ETUDE HYDROGÉOLOGIQUE DES SOURCES DE LOULIÉ SYNTHESE

Bilan d'eau, bassins versants, géomorphologie, géologie, fonctionnement hydraulique

par Jean-Paul Fabre [1] et Alain Perrineau [2]

Sommaire

INTRODUCTION

1/ LE PLATEAU DU PUY D'ISSOLUD

A/ Morphologie
B/ Géologie
C/ Bassins versants

2/ SOURCES

A/ Inventaire des sources
B/ Comparaison des caractéristiques physico-chimiques des sources
C/ Débits d'étiage des sources de Loulié
D/ Cycles hydrogéologiques, bilan d'eau et surface du bassin karstique

3/ LES GALERIES

A/ Description
B/ Relation entre les galeries et l'aquifère

CONCLUSIONS

[1] - Hydrogéologue - Docteur en Géologie, Au Moulin Neuf, 24590 Salignac.
[2] - Ingénieur Géologue, Le Bousquet , 33760 Cessac.

A la demande de Jean-Pierre Girault nous avons étudié le fonctionnement des sources du Puy d'Issolud et plus particulièrement celles de Loulié. Ces sources auraient été convoitées par les romains dans le but de provoquer la capitulation des forces gauloises retranchées sur le massif.

Notre objectif est de caractériser les sources (inventaire, position, étiage, crues) et l'aquifère correspondant (limites, réserves, fonctionnement).

Les moyens sont l'observation directe, levées géologiques, mesures de température, conductivité et débits, étude des cartes, relevés de géomètres et report des galeries fourni par J.-P. Girault, enfin nous nous appuierons sur la connaissance que nous avons du Causse de Martel (*Etude Hydrogéologique de la Partie Sud-Ouest du Causse de Martel*, thèse 3^{e} cycle, 1983, Fabre J.-P.).

De 1998 à 2002, deux cycles hydrodynamiques ont été observés par J.-P. Girault suivant nos propositions et nous sommes allés 5 fois sur le terrain avec les objectifs suivants : 1/ présentation du site par J.-P. Girault ; 2/ inventaire des sources, débits ; 3/ débits, température et conductivité des sources ; 4/ observation du bassin versant ; 5/ visite des galeries.

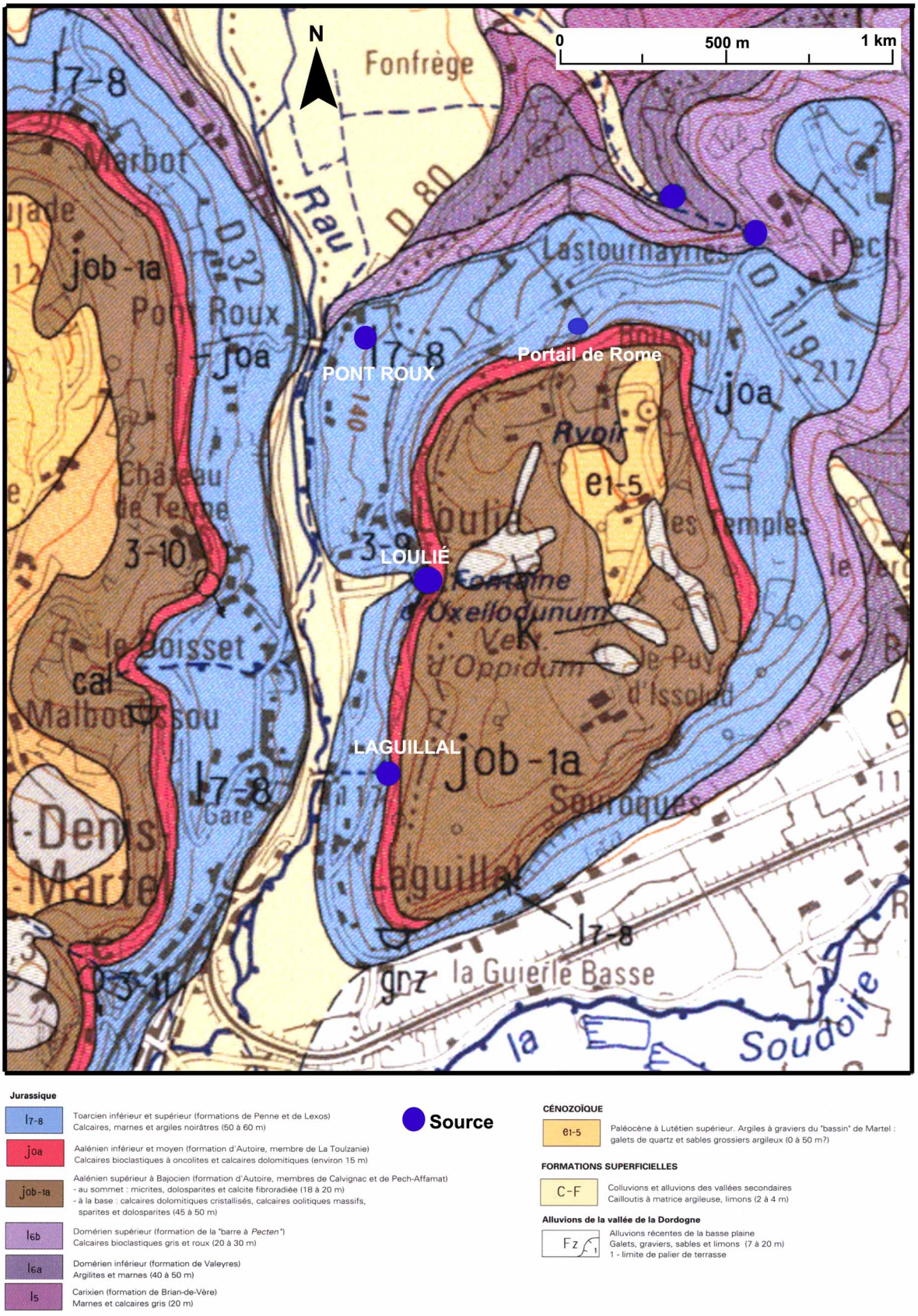
1/ LE PLATEAU DU PUY D'ISSOLUD

A/ Morphologie

Le Puy d'Issolud est une large butte d'environ 1,5 km sur 1 km, située en bordure de la vallée de la Dordogne. Il s'agit d'un plateau calcaire perméable entouré de falaises et de pentes escarpées. Les calcaires reposent en partie basse de la butte sur des marnes imperméables. Cette butte est le témoin de la prolongation du plateau du Causse de Martel dont elle est séparée par la vallée de la Tourmente, affluent rive droite de la Dordogne. Le Puy d'Issolud culmine à 311 m, prés des vestiges archéologiques. Le sommet des falaises qui l'entourent est situé vers 220 m. Les sources de Loulié, au pied des falaises, sont à l'altitude de 160 m. La vallée de la Tourmente qui borde la butte à l'ouest est à l'altitude de 120 m.

Histoire morphologique du Puy d'Issolud

- Avant le creusement et l'enfoncement des vallées actuelles au Quaternaire, la surface du plateau du Puy d'Issolud a été le siège d'une érosion fluviatile. Il en subsiste de nos jours, perché sur le plateau, un vallon suspendu qui se situe à l'aplomb des sources de Loulié. Il lui correspond une ligne de crête et un bassin versant topographique que nous avons parcourus lors de notre visite de terrain du 20/02/2000*)*.
- Pendant l'enfoncement du niveau de base, défini dans ce secteur par le niveau des eaux de la Dordogne, il y a eu remplacement progressif du ruissellement de surface par de l'infiltration et une karstification. Cette substitution s'est faite suite à l'érosion et au décapage des anciens dépôts d'argiles et sables de surface, d'âge tertiaire, conservés localement en placages résiduels sur le haut du bassin versant du vallon suspendu.
- Actuellement la karstification a mis en place une organisation souterraine des écoulements avec pour exutoire principal les sources de Loulié. Ce n'est qu'aux cours d'orages que la pluie d'intensité exceptionnelle (fréquence pluriannuelle) n'a pas le temps de s'infiltrer et que l'eau peut cascader dans le talweg à partir du goulot terminal du vallon suspendu. Ce ruissellement entraîne des éléments siliceux tels que galets, graviers de quartz, ou ferrugineux, témoins résiduels des dépôts tertiaires décapés (voir figure n° 5, photographies de la crue de 1993).



