Commune de Sassenage, Isère

Grotte des Cuves de Sassenage

Étude hydraulique des Cuves de Sassenage

Application à la sécurisation du circuit touristique

(rapport de synthèse final)

Rapport fait par la commission scientifique
du Comité Départemental de spéléologie de l'Isère

Baudouin LISMONDE

le 8 décembre 2004
révisé le 5 mars 2005

Remerciements

Les collaborateurs de cette étude

Une étude dans une grotte importante comme les Cuves de Sassenage suppose beaucoup de visites. De nombreux spéléos sont venus avec moi, pour observer le fonctionnement hydraulique, m'aider à porter et installer les Luirographes, plonger des siphons, lever la topographie, faire des observations géologiques. Ce rapport est donc le fruit d'une collaboration. Je me contenterai de citer les noms de toutes les personnes qui ont collaboré. Ce sont tous des bénévoles. Cette étude leur doit tout.

Plusieurs d'entre eux sont mes étudiants de l'IUT de Génie Thermique de Grenoble. Les autres sont des membres de mon club du SGCAF ou d'autres clubs grenoblois. D'autres enfin, viennent de diverses régions de France (Paris et Lyon principalement). On a indiqué pour chacun le nombre de sorties.

Abdilla (Vivien) (1), Accorsi (Donald) (2), Aitken (Frédéric) (4), Bedon (Frédéric) (3), Beurier (Nicolas) (1), Bocquet (Hadrien) (1), Bois (Jean-Baptiste) (1), Bouquet (Mathieu) (1), Bouttin (Franck) (3), Bravo (Yann) (4), Cabrejas (Philippe) (1), Cadoux (Jean) (1), Cairo (Yann) (4), Cannillo (Claude) (1), Carrier (Émmanuel) (1), Carrier (Christine) (1), Carus (Nicole) (1), Charpentier (Francis) (1), Chatain (x) (1), Clec'h (Pascal) (11), Commarmot (Jean-Marc) (2), Contet (Yves) (1), Cotte (Samuel) (1), Daburon (Agnès) (11), Dalban (Émmanuel) (2), Diraison (Gaël) (1), Douvry (Nadine) (1), Dubouis (Élise) (1), Dumont (Stéphane) (1), Fabbri (Delphine (2), Faibre (Fabrice) (1), Ferrandeau (Guy) (2), Fillon (Damien) (1), Fontaine (Guillaume) (1), Fouard (Chantal) (25), Fouard (Émmanuel) (16), Franconie (Gérard) (1), Fourgous (Barnabé) (1), Garnier (Bruno) (4), Gauthier (Hervé) (1), Gerbaux (Martin) (1), Giraud (Damien) (1), Gondras (Émmanuel) (1), Grandcolas (Jean-Philippe) (1), Guis (Michel) (1), Hauser (Bertrand) (1), Héraud (Jean) (4), Julien (Michel) (2), Lacchio (William) (1), Landry (François) (1), Landry (Régine) (1), Laroche-Joubert (Éric) (1), Laverdure (Jacky) (1), Lips (Bernard) (1), Lips (Stéphane) (1), Lismonde (Arnaud) (1), Lismonde (Baudouin) (120), Lismonde (Martin) (1), Loiseleur (Bernard) (1), Masson (Guy) (1), Metzger (Pierre) (2), Michel (Jean-Philippe) (1), Montauffier (Agnès) (4), Pacaut (Cécile) (3), Payet (Nathalie) (1), Pellegri (Olivier) (3), Pianzani (David) (1), Poggia (Frédéric) (3), Revil (Lionel) (2), Rocourt (Jean-Louis) (1), Roest (David de) (5), Roman (Michael) (1), Schut (Pierre-Olaf) (11), Séjourné (Jean-Jacques et Antoine) (1), Sérafin (Hervé) (4), Stratton (Bernt) (1), Tarazona (Laurent) (3), Thérond (Robert) (2), Trebbi (Mina) (1), Trebbi (Silvia) (17), Valentin (Bertrand) (1), Villard (Valérie) (4), Vilatte (Thierry) (3), Viola (Marie-Thérèse) (1), Wadel (Alain et Arlette) (1), Walckiers (Ingrid) (1), X (Yannick) (1), X2 (Sylvie) (2), X3 (Jérôme) (3), X4 (Marc) (1), X5 (Jeff) (1), X6 (Hervé) (2), X7 (1), S8 (1), X9 (1), Zanardi (Yannick) (2), soit 458 journées-participants.

Remerciements pour la relecture à Chantal Fouard.

