezeiten (mitte). Die Wasserpegelmessungen (unten) sind nicht empfindlich genug, um einen Schluss zu ziehen.

Fig. 11: Corrélation entre la température de l'eau (haut) et la marée terrestre (milieu). La sensibilité des mesures de niveau (bas) est trop faible pour tirer une conclusion.

## Erd-Gezeiten

Die Erd-Gezeiten sind das kontinentale Pendant der Gezeiten der Ozeane. Beide entstehen durch den Einfluss der Erdrotation und der Gravitationsanziehung des Mondes, der Sonne und, in geringerem Masse, der Planeten.

Betrachten wir zum Beispiel den Fall des Wassers der Ozeane für das System Erde-Mond. Da die Gravitationskraft zwischen zwei Körper mit Massen  $M_1$  und  $M_2$  ( $F = GM_1M_2/d^2$ ) mit dem Quadrat des Abstandes abnimmt, werden die Wassermassen, die näher am Mond sind, stärker angezogen ( $F_{G1}$ ) als die, die auf der anderen Seite der Erde liegen und weiter entfernt sind ( $F_{G2}$ ). Dieser Effekt wird noch dadurch verstärkt, weil das System Erde-Mond sich nicht um das Zentrum der Erde dreht, sondern um den gemeinsamen Schwerpunkt. Dieser befindet sich nur 1800 km von der Erdoberfläche entfernt ( $R$ ). Die Zentrifugalkraft ist also auf der vom Mond entfernten Seite der Erde stärker ( $F_{C2}$ ) weil dieser Punkt weiter vom wirklichen Drehzentrum ( $R$ ) entfernt ist. Diese Kräfte, die die Wassermassen entlang der Linie Erde-Mond auseinander ziehen, bilden so zwei Häufungen des Wassers, eine in Richtung Mond und eine in der Gegenrichtung. In Wirklichkeit bewirkt die Drehung der Erde durch Reibung eine seitliche Verschiebung (Punkte). Befindet man sich an der Oberfläche der Erde, sieht man also pro Tag das Wasser zweimal steigen und sinken, dem Durchgang beider Beulen entsprechend. Die Geometrie der Ozeane macht diese Bewegung komplizierter, sodass die Gezeiten von Ort zu Ort sich stark unterscheiden können.

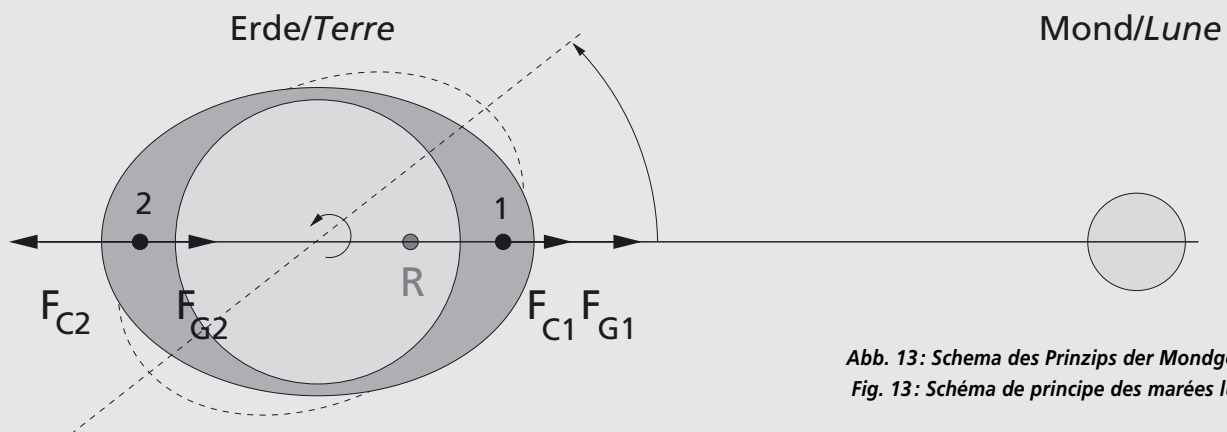


Abb. 13: Schema des Prinzips der Mondgezeiten.  
Fig. 13: Schéma de principe des marées lunaires.