Jurassique

- j7-8 — Toarcien inférieur et supérieur (formations de Penne et de Lexos) Calcaires, marnes et argiles noirâtres (50 à 60 m)
- joa — Aalénien inférieur et moyen (formation d'Autoire, membre de La Toulzanie) Calcaires bioclastiques à oncolites et calcaires dolomitiques (environ 15 m)
- j6b-1a — Aalénien supérieur à Bajocien (formation d'Autoire, membres de Calvignac et de Pech-Affamat) - au sommet : micrites, dolosparites et calcite fibroradiée (18 à 20 m) - à la base : calcaires dolomitiques cristallisés, calcaires oolitiques massifs, sparites et dolosparites (45 à 50 m)
- j6b — Domérien supérieur (formation de la "barre à *Pecten*") Calcaires bioclastiques gris et roux (20 à 30 m)
- j6a — Domérien inférieur (formation de Valeyres) Argilites et marnes (40 à 50 m)
- j5 — Carixien (formation de Brian-de-Vère) Marnes et calcaires gris (20 m)

Source

CÉNOZOÏQUE

- e1-5 — Paléocène à Lutétien supérieur. Argiles à graviers du "bassin" de Martel : galets de quartz et sables grossiers argileux (0 à 50 m?)

FORMATIONS SUPERFICIELLES

- C-F — Colluvions et alluvions des vallées secondaires Cailloutis à matrice argileuse, limons (2 à 4 m)

Alluvions de la vallée de la Dordogne

- Fz 1 — Alluvions récentes de la basse plaine Galets, graviers, sables et limons (7 à 20 m) 1 - limite de palier de terrasse

Figure n° 1 - Fond géologique – Agrandissement de la carte B.R.G.M. au 1 :50 000^{e}

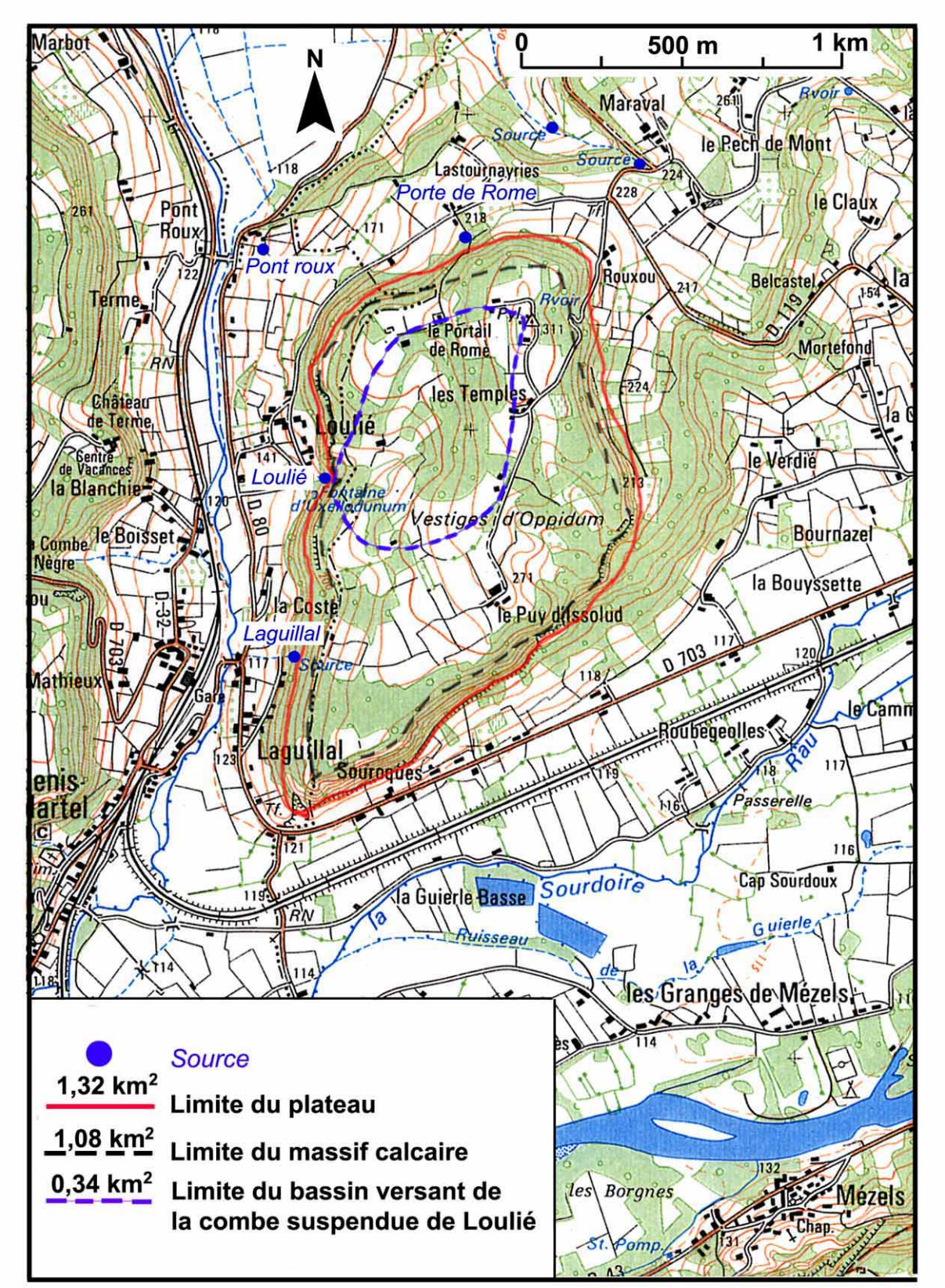


Figure n° 2 - Cadre topographique – Extrait de la carte topographique I.G.N. au 1/25 000e

B/ Géologie

Les formations géologiques se succèdent de haut en bas (figure n° 3)

- **Les cailloutis quaternaires** à matrice argileuse, formés au cours de la phase érosive fluviatile.

- **Les formations détritiques tertiaires** constituées de galets, sables grossiers et argile reposant en placages résiduels en ligne de crête du bassin versant. Ces formations recouvraient tout le calcaire puis ont été érodées par la phase fluviatile. L'infiltration et l'écoulement souterrain entraînent ces matériaux en profondeur. Nous les retrouvons aux sources ou dans les fissures élargies par la karstification.

- **Les calcaires dolomitiques et oolitiques massifs de l'Aalénien supérieur à Bajocien** qui forment en bordure supérieure de la butte une falaise quasiment continue au Sud et à l'Est et discontinue à l'Ouest et au Nord.

- **Le calcaire bioclastique et dolomitique de l'Aalénien inférieur et moyen** qui forme des escarpements notamment au dessus des sources de Loulié.
  Ce calcaire contient une couche à bélemnites 0,9 m au dessus du niveau des sources pérennes de Loulié *(point n°1, cf. chap.2)* et 2 bancs à lumachelles de gryphées et ostrea espacés de 1,2 m visibles dans l'orifice de trop-plein de la Fontaine de Loulié.