Sommaire

Préambule
Introduction

Plan des Cuves …….. 08

I- Corrélations et tarages
I-1- Les sept campagnes de mesures avec les 5 Luirographes …… 11
I-2- Les différents sites étudiés …… 14
1-3- Le Luirographe dans le Germe …… 14
I-4- Le Luirographe de la grotte Carré …… 16
I-5- La Herse et la porte inférieure …… 17
I-6- Le barrage des Quatre Vents …… 17
I-7- Les Enfers …… 19
I-8- Le Luirographe des Enfers ……... 20
I-9- Le Luirographe sous la salle Saint Bruno ……... 25
I-10- L'échelle à la salle à Manger …….. 27
I-11- Le luirographe de la salle à Manger ……... 31
I-12- Le Luirographe du bas du puits Lavigne …… 33
I-13- Le Luirographe du siphon 1 de la galerie Ouest ……..… 34
I-14- Le Luirographe du siphon 2 de la galerie Ouest …… 35

II- Les crues, déroulement et délais
II-1- Les trajets de l'eau à l'étiage et en crue, les trois nœuds …… 43
II-2- Déroulement d'une crue aux différents Luirographes …… 48
II-3- Progression de la vague de crue, les délais …… 54

III- Modèle physique et mathématique
III-1- Modélisation hydraulique …… 61
III-2- Modélisation numérique …….. 66
III-3- Exploitation du modèle mathématique …… 69

IV- Hydrologie du gouffre Berger et protocole de sécurisation
IV-1- Estimation des différentes crues venant du gouffre Berger …….. 75
IV-2- L'installation matérielle …… 82
IV-3- Le protocole de sécurisation …… 83
IV-4- Test du protocole pour les crues des 11 et 20 août 2004 ……...…… 86

Conclusions …… 88
Bibliographie ……..89

Document joint : topographie en plan au 1/500e.
Annexe 1- Contexte et déroulement de l'étude ……..…… 91
A1-1- L'incident ……91
A1-2- Commission de Sécurité et proposition en annexe …… 93
A1-3- Convention entre la commune de Sassenage et le CDS Isère …… 99
A1-4- Les 5 rapports d'avancement …… 106
Annexe 2- Les 7 campagnes. Les différentes observations et mesures de débits …….. 113
Annexe 3- Code en Visual Basic ……125

Photographies ; le porche Carré page 10, le barrage des Quatre Vents page 42, le 2e Escalier des Enfers page 59, le siphon 1 de la galerie Ouest et mousse de crue aux Enfers page 73.

Carnet d'adresses utiles

Mairie de Sassenage, BP 31, 38360 Sassenage. Tél : 04 76 27 48 63
ville.sassenage@wanadoo.fr
Services techniques de la commune de Sassenage
Le guide des Cuves de Sassenage. Hervé Sérafin, impasse des Plâtres, 38360 Sassenage. Tél : 04 76 27 32 78
Société spéléo-Secours de l'Isère. Thierry Larribe, rue Gabriel Peri, 38470 Vinay. Tél : 04 76 36 70 13
Protection Civile de l'Isère, Anne Banes, 12 place de Verdun, BP 1046, 38021 Grenoble Cedex1. Tél : 04 76 60 33 87
DDAF de l'Isère. Jérôme Biju-Duval 42 avenue Marcelin Berthelot, 38100 Grenoble. Tél : 04 76 33 45 71
Laurent Morel 24 rue René, 69100 Villeurbanne 04 72 65 08 73
Comité Départemental de spéléologie de l'Isère. Président : Philippe Cabrejas, 7 rue de l'Industrie, 38320 Eybens
Baudouin Lismonde, 28 rue de la Bajatière, 38100, Grenoble. Tél 04 76 42 59 16
baudouin.lismonde @wanadoo.fr

Préambule

Ce document est une étude hydraulique des Cuves de Sassenage, élaborée par la commission scientifique du CDS Isère pour la commune de Sassenage, en vue d'augmenter la sécurité de la visite des touristes.

Ce travail a été démarré suite à un incident en mai 2002 dans la partie touristique de la grotte. Un groupe de jeunes collégiens emmenés par le guide des Cuves est resté bloqué quelques heures suite à une crue soudaine qui a ennoyé une partie de la grotte touristique. La commission de sécurité réunie à la demande du maire de Sassenage et sous la direction de la Sécurité Civile et de la Société Spéléo Secours de l'Isère a souligné l'intérêt d'une meilleure connaissance du fonctionnement hydraulique de la grotte.

Ce rapport constitue tout d'abord le rapport de synthèse final de la convention entre la commune de Sassenage et la commission scientifique du Comité Départemental de spéléologie de l'Isère, dont le texte est rappelé en annexe 1. Il devrait servir de base pour une décision de la commission de sécurité au sujet de la modification du règlement de la visite en ce qui concerne la présence d'eau vive dans la partie touristique. En effet, l'attraction majeure de cette visite est, pour les touristes, de cotoyer un cours d'eau souterrain avec son eau claire, courante, cascadante et animant des galeries, qui sinon manqueraient de charmes. Cet attrait s'accompagnant d'un risque, il est normal d'essayer de le circonscrire au maximum.