Ein ähnlicher Effekt wird durch die Anziehung der Sonne und der Planeten verursacht. Die dadurch entstehenden Gezeiten sind schwächer, weil die Distanz zwischen den beiden Seiten der Erde (12000 km) im Vergleich zur Distanz zu diesen Himmelskörpern klein ist (150 Millionen km für die Sonne). Durch ihre grosse Masse kann die Sonne auf der Erde spürbare Gezeiten verursachen. Die durch die Planeten erzeugten Gezeiten sind nur mit ausgeklügelten Instrumenten nachweisbar.

Das Gesamtbild aller dieser Gezeiten (lunar, solar, planetar) ist komplex, weil die verschiedenen Teile unterschiedliche Perioden haben und nicht immer in derselben Phase stattfinden. Ist die Sonne in Konjunktion mit dem Mond (Neumond), addieren sich beide Effekte und die Amplitude der Gezeiten ist gross. Man spricht von Springflut. Steht der Mond in einem rechten Winkel zur Sonne am Himmel, wirken die Effekte gegeneinander und man spricht von Nippflut.

Auf die Erdkruste wirken dieselben Kräfte wie auf die Ozeane. Da sie steifer ist, ist die Amplitude ihrer Bewegungen viel kleiner. Immerhin, auf unseren Breitengraden erhebt die Kontinentalplatte sich zweimal täglich um 30 Zentimeter. Es handelt sich um Erd-Gezeiten. In Wirklichkeit wird sogar die Atmosphäre durch die Gezeiten beeinflusst.

Die Erd-Gezeiten können die Quellen eines Wassergebietes beeinflussen. Da die Gezeiten als Veränderung der lokalen Schwerkraft verstanden werden können, wirken die Schichten oberhalb des Wassers wie ein Deckel, der mehr oder weniger stark auf die darunter liegenden Schichten drückt. Die Modulierung des Wasserpegels in Bohrlöchern oder von Karstquellen durch die Gezeiten ist seit langem bekannt (Ford und Williams 1989, Todd 1959). Wir haben allerdings keine Angaben zu Quellen gefunden, deren Temperatur direkt von den Gezeiten beeinflusst wird. Studien, durchgeführt in Leukerbad durch Muralt und Vuataz (1993), zeigen eine jahreszeitliche Fluktuation der durchschnittlichen Monatstemperatur der Thermalquellen; die Daten zeigen keine kurzperiodischen Erdgezeiten.

## La marée terrestre

La marée terrestre est le pendant continental de la marée océanique. Les deux sont dues aux effets combinés de la rotation de la terre et de l'attraction gravitationnelle de la lune, du soleil, et dans une moindre mesure, des planètes, sur la surface de la terre.

Regardons le cas de l'eau des océans pour le système terre-lune par exemple. Comme la force de gravitation entre deux corps de masse  $M_1$  et  $M_2$  ( $F = GM_1M_2/d^2$ ) épend de l'inverse du carré de la distance  $d$  qui les sépare, les masses d'eau plus proches de la lune subiront une force d'attraction ( $F_{G1}$ ) plus forte que celles situées de l'autre côté de la terre, plus éloignées ( $F_{G2}$ ). Cet effet est augmenté par le fait que le système terre-lune ne tourne pas exactement autour du centre de la terre, mais autour du centre de gravité du système, un point à seulement 1800 km de la surface terrestre ( $R$ ). La force centrifuge est donc plus élevée du côté opposé à la lune ( $F_{C2}$ ) car ce point est plus éloigné du vrai centre de révolution ( $R$ ). Ces forces qui tendent à écarter les masses d'eau le long d'un axe terre-lune créent donc deux accumulations d'eau, une en direction de la lune, l'autre dans la direction opposée. En fait, la rotation de la terre entraîne par friction ces bourrelets un peu de côté (pointillés). Si l'on se trouve sur la surface de la terre, on verra donc l'eau monter et descendre deux fois par jour, correspondant au passage des deux bourrelets. La géométrie des océans complique ce mouvement et implique que les heures de marée peuvent varier fortement d'un endroit à l'autre.