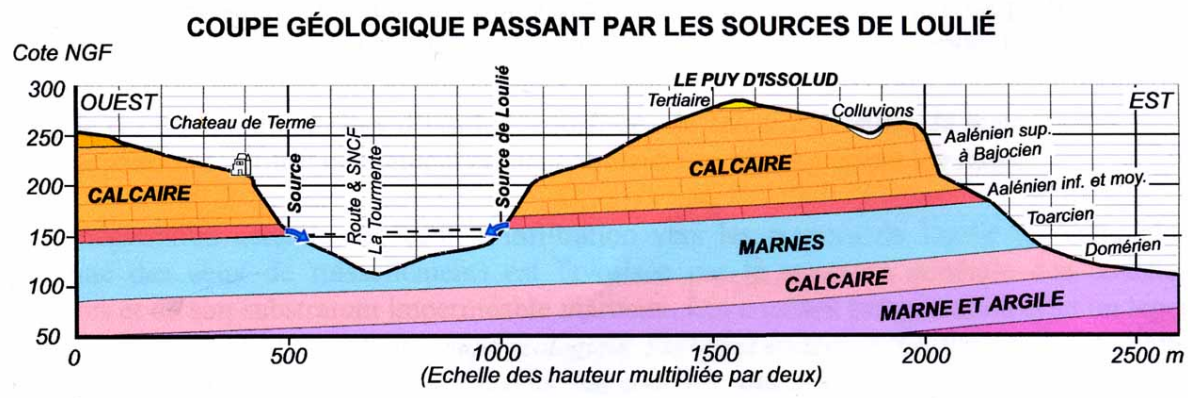


Figure n° 3 - Coupe géologique passant par les sources de Loulié

Les calcaires, bien visibles sur la falaise dominant les sources, forment une masse compacte et homogène. La transition entre ces calcaires perméables (perméabilité de fracturation et de chenaux) et les marnes bleues imperméables sous-jacentes est progressive avec l'apparition de calcaires marneux noduleux au niveau du bassin de trop-plein de la Fontaine de Loulié. Ces formations offrent des propriétés aquifères moins favorables que les calcaires sus-jacents.

Par ailleurs, au niveau des falaises, la perméabilité est augmentée par la décompression du rocher qui favorise l'apparition et l'ouverture de la fracturation.

A noter que les sources pérennes S5 et S6 *(cf. chap.2)* qui alimentent le captage de Loulié sourdent à la faveur d'un même joint de stratification bien marqué. La source S5 est à l'intersection de ce joint avec une fracture orientée N120. L'eau coule sur la dalle du plan de stratification et on note un pendage N135 - 6° E.

La source de trop-plein est située à l'intersection de deux fractures subverticales formant un angle aigu, fractures orientées N175 et N195 et une fracture orientée N70 qui ne se prolonge pas côté versant.

La fracture N195, notamment, a été élargie par dissolution de la roche puis colmatée d'argile et de graviers et galets quartzeux provenant du Tertiaire sus-jacent au calcaire ainsi que par des fragments de silex .

- **Sous les calcaires, la butte repose sur les marnes bleues du Toarcien** qui constituent la base imperméable où s'accumulent les eaux d'infiltration. Les principales sources, dont celles de Loulié, sont situées au contact des calcaires et de ces marnes bleues.

C/ Bassins versants

Nous avons étudié le bassin versant alimentant les sources de Loulié. Il est d'usage de distinguer :

- ♦ Le bassin versant topographique correspondant ici au vallon suspendu creusé par l'érosion fluviatile ancienne, délimité par une ligne de crête. Sa superficie, déterminée par planimétrie, est de 0,34 km^2. Ce bassin versant topographique draine les eaux de surface par ruissellement lors des fortes pluies.

- ♦ Le bassin versant karstique correspondant à l'érosion souterraine des calcaires, le plus souvent superposé au versant topographique avec une surface plus grande. Le bilan d'eau devrait nous permettre d'en estimer sa surface.

Dans le cas de la butte du Puy d'Issolud, constituée de calcaire karstifié, la majorité des eaux de précipitation s'infiltre rapidement et vient alimenter le bassin versant karstique.

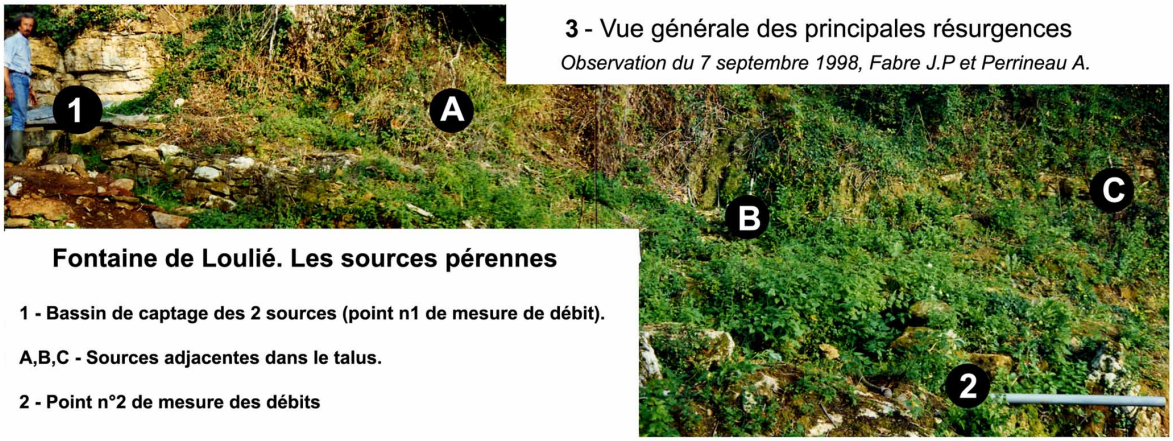
La concentration actuelle des eaux d'infiltration vers les sources de Loulié (et celle plus ancienne des eaux de ruissellement) est favorisée par la structure générale des couches calcaires et de son substratum imperméable marneux. Les couches présentent en effet un léger pendage général vers l'Ouest (figure n° 3). Le flanc Est de la butte est de ce fait dépourvu de sources. De plus, les couches sont affectées par une légère flexure synclinale formant une cuvette dont les sources de Loulié constituent le point bas. Elles sont de ce fait l'exutoire naturel principal des eaux d'infiltration du promontoire du Puy d'Issolud.

2/ SOURCES

A/ Inventaire des sources

1 -Vue générale du Puy d'Issolud depuis le Causse de Martel

2 - Vue générale du vallon suspendu sur le Puy-d'Issolud à l'aplomb des sources de Loulié



3 - Vue générale des principales résurgences

Observation du 7 septembre 1998, Fabre J.P et Perrineau A.

Fontaine de Loulié. Les sources pérennes

1 - Bassin de captage des 2 sources (point n1 de mesure de débit).

A,B,C - Sources adjacentes dans le talus.

2 - Point n°2 de mesure des débits

4- Fontaine de Loulié.
Le bassin supérieur en décrue

5 - Le lavoir
Sous le pont
l'exutoire vers le ruisseau

6 - Vue générale du thalweg
Juste en amont du lavoir
point n° 3 de mesure des débits

Figure n° 4 Fontaine de Loulié : les sources pérennes.