Mais cette étude dépasse le seul contexte de cette convention et s'inscrit dans une autre perspective qui est plus scientifique et concerne l'élucidation des propriétés les plus importantes des écoulements souterrains karstiques. Trois de ces propriétés sont mises en évidence :

- La première est spéléologique et concerne la complexité des itinéraires de l'eau.
- La deuxième est d'ordre hydraulique. Elle se traduit par un comportement à bifurcation de la relation hauteur-débit (courbe de tarage) d'un cours d'eau souterrain lors de l'ennoiement du conduit, avec cycle d'hystérésis possible.
- La troisième est hydrologique et spéléogénétique. Il s'agit du rôle très important des déversoirs de trop-plein dans des galeries semi actives, ce qui constituent la règle des réseaux construits sur l'abaissement d'un niveau de base.

Le travail qui a conduit à ce rapport a présenté plusieurs facettes :

- Levé d'une partie de la topographie car la topographie ancienne qui avait le mérite d'exister présentait, au moins dans le début de la cavité, des erreurs altimétriques.
- Visites régulières dans le réseau pour noter certains aspects du comportement hydraulique.
- Installation et maintenance d'un réseau de cinq capteurs enregistreurs de pression (et donc du niveau de l'eau).
- Dépouillement des nombreuses données (6.10^6) et exploitation pour en faire un modèle physique, puis construction d'un modèle mathématique de modélisation des crues.

Introduction et résumé

Annexe 1- Contexte et déroulement

On trouvera dans l'annexe 1, les textes du projet d'étude soumis à la commission de sécurité de la préfecture, ainsi que le texte complet de la convention entre le CDS Isère et la commune de Sassenage, textes qui détaillent la méthodologie adoptée. Rappelons-en ici les principales caractéristiques. Il s'agit de comprendre le fonctionnement de la grotte aussi bien en étiage qu'en crue. En étiage, les chemins de l'eau, comme on le verra, sont pratiquement inconnus. En crue en revanche, l'eau est omniprésente, mais l'accès à la grotte est rendu impossible par l'ennoiement de plusieurs galeries près de l'entrée.

Annexe 2- Mesures aux Luirographes et observations

La stratégie a été de visiter souvent la grotte, quand c'est possible, pour prendre des repères sur les hauteurs d'eau, les cheminements de l'eau en fonction des débits. En effet, dans un cours d'eau, la hauteur est en relation avec le débit du cours d'eau. Des mesures de débits ont été faites afin de pouvoir construire des courbes de tarages (c'est-à-dire la relation hauteur d'eau, débit du cours d'eau) en différents points. Ces données ont été rapportées dans l'annexe 2.

Pour les crues, l'impossibilité de parcourir la cavité nous a conduit à privilégier au contraire l'observation de la hauteur d'eau par des capteurs disposés en des sites clés du réseau. Le choix de l'appareil s'est porté sur le Luirographe, nettement moins coûteux que des appareils similaires. Nous verrons que de nombreuses pannes ont malheureusement émaillé les campagnes de mesures.

Chapitre 1- Corrélations et courbes de tarage

Les premières mesures aux Luirographes nous ont montré que le secteur des Enfers était particulier car une bifurcation se produisait dans le comportement à partir d'un certain débit. La courbe de tarage voyait sa pente se modifier brusquement. Nous avons identifié ce phénomène qui traduit l'ennoiement des conduits de la perte des Enfers.

En rapprochant toutes les observations, nous avons établi les corrélations entre les niveaux de l'eau en différents points de la grotte. Puis, en utilisant les mesures de débits faites à différentes époques, nous avons proposé des courbes de tarage en ces points. Malheureusement, l'absence de mesure de débit en crue, nous laisse une imprécision pour les hauts débits.

Chapitre 2- Scénario des crues

Ensuite, nous avons essayé de comprendre les observations faites. Ce qui nous a amené à définir trois zones de mise en charge, que nous avons appelées les nœuds du réseau. Pour ces nœuds nous avons essayé de déterminer les caractéristiques hydrauliques en terme de relation entre débit et perte de charge. L'analyse des décrues, en général assez lentes, nous a donné les courbes de tarages. L'examen des transitoires de montée de crue nous a conduit par ailleurs à

une estimation des volumes d'eau stockée le long de la cavité. Sauf le volume amont que nous n'avons estimé que par des considérations topographiques.

Nous avons mis en évidence un phénomène récurrent de débordement du seuil de la galerie Ouest. Ce débordement peut s'accompagner d'un lâcher d'eau important qui se traduit par une vague de crue se propageant vers l'aval. Ce phénomène, associé à la bifurcation vue plus haut, explique le caractère potentiellement dangereux de la galerie des Enfers.