Un effet similaire est dû à l'attraction du soleil et des planètes. La marée qui en résulte est plus faible car la différence de distance entre un côté et l'autre de la terre (12000 km) devient petite par rapport à la distance à ces corps célestes (150 millions de km pour le soleil). C'est par son énorme masse que le soleil peut créer des marées appréciables sur terre. Les marées dues aux planètes ne sont perceptibles qu'avec des instruments sophistiqués.

Le cumul de ces marées (lunaire, solaire, planétaires) est complexe car les différentes contributions ont des périodes différentes et ne sont pas toujours en phase. Quand le soleil est aligné avec la lune par exemple (nouvelle lune), les deux effets s'additionnent et l'amplitude de la marée est importante. On parle alors de marée de *vive-eau*. Quand la lune est à angle droit avec le soleil dans le ciel, les effets s'annulent mutuellement (ou presque) et on parle de marée de *morte-eau*.

La croute terrestre subit les mêmes forces que les masses océaniques. Comme elle est plus rigide, elle répond à ces forces avec une amplitude beaucoup plus faible. Tout de même, à nos latitudes la plaque continentale se soulève de 30 cm deux fois par jour. C'est le phénomène de la marée terrestre. En fait même l'atmosphère subit l'effet des marées.

La marée terrestre peut influencer les sources d'un aquifère captif. Comme la marée se traduit par une variation de la pesanteur locale, les couches géologiques définissant le toit de l'aquifère agissent comme un couvercle appuyant plus ou moins fort sur les couches sous-jacentes. La modulation du niveau d'eau dans des forages ou même des sources karstiques par les marées est connue de longue date (Ford et Williams 1989, Todd 1959). Nous n'avons par contre pas trouvé mention de sources dont la température est directement modulée par la marée. Les études conduites à Loèche-les-Bains par Muralt et Vuataz (1993) montrent une fluctuation saisonnière de la température moyenne mensuelle des sources thermales; les données présentées ne sont donc pas sensibles aux courtes périodes des marées terrestres.

um 50 Minuten voraus. Dies im Durchschnitt, mit einer Standardabweichung von 45 Minuten. Das heisst, dass die Quelle im Voraus auf die Gezeiten zu reagieren scheint. Tacher et al. (1003) haben negative Phasenverschiebungen von 1 und 2 Stunden im Rhonetal, in Epinassey und Evionnaz bei Lavey-les-Bains beobachtet. Unter den Faktoren, die die Reaktion der Quelle komplizieren können, kann man folgende erwähnen: a) nur die vertikale Komponente der Gezeiten wurde berücksichtigt, b) die Korrektur für die ozeanische Last wurde vernachlässigt, und c) die hydrologischen Bedingungen bei der Quelle ändern sich mit einer der Gezeiten vergleichbaren Zeitkonstante. Die kleine Phasenverschiebung der Antwort könnte darauf hindeuten, dass die Mischung nah bei der Quelle stattfindet. Eine zufällige Ueberlagerung zwischen der Reaktionszeit und einer oder mehreren Gezeitenperioden kann nicht ausgeschlossen werden. Trotzdem haben wir gezeigt, dass der Mond und die Sonne die Wassertemperatur im Chaudron beeinflussen!

## Schlussfolgerungen

Durch die Entdeckung dieser Höhle mit Thermalwasser können mehrere interessante Beobachtungen gemacht werden. Es empfiehlt sich, für die Zukunft die Korrelation zwischen Festlandgezeiten und Temperatur zu messen und das hydrologische Modell zu verfeinern. Es sollten auch Wasserstand, Leitfähigkeit und Temperatur während eines ganzen hydrologische Zyklus gemessen werden. Die Quantifizierung der Quellschüttung wie auch der Flussrichtung sind nützlich für die Bestimmung des Flusses, diese Messung erfordert allerdings viel Arbeit. Eine Färbung an verschiedenen Stellen im ganzen Massiv würde die Unterteilung der Einzugsbereiche besser erfassen.