Figure n° 5 - Le ravinement vue de l'aval, crue de 1993

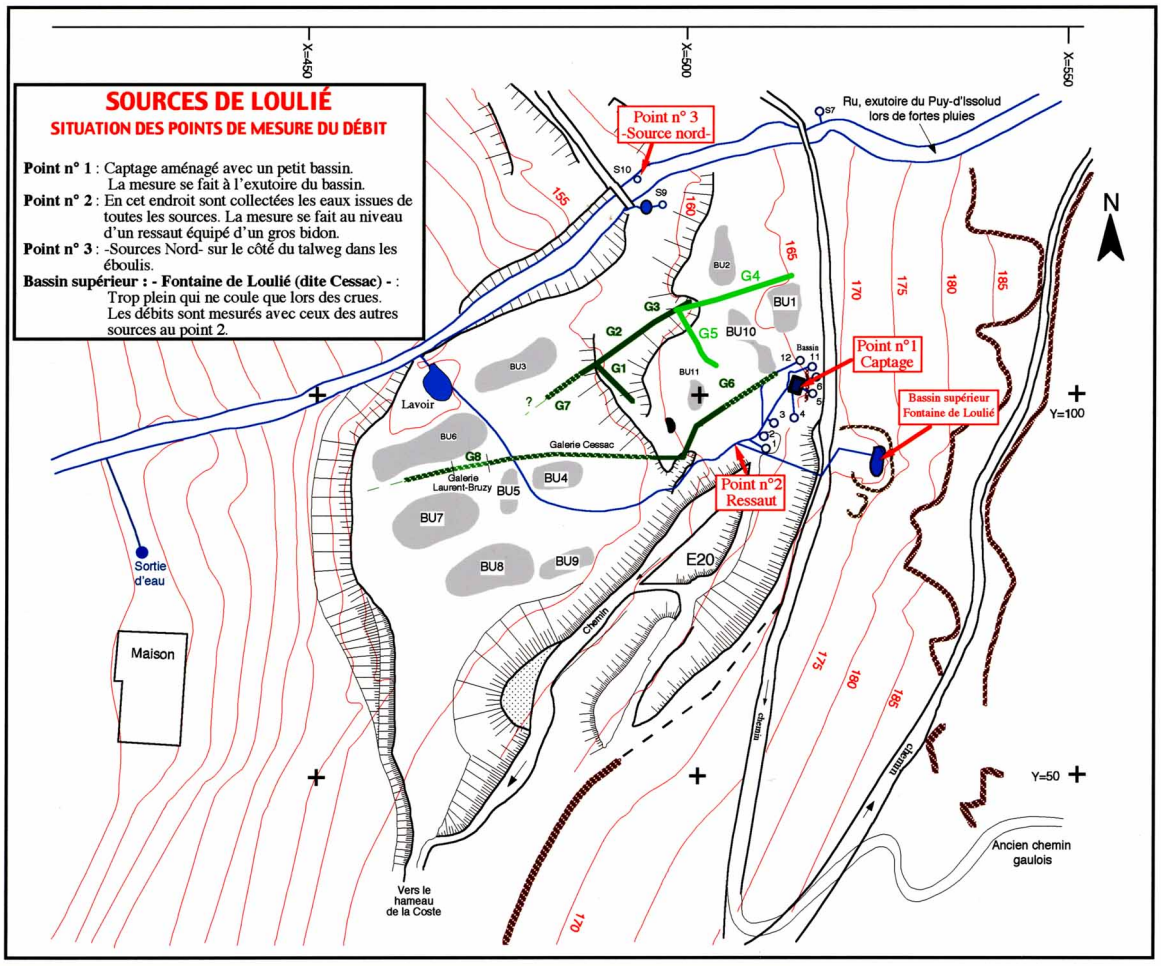


Figure n° 6 - Plan des points de captage pour les mesures de débits, et situation des galeries

Inventaire des sources provenant de la butte-témoin du Puy d'Issolud

- **Les sources de Loulié** (figures n° 4 et 6)

  - Les 2 sources "inférieures" pérennes de Loulié (S5 et S6) du petit bassin de captage (point **P1** de mesure des débits).

  - Les sources "inférieures" (S1, S2, S3, S4 – notées A,B,C sur les photos- et S11, S12 ; figures 4 et 6) qui coulent au pied du talus au voisinage de S5 et S6.

  - La source "supérieure" de Loulié (S0), aussi appelée *"Fontaine de Loulié ou Fontaine Cessac"*, qui ne coule qu'en période de forte pluviosité (point **P0**). Elle est située quelques mètres au-dessus des sources pérennes et sourd à la base même des falaises calcaires d'un bassin quadrangulaire naturel et aménagé par l'homme. Son fonctionnement, en relation avec les sources pérennes sera analysé. Elle ne débite pas en période d'étiage. Lors de fortes pluies ce bassin entre en fonctionnement sans que, aux dires des habitués de la source, le débit des sources inférieures pérennes ne soit sensiblement augmenté. Nos observations et mesures permettront de le vérifier.
  - la source S7 qui sort au pied d'un escarpement de travertins dans une ancienne tranchée de fouilles archéologique.

  L'ensemble des eaux de ces sources est pris en compte dans les mesures de débit au point **P2** (S0 à S6, S11 et S12) et **P3** (id. + S7).

- **Sources dans le talweg "Ravin Nord"** (S8 à S10) : il s'agit de plusieurs petites résurgences (la principale est S10) qui sortent des éboulis en bordure d'un petit ravin qui limite au Nord le site de Loulié. Ce ravin collecte également, en période de fortes précipitations, les eaux de ruissellement qui proviennent du bassin suspendu du plateau calcaire. Le débit est mesuré au niveau du petit pont supérieur qui mène à la fontaine de Loulié (point **P4**).

  Le débit réuni des eaux du ravin et des sources de Loulié est mesuré à la sortie du lavoir (point **P5** ^{bis}) ou un peu plus à l'aval au niveau du pont d'accès à la propriété de madame Burello (point **P5**).

- **Source de "La Porte de Rome"**, située sur le flanc nord du plateau du Puy d'Issolud à 900 m au N.NE de Loulié. Faible débit, l'eau est presque stagnante, 3 points de suintements sont repérés.

- **Source du "Pont Roux"** à 600 m au Nord de Loulié au pied de l'angle Nord-Ouest de la butte. Elle est située dans la propriété de Mme Vieillefosse. C'est une exurgence à flanc de coteau (prairie en pente) au travers d'éboulis de pente argilo-caillouteux surmontant les marnes bleues. Présence de petits éboulements en amont sur une dizaine de mètres dans l'axe de l'écoulement, témoins d'une érosion souterraine par les circulations d'eau.

- **Source de "Laguillal"** à 500 m au Sud de Loulié, située comme les sources de Loulié au pied de la falaise calcaire.

B/ Comparaison des caractéristiques physico-chimiques des sources

Les comparaisons entre les sources portent sur les mesures de débit, de température et de conductivité:

- Débit : mesure au seau gradué de 17 litres et au chronomètre,
- Température : thermomètre en verre au mercure gradué au 1/10 de degré Celsius,
- Conductivité : conductimètre de terrain de type Ecoscan étalonné par une solution standard de KCL (1413 µS/cm à 25°c).

Sources de Loulié et du ravin nord – Mesures

Dates	20/02/2000	18/04/2000	05/09/2000	22/11/2001
Observateurs	FABRE J.P. PERRINEAU A.	FABRE J.P. FABRE Jessi	FABRE J.P. GIRAULT J.P.	FABRE J.P.
Sources inf. (S5, S6)				
Température (°c)	12,7	12,9	13	13,3(S6) 13,2(S5)
Conductivité(µS/cm)	*548*	*544*	*628 (à vérifier)*	*537(S6) 531(S5)*
Débit (l/s)	**0,55**	**0,44**	**0,51**	
Source sup. (S0)				
Température (°c)	12,8	12,8		12,3
Conductivité(µS/cm)	*556*	*540*		*504*
Débit (l/s)	**7,6**	**4,91**	**Eau stagnante**	**Eau stagnante**
Source ravin nord (S10)				
Température (°c)	12,8	12,8	13,7	
Conductivité(µS/cm)	*501*	*497*	*608 (à vérifier)*	
Débit (l/s)	**8**	**non mesurable**	**0,17**	

- Les sources inférieures et supérieures de Loulié ont des valeurs de température et de conductivité très proches. Elles drainent la même eau et appartiennent au même aquifère karstique. En 1998, Jean-Claude Coustou a introduit un colorant (fluorescent) dans le trop plein. Les sources S5 et S6 n'ont pas été colorées. Ainsi il n'y a pas de relation hydraulique directe entre le trop-plein et le captage ; en revanche les deux eaux proviennent d'une zone noyée commune.
- La source du ravin nord est moins minéralisée. Elle a donc une origine plus superficielle et correspond à une eau à temps de séjour moins long dans l'aquifère. Elle s'assèche fréquemment et ne correspond pas à un réservoir karstique important comme celui de Loulié. Il s'agit sans doute d'un petit aquifère dans les éboulis perméables en partie alimentés par les eaux de ruissellement du talweg.