Cette découverte nous a fait changé l'idée du protocole. Il fallait détecter le lâcher de la vague de crue au démarrage, c'est-à-dire au niveau des siphons de la galerie Ouest. Ce report vers les amonts de la grotte nous a compliqué l'étude, mais le résultat a été que les relations entre le gouffre Berger et les Cuves de Sassenage ont été mieux comprises. Le dernier siphon amont des Cuves est connecté, malgré la distance, directement avec le dernier siphon aval du gouffre Berger.

Chapitre 3- Modèle mathématique

Nous avons construit un modèle physique approché de la cavité, suffisant pour décrire les crues et nous en avons déduit un modèle mathématique, qui serait encore à affiner pour les grandes crues, et qui permet de retrouver quelques caractéristiques des petites crues.

Chapitre 4- Hydrologie et préconisation de sécurité

Une courte étude hydrologique sur les précipitations possibles au plateau de Sornin et une évaluation de l'étendue du bassin versant du gouffre Berger, a débouché sur une estimation de la crue décennale à l'amont des Cuves de Sassenage. La méthode utilisée est celle de Crupedix du Cemagref de Grenoble.

La connaissance du scénario des crues et la mesure des délais de propagation des vagues de crue nous a permis de préconiser des règles pour la sécurité des touristes. Ces règles dépendent de critères qui seront proposés par la commission de sécurité sur la base de cette étude.

Limites de l'étude

Les Cuves de Sassenage constitue l'émergence des eaux tombant sur le plateau Charvet et de Sornin. Nous nous limitons ici au fonctionnement côté Sornin.

Cette petite étude ne couvre pas tous les aspects hydrologiques des Cuves de Sassenage. Nous avons certes mesuré des débits d'étiage, mais nous n'avons pas de chroniques suffisamment longues pour fournir des valeurs aussi banales que le débit moyen du Germe. Les années 2003 et 2004 étaient par ailleurs totalement non représentatives. Il faut se reporter pour cela aux études antérieures de la DDAF (Gautier-Durrafour, 1969) ou à la thèse d'Al-Anbar (1979). On trouvera une bibliographie abondante dans l'ouvrage en préparation sur la grotte.

Chapitre 1

Corrélations hydrologiques et courbes de tarage

On passe en revue, pour commencer, les 7 campagnes de mesure de hauteur d'eau à l'aide des Luirographes.

Ensuite est présentée, pour plusieurs sites caractéristique des Cuves, la synthèse des observations dont le détail se trouve dans l'annexe 2. Il s'agit, d'une part, des corrélations entre les différents niveaux d'eau dans les Cuves, et d'autre part, des corrélations établies grâce aux Luirographes installés. On essaye de donner des courbes de tarage (c'est-à-dire les relations hauteur-débit) aux différents sites de mesure. Le fonctionnement en régime fortement varié, nous renseigne sur les volumes d'eau stockés pendant les montées des crues, et libérés pendant les décrues. Nous avons ainsi estimé deux volumes.

Pour la salle à Manger, nous avons aussi utilisé un tarage direct à l'aide d'une relation théorique (vitesse critique d'un déversoir) et de la mesure fine des hauteurs de déversement.

1- Les sept campagnes de mesures avec les 5 Luirographes

Afin de mesurer les hauteurs d'eau en fonction du temps (et donc en fonction des débits) en différents points du circuit touristique des Cuves de Sassenage, cinq limnigraphes (appelés Luirographes) ont été commandés par la commune de Sassenage à Laurent Morel. Ils ont été mis en service pour la première fois fin décembre 2002. 7 campagnes successives ont été nécessaires, soit qu'un ou plusieurs appareils étaient en panne, soit qu'aucune crue ne se soit présentée pendant la campagne de mesure.

1-1- Les différents Luirographes

Un Luirographe est un appareil autonome (pile) et étanche, qui est muni d'un capteur de pression et d'un système électronique d'enregistrement des valeurs mesurées. Il a été conçu spécialement pour les applications dans les réseaux souterrains et le premier prototype a été installé à la grotte de la Luire, d'où le nom de l'appareil.

Le constructeur est Laurent Morel qui développe des appareils conçus spécialement pour l'utilisation souterraine : solidité, autonomie, précision, étanchéité. Les problèmes que nous avons rencontrés avec ces appareils proviennent d'un composant défectueux (une nappe de câbles qui présentait des fuites de courant). Ce composant a été changé à la 6e campagne.

Le capot supérieur est simplement enfoncé dans le corps de l'appareil. Un joint torique assure l'étanchéité.