## Danksagung

Ein Dankeschön an das CHYN (Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel) für die Bereitstellung einer Messprobe. Ein grosser Dank geht auch an die anderen Höhlenforscher, die ihre Energie in dieses Abenteuer gesteckt haben, unter anderen François Bourret, Tom Conrad, Etienne Mayerat, Pascal Tacchini und Stéphane Bangerter. ■

## Bibliographie

- Badoux H. 1971. Atlas géologique de la Suisse: feuille 1305 Dent de Morcles. Commission géologique suisse, carte et notice.
- Chopard V. 2003. Découverte de la géologie et de l'hydrogéologie sur le site de Derborence, Travail de Diplôme, EDD. Archives du Spéléo-club Jura.
- Dubois J.-D., Mazor E., Jaffé F., Bianchetti G. 1993. Hydrochimie et géothermie de la région de Saillon (Valais, Suisse). Bulletin d'Hydrogéologie n°12: 71-85.
- Ford D.C., Williams P.W. 1989. Karst Geomorphology and hydrology, p. 164 ff. Unwyn Hyman London.
- Jeannin P.-Y., Beuret S. 1995. Multitraçage dans la région de Derborence (VS). Cavernes n°1/2: 37-48.
- Kuonen T. 2000. Derborence et la Vallée de la Lizerne, Editions Monographic, Sierre, ISBN 2-88341-104-2.

avance sur la marée. Tacher et al. (1993) ont observé des déphasages négatifs de 1 et 2 heures dans la vallée du Rhône, à Evionnaz et Epinassey près de Lavey-les-Bains. Parmi les facteurs pouvant compliquer la réponse de la source on peut citer a) on n'a considéré que la composante verticale de la marée b) la charge océanique n'a pas été corrigé dans le calcul et c) les conditions hydrologique varient avec une constante de temps comparable à la marée. Le faible déphasage de la réponse pourrait indiquer que le mélange se fait à une faible distance de la source, mais la coïncidence fortuite entre le temps de réponse et une ou plusieurs périodes de marée n'est pas exclue. Nous avons toutefois démontré que la lune et le soleil conditionnent les variations de température de l'eau du Chaudron!

## Conclusions

La découverte de cette grotte à eau thermale a permis de faire plusieurs observations intéressantes. A l'avenir, il conviendrait d'exploiter le lien entre les oscillations périodiques de la température et les marées terrestres pour tenter d'affiner le modèle hydrologique. Il serait également important de mesurer les paramètres hauteur d'eau, conductivité, températures sur un cycle hydrologique complet. La quantification du débit de la source, ainsi que la direction de l'écoulement, seraient utiles pour tester l'interprétation (quantification, calcul de flux), mais cette mesure demande beaucoup de travail... Un essai de traçage multiple étendu sur le massif permettrait de confirmer jusqu'à quel point les aquifères sont compartimentés.

## Remerciements

Au CHYN (Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel) pour la mise à disposition d'une sonde de mesure.

Un autre grand merci aux autres spéléos ayant apporté leur énergie dans cette aventure, parmi lesquels: François Bourret, Tom Conrad, Etienne Mayerat, Pascal Tacchini, Stéphane Bangerter. ■

- Muralt R., Vuataz F.-D. 1993. Emergence d'eau thermale et mélanges avec des eaux souterraines froides dans la gorge de la Dala à Leukerbad (Valais, Suisse). Bulletin du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel n°12: 111-134.
- Tacher L., Rouiller J.-D., Zwahlen F. 1993. Marées terrestres dans l'aquifère captif du Massif cristallin des Aiguilles Rouges, région de Lavey-les-Bains, Suisse. Bulletin du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel n°12: 59-69.
- Todd D.K. 1959. Ground Water Hydrology, p. 163 ff. JohnWiley and Sons, 6th printing 1967.
- Van Camp M. 2003. TSoft version 2.0.11 Sept 2003, Royal Observatory of Belgium, <http://www.astro.oma.be/SEISMO/TSOFT/tsoft.html>.
- Vouillamoz P. 1964. Le Gouffre du Mont-à-Cavouère, Cavernes, et Activités 1969 du Spéléo-Club Jura, Stalactite 1970.