Autres sources du Puy d'Issolud – Mesures

Mesures du 20 février 2000	**Source Porte de Rome**	**Source Pont Roux**	**Source Laguillal**
Température(°c)	10,8 et 8,3	10,6	13,1
Conductivité(µS/cm)		*503*	*550*
Débit (l/s)	**Faible**	**7,5**	**11**

- La source de Laguillal est indépendante de par son éloignement mais présente les mêmes caractéristiques que celles de Loulié. Elle draine les eaux qui traversent les mêmes formations calcaires de l'Aalénien supérieur et Bajocien.
- La source du Pont Roux a une minéralisation voisine de celle du ravin nord. Comme cette dernière, il s'agit vraisemblablement d'une source de piémont dans les éboulis et dépôts de pentes perméables.

C/ Débits d'étiage des sources de Loulié

Les mesures (en l/s) ont été faites aux points suivants :

- P1, correspondant aux sources captées (S5 et S6)
- P2 en aval du ressaut (S0 à S6, S11 et S12)
- P3 à l'entrée des trous d'eau (idem + S7)
- P4 dans le ravin nord en amont de la confluence du lavoir (S8 à S10),
- P5 chez Mme Burello[3], à l'aval, dans le ruisseau qui collecte l'ensemble des eaux d'écoulement (total : S0 à S11).

Tableau des mesures de débit (en l/s)

Dates	Observateurs	P1	*P2*	*P3*	*P4*	*P3+P4*	*P5*
7/9/1998	Fabre/Perrineau	*0.19*	*0.69*	*0.52*	*0.14*	*0.66*	*0.52*
11/9/2000	Fabre J.-P. et Jess	*0.54*	*0.65*	*0.77*	*0.18*	*0.95*	*0.54*
5/9/2000	Fabre/Girault	*0.51*	*0.87*	*0.67*	*0.17*	*0.84*	*0.39*

Il apparaît en aval, chez Mme Burello (P5), un débit inférieur à la somme des venues amont (P3 +P4). Une partie des eaux s'infiltre au niveau des trous d'eau situés au-dessus de la propriété de Mme Burello, trous provenant d'anciennes fouilles archéologiques. Ces trous d'eau ont été comblés depuis ces mesures et les buttes de déblais qui les encadrent (BU3 à BU9) ont été arasées et déplacées.

Entre les points de mesure P2 et P3, il y a une baisse de débit, preuve que des infiltrations commencent à se manifester et que la source S7 n'est autre qu'une résurgence d'eau infiltrée immédiatement en amont.

Le débit des sources du ravin nord (P4) est d'environ le quart de celui des sources de Loulié (P2).

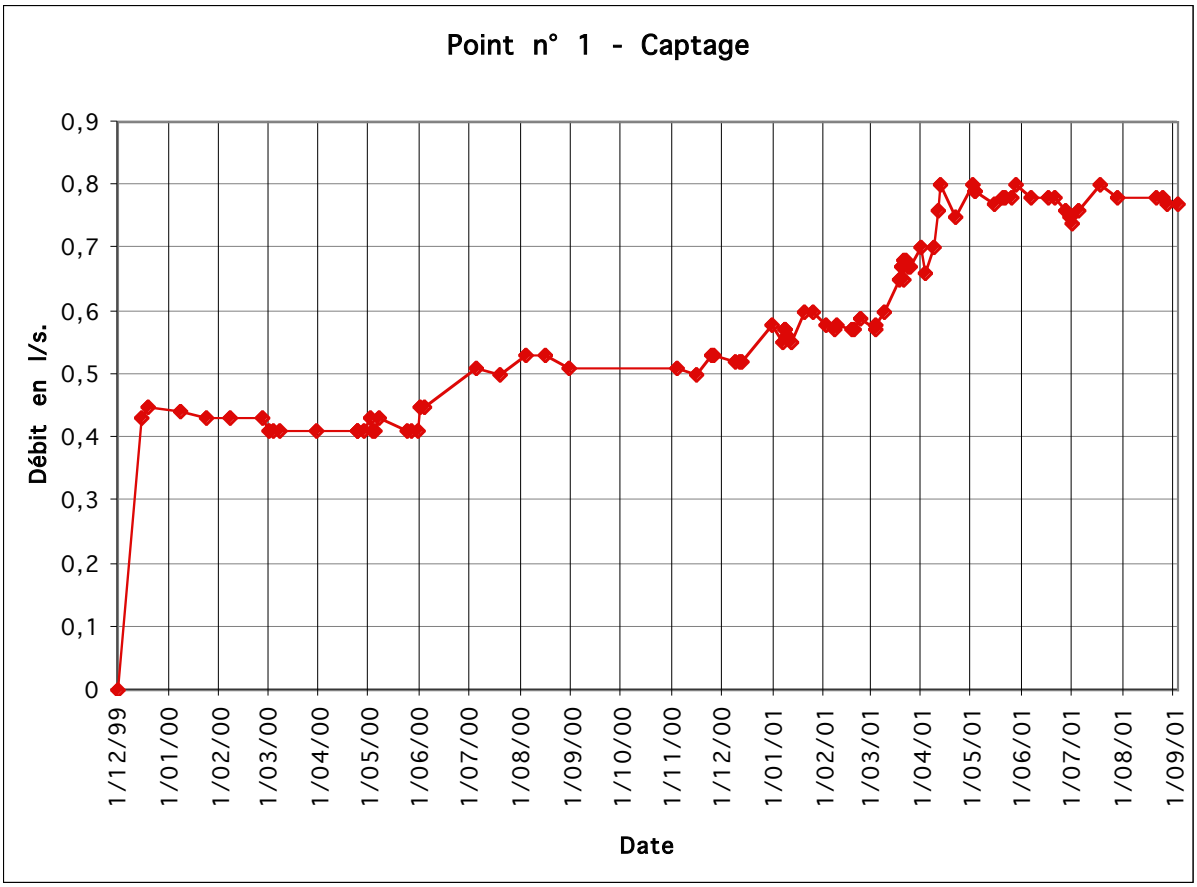
D/ Cycles hydrogéologiques, bilan d'eau et surface du bassin karstique