La période d'échantillonnage a été d'une valeur par minute pour les 6 premières campagnes de mesures et pour tous les piézo-enregistreurs. C'est-à-dire que les mémoires enregistraient

toutes les minutes la valeur de la pression. Les hauteurs maxi retenues dépassent celles des plus grandes crues connues (juillet 1996). La mémoire étant de 87 382 valeurs, cela représente une autonomie de 60,6 jours.

À partir de la 7e campagne (avril 2004) la fréquence d'échantillonnage est passée à la valeur d'une mesure toutes les trois minutes pour tous les Luirographes. L'autonomie est donc passée à 181,8 jours, soit presque six mois.

Fig. 1-1- Photo d'un Luirographe (modèle alu)
Le capteur se trouve dans le petit trou supérieur protégé par une couche de graisse

Les 6 Luirographes qui ont servi dans cette étude sont numérotés de 1 à 6. Certains sont en alu (modèle récent sur la photo), d'autres sont en acier (plus lourds). Les plages de mesure, c'est-à-dire le gain au niveau du signal fourni par le capteur, ont été ajustées par le constructeur en fonction des remontées d'eau supposées.

B1, alu : 0-21,6 m
B2, alu : 0-20,7 m
B3, acier jaune : 0-8,6 m
B4, acier rouge : 0-9,4 m
B5, alu : 0-44,8 m
B6, acier jaune : 0-32 m

Ce dernier Luirographe acier était au Trou qui Souffle. Le 29 juillet 2003, le Luiro B5 étant parti au trou qui Souffle, c'est le B6 qui l'a remplacé. Ce Luiro a été placé au siphon de la galerie Ouest aux Cuves à la 6e campagne et entre le siphon 1 et le siphon 2 à la 7e campagne.

Correction de pression atmosphérique. Pour des variations de hauteur d'eau peu importantes, il faut tenir compte des variations de la pression atmosphérique. En effet, la presion mesurée est la somme de la pression atmosphérique et de la pression due à la hauteur d'eau. Pour remonter à la hauteur d'eau, il faut connaître la valeur de la pression

atmosphérique à chaque instant. À partir de la 2e campagne, ce rôle a été dévolu au B3, placé à la salle des Géants hors d'eau.

	Germe	Porche	Enfers	Saint-Bruno	S. des Géants	Salle à Mang.	P. Lavigne	Ouest :1er siphon	Ouest 2e siph .
1ère camp	B4	B3	B2	B5	-	B1	-	-	-
2e camp.	B4	-	B2	-	B3	B1	-	-	-
3e camp.	B4	-	B2	-	B3	B1	-	-	-
4e camp.	B4	-	B2	-	B3	B1	-	-	-
5e camp.	B4	-	-	-	-	-	-	B6	-
6e camp.	-	-	B2	-	B3	B4	B1	B6	-
7e camp.			B2		B3	B4	B1		B6

Les différentes campagnes et les Luirographes installés
En rouge, on a indiqué les mesures exploitables (au moins partiellement)
En noir, les mesures sont inexploitables

	Début	Fin des enregistrements
1ère campagne	22 décembre 2002	31 janvier 2003
2e campagne	2 mars 2003	1er mai 2003
3e campagne	11 mai 2003	9 juillet 2003
4e campagne	18 juillet 2003	20 septembre 2003
5e campagne	14 octobre 2003	7 décembre 2003
6e campagne	25 janvier 2004	24 mars 2004
7e campagne	28 avril (8 mai) 2004	26/09 (2/10) 2004

Les dates des différentes campagnes de mesure

On voit que du 22 décembre 2002 jusqu'au 2 octobre 2004, soit 650 jours, le nombre de jours de mesure a été de 432 jours soit 66 % du temps. Le plus gros arrêt est dû au retour chez le constructeur de tous les Luirographes avant la 6e campagne. Ces trous dans la continuité des mesures nous ont fait rater quelques crues intéressantes. Mais c'est surtout la sècheresse exceptionnelle de ces deux années 2003-2004 qui nous a retardé. Des campagnes entières n'ont rien apporté en terme de crues exploitables.

2- Les différents sites étudiés

À l'occasion des visites, différents niveaux d'eau ont été relevés. Il s'agit de la hauteur de l'eau derrière le barrage des Quatre Vents, de la hauteur d'eau aux Enfers et de l'échelle

(règle) à la salle à Manger. Si les visites ont coïncidé avec des campagnes de Luirographes, on peut corréler ces hauteurs avec celles des Luiros. Si de plus, ces visites ont été l'occasion de faire une mesure de débit, il est possible de relier ces hauteurs à des débits.

Malheureusement, les mesures de débits concernent plus souvent des étiages que de hautes eaux, et il n'y a pas de mesures lors des crues. Nous serons donc conduits à extrapoler (ce qui est dangereux en physique).

Les observations sont de plusieurs sortes, qualitatives pour certaines, quantitatives pour d'autres. Il s'agit des grandeurs ou des propriétés suivantes :

débit de sortie,
hauteur d'eau dans le Germe, hauteur d'eau au porche Carré,
écoulement ou non à la Herse,
écoulement ou non de la Douche derrière le barrage des Quatre Vents,
hauteur d'eau derrière le barrage des Quatre Vents,
écoulement ou non dans les Enfers, débit, hauteur d'eau au Luirographe de Enfers,
hauteur d'eau du sentier des Touristes aux Enfers,
hauteur d'eau sous la salle Saint Bruno,
échelle semi-métrique à la salle à Manger,
hauteur d'eau au Luirographe de la salle à Manger,
hauteur d'eau en bas du puits Lavigne,
hauteur d'eau au siphon de la galerie Ouest (Luiro),
hauteur d'eau entre les deux siphons de la galerie Ouest.

Nous allons les passer soigneusement en revue.

3- Le luirographe dans le Germe

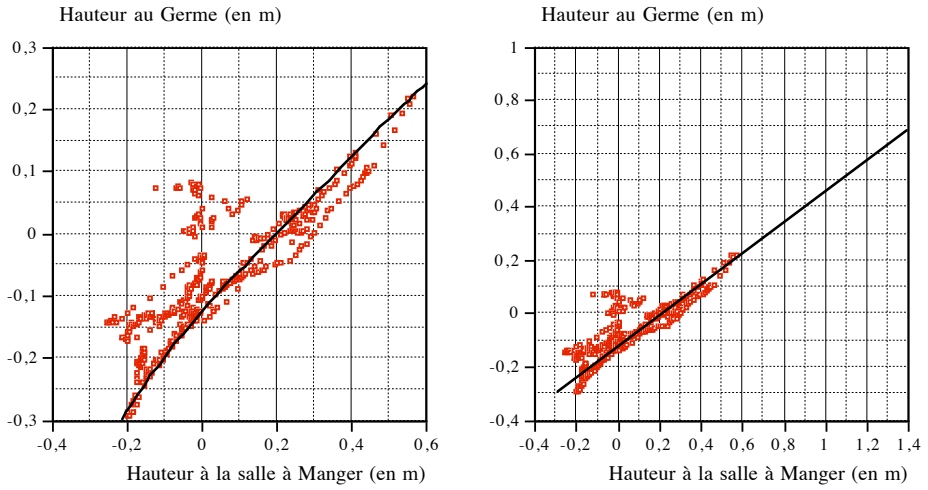


Fig. 1-2- Hauteur au Germe en fonction de la hauteur au Luirographe de la salle à Manger (1ère campagne)

L'appareil a été placé à peu près au même endroit que le limnigraphe de la DDAF (années 70). C'est-à-dire 12 m au-dessous de la bâtisse des guides et en rive droite du Germe. L'espoir était d'utiliser la courbe de tarage ancienne de la DDAF. Il a été installé pendant les cinq

premières campagnes. Il ne se trouvait dans l'eau qu'au moment des crues. Le reste du temps, il était hors d'eau. La largeur du lit donne à ce Luiro une faible sensibilité. Et par ailleurs, la présence d'un important batillage (fluctuations de la surface libre) rend les mesures très parasitées. C'est pour cette raison qu'il a été abandonné à la fin.

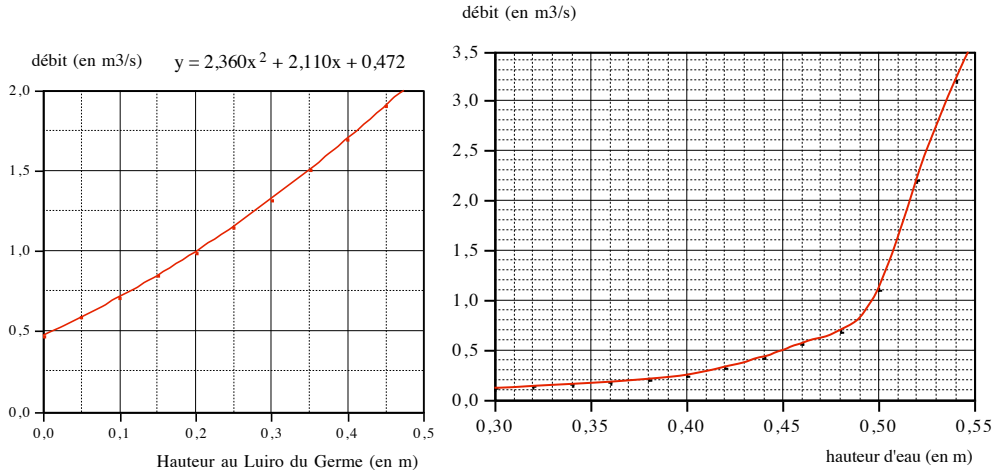


Fig. 1-3- Les deux courbe de tarage du Germe
À gauche, la courbe déduite de la 1ère campagne,
à droite, la courbe citée par Al Ambar dans sa thèse
(DDAF Isère Gautier-Durrafour)
(il faut rajouter 30 cm pour la caler sur le limnigraphe de la DDAF)

On remarque le peu de ressemblance de ces deux courbes de tarage. Cela provient de la faible précision de notre courbe de tarage, due en partie au fait que lors de la première campagne, on n'a pas réservé un Luirographe pour mesurer la pression atmosphérique, et surtout due à l'arrêt des mesures à cet endroit, ce qui n'a pas permis d'affiner la relation.