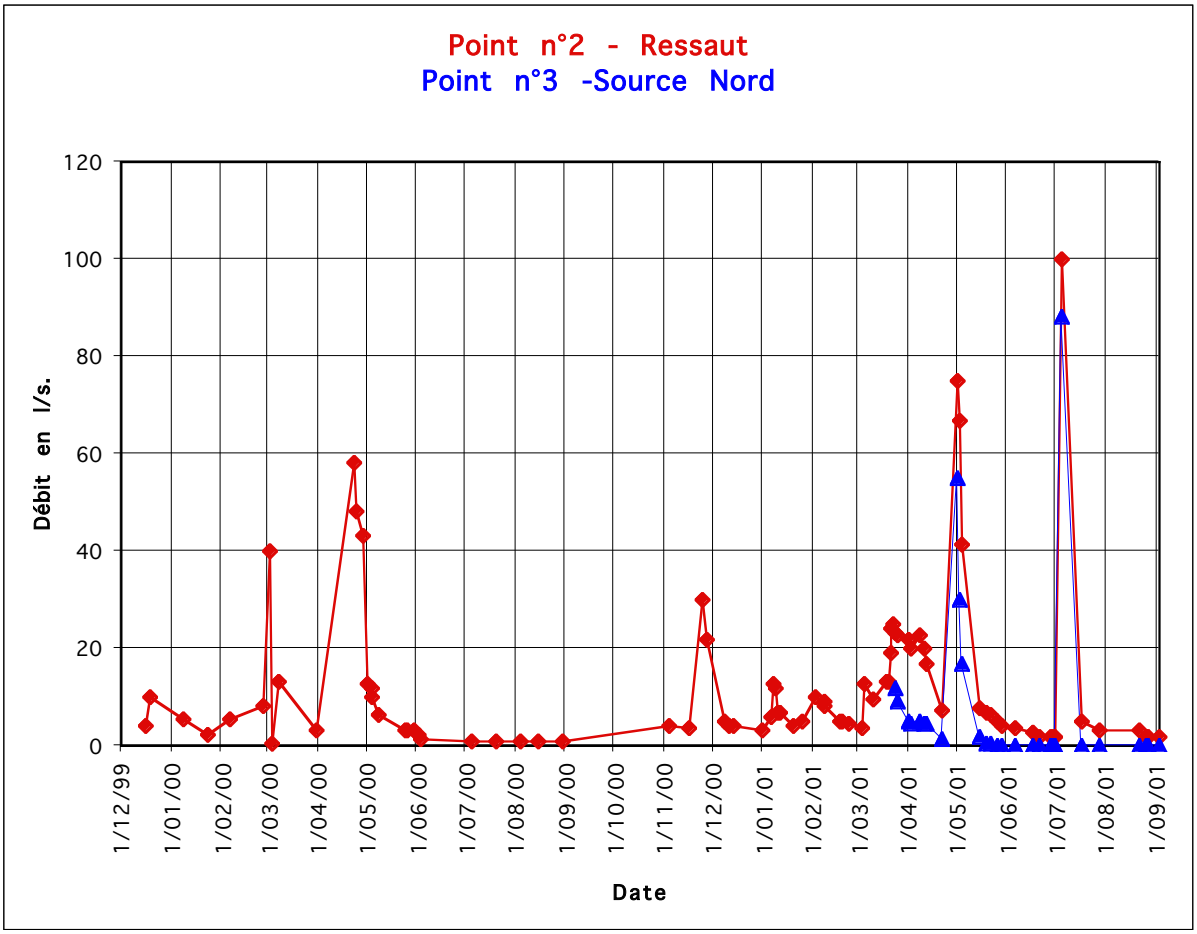
Des mesures de débit ont été effectuées par J.-P. Girault pendant 2 cycles hydrogéologiques du 15 décembre 1999 au 2 septembre 2001. Ces mesures permettent de construire les hydrogrammes correspondant d'une part aux deux sources pérennes captées dans le bassin (courbe rouge, S5 et S6 = bassin de captage: point de mesure P1) et d'autre part à l'ensemble des sources de Loulié (courbe rouge, S0 à S6, S11 et S12, "sources principales" : point de mesure P2) et les sources du ravin nord (courbe bleue : point de mesure P3)

[3] - Madame Olympe Burello était la propriétaire de la maison en aval du site.

Fontaine de Loulié MESURES DE DÉBITS en l/s										
Dates	**Point n°1**	**Point n° 2**	**Dates**	**Point n°1**	**Point n° 2**	**Point n°3**	**Dates**	**Point n°1**	**Point n° 2**	**Point n°3**
15/12/99	0,43	4	24/11/00	0,53	30		1/04/05	0,7	21,7	5
19/12/99	0,45	10	26/11/00	0,53	21,7		3/04/05	0,66	20	4,7
8/01/00	0,44	5,4	8/12/00	0,52	5,1		9/04/05	0,7	22,5	5,2
23/01/00	0,43	2,5	11/12/00	0,52	3,9		11/04/05	0,76	20	4,7
6/02/00	0,43	5,66	13/12/00	0,52	3,9		13/04/05	0,8	16,7	4,7
26/02/00	0,43	8	31/12/00	0,58	3,3		22/04/05	0,75	7,5	1,2
1/03/00	0,41	40	6/01/01	0,55	5,8		2/05/05	0,8	75	55
3/03/00	0,41	0,48	7/01/01	0,57	12,5		3/05/05	0,79	66,7	30
7/03/00	0,41	13,33	8/01/01	0,57	11,7		4/05/05	0,79	41,2	16,7
30/03/00	0,41	3,33	9/01/01	0,56	6,7		16/05/05	0,77	7,7	1,6
23/04/00	0,41	58,33	11/01/01	0,55	7		20/05/05	0,78	7	0,42
24/04/00	0,41	48,33	19/01/01	0,6	4,1		22/05/05	0,78	6,3	0,25
28/04/00	0,41	43,33	24/01/01	0,6	5		26/05/05	0,78	5,1	0
1/05/00	0,43	12,5	2/02/01	0,58	10		29/05/05	0,8	4,2	0
3/05/00	0,41	11,66	7/02/01	0,57	9,2		7/06/05	0,78	3,41	0
4/05/00	0,41	10	8/02/01	0,58	8,3		17/06/05	0,78	2,58	0
7/05/00	0,43	6,33	17/02/01	0,57	5		21/06/05	0,78	2	0
24/05/00	0,41	3,16	19/02/01	0,57	4,8		28/06/05	0,76	1,9	0
26/05/00	0,41	3	22/02/01	0,59	4,7		30/06/05	0,75	1,8	0
30/05/00	0,41	3,08	3/03/01	0,57	3,7		1/07/05	0,74	1,7	0
1/06/00	0,45	2,5	4/03/01	0,58	12,5		5/07/05	0,76	100	88
3/06/00	0,45	1,16	9/03/01	0,6	9,7		18/07/05	0,8	5	0
4/07/00	0,51	1,1	18/03/01	0,65	13,3		29/07/05	0,78	3,25	0
19/07/00	0,5	0,8	20/03/05	0,67	13		22/08/05	0,78	3,25	0
4/08/00	0,53	0,91	21/03/05	0,65	19,2		26/08/05	0,78	1,75	0
15/08/00	0,53	0,86	22/03/05	0,68	24,2		28/08/05	0,77	1,75	0
30/08/00	0,51	0,85	23/03/05	0,68	25		3/09/05	0,77	1,74	0
3/11/00	0,51	4	24/03/05	0,67	23,3	11,7				
15/11/00	0,5	3,8	26/03/05	0,67	22,5	9,2	**Moyenne**	**0,60**	**12,81**	**8,22**

Tableau récapitulatif des mesures de débits en litre/seconde


Point n° 1 - Captage
Débit en l/s.
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
1/12/99
1/01/00
1/02/00
1/03/00
1/04/00
1/05/00
1/06/00
1/07/00
1/08/00
1/09/00
1/10/00
1/11/00
1/12/00
1/01/01
1/02/01
1/03/01
1/04/01
1/05/01
1/06/01
1/07/01
1/08/01
1/09/01
Date


Point n°2 - Ressaut
Point n°3 -Source Nord
Débit en l/s.
120
100
80
60
40
20
0
1/12/99
1/01/00
1/02/00
1/03/00
1/04/00
1/05/00
1/06/00
1/07/00
1/08/00
1/09/00
1/10/00
1/11/00
1/12/00
1/01/01
1/02/01
1/03/01
1/04/01
1/05/01
1/06/01
1/07/01
1/08/01
1/09/01
Date

On constate

- **Au captage** (P1), un débit compris entre 0,4 et 0,8 l/s qui ne varie pas en fonction des conditions météorologiques. Le débit a augmenté par paliers successifs de 0,4 à 0,5, puis 0,6 à 0,8 l/s sans explication (décolmatage soudain de la fissuration en mars 2001).

- **Les débits de l'ensemble des sources de Loulié** (P2) suivent les conditions climatiques avec des pics de crue à 30, 40, 60, 75 et plus de 100 l/s et un débit d'étiage de 1,3 à 2,4 l/s soit un rapport de **16 à 54** entre les débits minima et les débits maxima. A titre de comparaison, le rapport équivalent des débits des sources karstiques du Boulet-Blagour, exutoires d'un bassin versant de prés de 80 km^2 correspondant à la partie Sud-Ouest du Causse de Martel voisin est de **28** (d'après thèse 3^e cycle J.-P. FABRE 1983).
  Ces deux rapports sont du même ordre de grandeur et traduisent une similitude de fonctionnement de type karstique.

- **Les débits des sources du ravin nord** (P4) montrent des débits de crue très voisins des sources précédentes. En revanche ces sources tarissent en étiage et en décrue. L'aquifère n'a pas de réserve, ce qui est confirmé par la minéralisation qui est inférieure à celle des sources de Loulié.

On déduit

- **Fonctionnement :** les sources inférieures (S5 et S6) sont les exutoires pérennes d'un même aquifère ayant pour trop-plein la source supérieure de Loulié et les sources adjacentes qui s'écoulent depuis le flanc du talus (S1 à S4, S11 et S12). Les débits restent constants sans doute du fait de la présence à leur niveau de couches marneuses moins perméables et du fait que les conduits sont colmatés prés des exutoires ce qui crée des pertes de charges importantes qui annulent les pressions créées en crue. Au cours de la sécheresse exceptionnelle de 2003, J.-P. Girault a observé le maintien du débit d'étiage avec une baisse qui s'est avérée très peu sensible aux années précédentes. En revanche les crues se manifestent avec ampleur au trop-plein.
- **Ce dispositif de l'aquifère est à double étage :**
  - L'étage inférieur à conduits obstrués ou mal karstifiés dans le calcaire marneux a un rôle capacitif avec maintien d'un débit d'étiage régulier et soutenu, ce qui est une qualité remarquable pour une alimentation en eau potable.
  - L'étage supérieur à conduits ouverts dans le calcaire massif permet d'évacuer rapidement et sur une courte durée les eaux de crue.

- **Alimentation:** A partir des hydrogrammes, nous pouvons déterminer des valeurs ponctuelles mensuelles qui permettent d'estimer un débit moyen annuel.
  Le débit moyen annuel ainsi déterminé est de 9,6 l/s.
  Par rapport aux sources de Loulié, les sources du ravin nord dont nous n'avons que peu de mesures représentent un débit très faible que nous estimerons au maximum égal à 1 l/s en moyenne annuelle.
  Soit un débit moyen annuel total de 10,6 l/s.
  A partir du module spécifique local estimé à 13,3 l/s/km^2 pour le Causse de martel (J.-P. FABRE 1983, P. MUET 1985, P. MARCHET 1992) nous déduisons de ce débit moyen annuel de 10,6 l/s **une surface du bassin versant karstique de 0,72 km^2.**

Ce résultat est à comparer avec les surfaces des bassins versant topographiques mesurées par planimétrie.

Surface du bassin versant géographique de la combe suspendue de Loulié. ***Planimétrie***	**0,34 km^2**
Surface du plateau calcaire (limite en haut des falaises). ***Planimétrie***	**1,08 km^2**
Surface du massif calcaire (limite à la base des falaises). ***Planimétrie***	**1,32 km^2**
Surface du bassin versant karstique. ***Bilan d'eau***	**0,72 km^2**

Ainsi **les sources de Loulié** drainent les eaux d'infiltration reçues par le bassin versant géographique de la combe suspendue (0,34 km^2) et son élargissement à l'Est incluant une surface équivalente (0,38 km^2), soit plus de 66% de la surface totale du plateau du Puy d'Issolud.
La source de Laguillal draine la partie sud du plateau (0,3 km^2).
La source de "La Porte de Rome" concerne une surface faible en limite nord (0,05 km^2).
La source du "Pont Roux" correspond à une surface en grande partie provenant des prairies adossées à la butte et constituée en sous-sol de dépôts de pente et de marnes et calcaires marneux peu perméables.

3/ GALERIES

A/ Description (visite du 8/11/99)

D'ouest en est, on trouve une galerie principale G8, découverte partiellement par A. Laurent-Bruzy en 1935, qui semble se diviser dans sa partie amont en deux branches longitudinales. L'une, au sud, trouvée en 1865 par J.-B. Cessac (G6) ; l'autre, au nord, comprend les tronçons G7, G1, G2, G3. Deux galeries supérieures G4 et G5 sont des contre-sapes gauloises pour intercepter les sapeurs romains (figure n° 6).

- La galerie sud (dite Cessac, G6 sur le plan) est creusée dans l'important massif de travertin qui s'est développé juste sous les résurgences de la source. L'entrée est située à quelques mètres du pied de la chute d'eau produite dans le travertin. Elle est parallèle à une tranchée, ancienne fouille archéologique. Son fond est rempli de vase, mélange d'argile de surface et de produits de la dégradation des tufs.

En partie inférieure de la galerie, on rencontre les marnes bleues. A ce niveau la galerie oblique sur la gauche en longeant ces marnes bleues qui forment la base de son parement droit, surmonté par des travertins. Sur le parement gauche de la galerie on trouve les travertins. La galerie s'élève ensuite. Son déblaiement a été arrêté sur un important et épais concrétionnement calcitique.

Depuis cette visite, le prolongement de cette galerie a été retrouvé en juin 2003 par recreusement d'une tranchée réalisée par Laurent-Bruzy en 1921. D'après les documents de l'époque, ce dernier aurait dégagé à ciel ouvert la partie amont de cette galerie jusqu'au

voisinage du bassin de captage actuel. Les travaux récents ont retrouvé l'empreinte de la galerie qui suivait le contact des marnes bleues et du calcaire.

A noter que cette galerie et les fouilles anciennes réalisées pour la dégager jusqu'au voisinage des sources doivent contribuer encore à l'heure actuelle à drainer une partie des eaux malgré le rebouchage et le colmatage partiels par des dépôts de calcite. Ces sources avaient donc sans doute à l'origine un débit légèrement plus important.

La galerie sud recoupe quatre formations géologiques : les travertins, dans lesquels elles sont creusées, localement des éboulis mêlés aux travertins, les marnes bleues dont elles suivent la limite supérieure et les calcaires rencontrés au contact des marnes bleues vers l'extrémité amont de la galerie Cessac, au voisinage immédiat des sources principales.

Le réseau de galeries nord n'a pas permis aux sapeurs romains de trouver les marnes noires. La galerie G3 semble avoir été abandonnée suite aux difficultés de creusement dans un terrain instable composé d'argile détrempée et d'éboulis de pente de versant. Mais, plus vraisemblablement à cause de la contre-sape gauloise (galerie G4). La galerie latérale G5 pourrait être également une contre-sape pour intercepter les Romains au niveau de la galerie Cessac. L'extrémité de cette galerie buttant dans un cailloutis à gélifractions n'aurait pas permis aux Gaulois d'aller plus loin.

D'après Jean-Claude Bessac, les arguments techniques en faveur d'une rencontre de deux équipes de sapeurs s'appliquent de la même manière à une équipe de Gaulois qui aurait œuvré dans la galerie G4 pour essayer d'arrêter la progression des Romains. Dans cette hypothèse, la galerie G4 deviendrait une contre-sape et son annexe G5, une galerie de recherche qui aurait été orientée au sud par les coups d'outils des sapeurs romains de G6 creusant à environ 6 ou 7 m de là. Mais la rencontre entre Gaulois et Romains aurait été plus rapide en G3.