Il est bien clair aussi que la fonction qui traduit la courbe est plus compliquée qu'un polynome du 2e degré. Nous n'indiquons cette courbe que pour mémoire et ne nous en servirons pas pour la suite. Elle est déduite du tarage de la salle à Manger par le raisonnement suivant (cf. les observations au Luirographe de la salle à Manger plus loin) :

La courbe de la hauteur d'eau sur le Germe en fonction de la hauteur d'eau à la salle à Manger est assez voisine d'une droite. Il faut corriger ces données brutes en rajoutant, aux deux hauteurs, 0,2 m qui proviennent de dérives et des variations de la pression atmosphérique.

Par ailleurs, la hauteur du Luiro à la salle à Manger est $H_l = H_6 + 0{,}035$ m. D'où :

$$H_G = 0{,}582\ H_{ls}$$

La grandeur H_{ls} du Luiro de la salle à Manger est celle de la 6e campagne (H6).

La relation entre le Luirographe de la salle à Manger et l'échelle de la salle à Manger s'écrit :

$$H_{rs} = 0{,}603\ H_{ls} + 0{,}365$$

Avec H_{rs} la hauteur en mètre à la règle de la salle à Manger, et H_{ls} la hauteur en mètre au Luiro de la salle à Manger.

Et si on utilise la relation entre la hauteur à la règle et le débit (cf. plus loin), on déduit :

$$Q = 2{,}2\ H_{rs}^2 + 0{,}433\ H_{rs} + 0{,}0213$$

Dans cette relation, la hauteur est en mètre et le débit en mètres cubes par seconde. En remplaçant H_{rs} par H_{ls}, on obtient :

$$Q = 0{,}8\ H_{ls}^2 + 1{,}228\ H_{ls} + 0{,}472$$

D'où la relation du tarage du Germe (valable seulement pour les petits débits) :

$$Q = 2{,}36\ H_G^2 + 2{,}11\ H_G + 0{,}472$$

Le plus gros débit mesuré lors de la première campagne est voisin de 1,7 m^3 (correspondant à une hauteur de 0,2+0,2 m).

Pour les très grosses crues, on n'a que des témoignages oculaires. On sait (par Hervé Sérafin) que l'eau a affleuré la passerelle qui traverse le Germe peu après le bureau des guides le jour de la fameuse crue du 8 juillet 1996.

4- Le luirographe de la grotte Carré

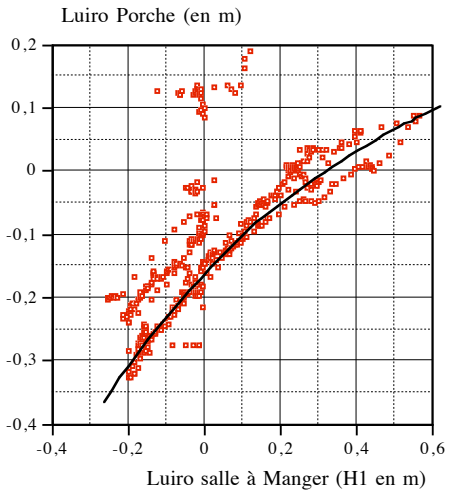


Fig. 1-4- Hauteur au porche Carré en fonction
de la hauteur du Luirographe de la salle à Manger (H1) (première campagne)

Il a été placé en rive gauche, à la sortie de la grotte Carrée (sortie de l'eau). Il n'a été laissé que pendant la 1ère campagne de mesure. Le choix de cet emplacement venait de l'installation éventuelle d'une règle limnimétrique à demeure. Mais un niveau placé au barrage des Quatre Vents offrira de meilleures possibilités de précision.

La courbe ressemble assez fort à celle que l'on trouve plus bas dans le lit du Germe. Il s'agit dans les deux cas d'écoulements à surface libre. On voit l'effet catastrophique des dérives lentes du Luirographe. Elles ont tendance à dédoubler les caractéristiques. Pour exploiter les Luiro, il faut donc se limiter à des séquences temporelles assez courtes (comme un épisode de crue par exemple).