B/ Relation des galeries avec l'aquifère

La coupe synthétique ci-après montre les relations entre la géologie et les sources et entre les galeries et l'aquifère.

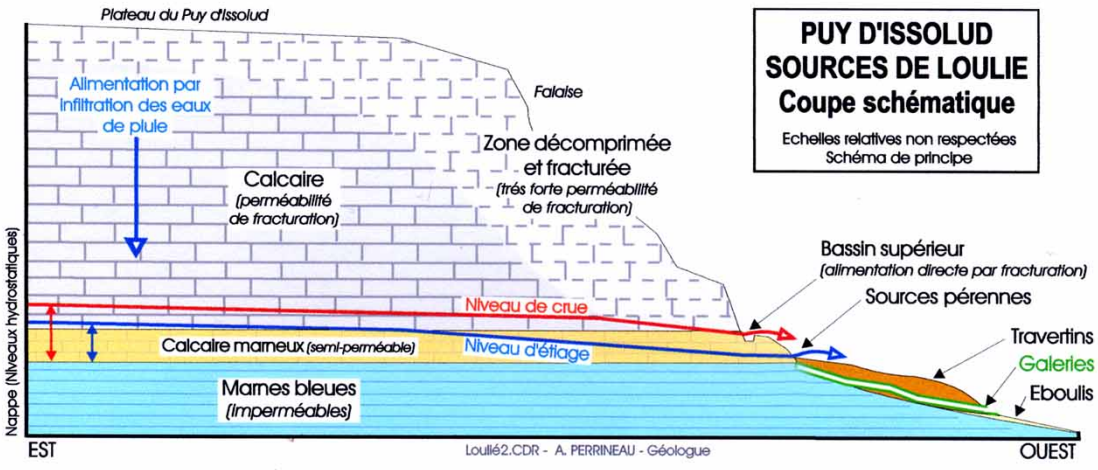


Figure n° 7 – Sources de Loulié : coupe schématique

C'est un aquifère à deux niveaux :

- Un niveau inférieur peu karstifié qui stocke l'eau et la restitue de façon régulière et permanente comme lors de la période de sécheresse en 2003, offrant aux sources inférieures de Loulié un intérêt exceptionnel. **En période d'étiage** l'écoulement vers ces sources pérennes s'effectue dans les calcaires marneux situés à la base du calcaire massif. La faible perméabilité produit des fortes pertes de charge qui assurent une vidange lente et progressive de la nappe.

- Un niveau supérieur bien drainé et développé dans le calcaire massif. Son exutoire correspond au bassin supérieur qui fonctionne en trop-plein efficacement pendant les crues. **En période de forte pluviosité**, la faible perméabilité des niveaux inférieurs ne permet pas une expression de la mise en charge par une augmentation notable des débits aux sources inférieures. Le niveau de la nappe s'élève et les eaux trouvent alors un cheminement facile à travers les chenaux creusés dans le calcaire massif pour sourdre bruyamment et abondamment par le bassin supérieur.

Comme les eaux de ces sources sont sursaturées en carbonate de calcium, elles le déposent sur le moindre ressaut qu'elles parcourent à l'air libre. Il en résulte avec le temps (plusieurs millénaires) la formation d'un important dépôt de travertins sur les marnes bleues qui constituent la base de l'aquifère.

A ces dépôts se mêlent des éboulis et blocs parfois volumineux qui proviennent des éboulements successifs de la falaise. Ces éboulements se produisent principalement au cours de ruissellements exceptionnels qui font suite à des orages violents comme celui qui s'est produit en 1993. Les photographies ci-jointes (figure n° 5) montrent, par l'ampleur des désordres produits, la force des eaux et sa capacité à déplacer des blocs issus de l'effondrement des surplombs.

A noter comme l'a constaté Guy Astruc (courrier du 4 septembre 1998) que le dépôt calcaire se produit essentiellement en dessous des sources pérennes qui sont sursaturées en carbonates et soumises à une décompression. En revanche les eaux du trop-plein à temps de séjour moins long dans l'aquifère ne sont pas à l'origine de travertins. Plus récemment, la fouille du trop-plein par J. P. Girault a montré que son remplissage ne contenait aucun indice archéologique et qu'il devait être **complètement colmaté à l'époque gauloise**, ce qui explique aussi que le travertin ne se développe pas à son niveau. `

CONCLUSIONS

Cette étude hydrogéologique des sources de Loulié, étalée sur 4 ans de mesures et d'observations diverses, a permis de dégager les conclusions principales suivantes :

Les sources de Loulié:

Elles constituent la résurgence principale des eaux d'infiltrations à travers le massif calcaire de la butte du Puy d'Issolud. Les caractéristiques topographiques et géologiques de la butte concentrent en effet vers ces sources la majorité des eaux de ce petit bassin versant. Ces sources de type karstique se caractérisent par un fonctionnement particulier. On peut y distinguer :

- Un ensemble inférieur de petites résurgences pérennes, même en période de sécheresse, au débit relativement faible (0,4 à 0,8 l/s au niveau du captage) mais pratiquement constant. Ce débit a pu être plus important dans le passé.

- Un exutoire temporaire supérieur ("*La Fontaine de Loulié")* qui ne fonctionne qu'en période de crue et sert de trop plein à la nappe karstique. L'absence de dépôts de travertins sous cet exutoire atteste qu'il ne s'agissait pas d'une source pérenne dans le passé.

- Quelques résurgences au voisinage en fond de thalweg, d'importance secondaire, non pérennes et au débit irrégulier.

Les sources inférieures ont fait l'objet de la convoitise du fait du maintien d'un débit conséquent en période estivale et de la possibilité de les atteindre par creusement à travers les travertins. En revanche les sources supérieures avaient peu d'intérêt.

Cependant le fonctionnement de ces sources devait être différent à l'époque gauloise, le trop-plein actuel ne coulait pas. Les sources adjacentes au captage actuel devaient assurer l'exhaure de l'excédent de crue.

Les galeries

Les travertins constituent un matériau tendre et de très bonne tenue. Il est facile d'y creuser une galerie et de les traverser de façon à rejoindre la base de l'aquifère en suivant les marnes bleues.

Le creusement de telles galeries pour l'exploitation des travertins parait peu vraisemblable (aspect des galeries, pentes, directions, exploitation bien plus facile à réaliser à partir d'un front de taille à ciel ouvert). Le captage des eaux des résurgences principales paraît une hypothèse beaucoup plus plausible, ce que confirme le fait que la galerie Cessac va en direction du voisinage immédiat des sources et suit le plus souvent le contact avec les marnes bleues qui constituent la base de l'aquifère. Au cours des recherches le dégagement supérieur de la galerie Cessac (qui arrive au contact du rocher et de la marne bleue a permis de reproduire une capture analogue à celle réussie par les romains à l'époque du siège d'Uxellodunum et de sa principale source d'approvisionnement en eau potable. Un tel captage réalisé à un niveau inférieur à celui des exsurgences peut entraîner en période d'étiage un rabattement local suffisant du niveau de la nappe et le tarissement rapide des sources au profit de l'écoulement dans la galerie.

Bibliographie

- FABRE J.-P. (1983) - Étude hydrogéologique de la partie sud-ouest du causse de Martel (Quercy). Thèse 3e cycle, Université P. Sabatier Toulouse et Laboratoire CNRS Moulis, 27 octobre 1983.

- MARCHET P. (1991) - Approche de la structure et de l'évolution des systèmes aquifères karstiques par l'analyse de leur fonctionnement, application au NW du Causse de Martel (Quercy-France).

- MUET P. (1985) - Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes aquifères karstiques du Nord du Causse de Martel (Corrèze). Thèse 3e cycle, Université d'Orléans.