5- La Herse et la porte inférieure

La Herse est le passage obturé par une grille horizontale au plafond de la salle des Pas Perdus entre les deux portes d'entrée du circuit touristique.

Observations :

Quand la Herse coule, c'est qu'il y a de l'eau aux Enfers et que le barrage des Quatre Vents déborde fort, puisque l'eau en vient pour partie. Le débit total du Germe dépasse alors 1,7 m^3/s (comme on le verra plus loin). La porte inférieure (correspondant à la sortie des touristes) coule aussi. Quand la Herse coule il y a trop d'eau pour passer aux Enfers.

Alimentation de la cascade. L'alimentation de la Herse ne se limite pas au débit de trop-plein du barrage. En très grande crue, les pertes dans les Enfers (via la galerie de la Fenêtre) et les écoulements venant par la galerie des Tombeaux (déversement de la salle des Rataplanades et pertes diverses) alimentent aussi cette sortie.

Les grandes crues. En grande crue, la perte des Enfers a un débit qui sature, comme le barrage et la sortie du captage. Ce sont les orifices supérieurs (porte inférieure, Herse, porte supérieure) qui assurent le passage de l'excédent de débit. Pour de très gros débits, comme ceux de la crue de 1996, le passage à un écoulement noyé dans la galerie des Tombeaux, et surtout le resserrement de la galerie au bas de l'escalier de descente aux Enfers, doivent conduire à une montée rapide des niveaux amonts (salle de l'Éboulis, salle Saint Bruno).

Le jour de la crue du 1er novembre 2003, la Herse coulait à environ 300-400 l/s, de même que la porte inférieure. Le passage au-dessus du barrage était presque saturé. Les Enfers étaient noyés sur environ 4 m de hauteur d'eau (soit un débit total de 2,4 m^3/s). La galerie Ouest coulait abondamment.

6- Le barrage des Quatre Vents

Le barrage des Quatre Vents est situé au bout de la galerie qui suit le premier coude de la visite touristique. Sa construction remonte à une date inconnue, mais son utilité est évidente puisqu'il empêche l'envahissement par l'eau de la galerie des touristes à la moindre crue.

On a posé (un peu arbitrairement) que l'eau affleure le rebord du barrage pour une hauteur de 100 cm. L'origine des hauteurs est donc un mètre sous le déversoir du barrage, légèrement au-dessus du lit du torrent. On appelle H cette hauteur d'eau.

Observations :

La douche ni le boyau du fond de la salle des Trois Cascades ne coulent pour un débit du Germe de 70 l/s (27/07/04). La règle de la Salle à Manger étant à 8 cm.

La douche du barrage des Quatre Vents est sèche pour une hauteur à l'échelle de la salle à Manger de 11 cm. Quand la douche du barrage des Quatre Vents est sèche, il n'y a pas d'eau aux Enfers. Le débit total est inférieur à 100 l/s. Mais la douche de la cascade terminale reste importante (débit constant = 40 l/s ?) (29/06/03).

Pour H = 25 cm (75 cm sous le déversoir), il n'y a pas du tout d'eau aux Enfers.

La mise en charge en amont des Enfers (premiers griffons) se produit pour des débits de l'ordre de 0,3 m^3/s.

Pour H = 30 cm, il n'y a qu'une dizaine de litres par seconde aux Enfers, le salle à Manger est à 34,5 cm. Le débit total est d'environ 0,4 m^3/s.

Pour H = 42 cm, c'est limite aux Enfers pour les touristes (1 ou 2 cm d'eau sur le sentier). Le débit est alors au moins de 0,5 m^3/s.

Pour H = 47 cm, le sentier des touristes est sous 2 cm d'eau. La salle à Manger est à 48,5 cm (18/04/04).

Pour H = 49 cm, le Luiro des Enfers est sous 5 cm d'eau, le sentier des touristes est sous 3 cm d'eau. La salle à Manger est à 50 cm.

Pour H = 48 cm, le Luiro des Enfers est sous 5 cm d'eau, le sentier des touristes est sous 4 cm d'eau. La salle à Manger est à 50 cm (18/04/04).

Pour H = 80 cm, la galerie Ouest déborde légèrement. La salle à Manger est alors à 67 cm. Le débit est d'environ 1,2 m^3/s. Le 2e escalier des Enfers commence à couler.

Pour H = 87 cm, la salle à Manger est alors à 68 cm. L'eau affleure le bas de l'escalier des Enfers. Il y a 30 cm d'eau au-dessus du Luiro des Enfers. Le 2e escalier des Enfers coule à 10 l/s (24/04/04). Le débit d'après la courbe devrait être de 1,25 m^3/s.

Pour H = 100 cm, le barrage des Quatre Vents commence à déborder, l'eau coule à la sortie touristique des Cuves. Le débit total est alors d'environ 1,7 m^3/s. D'après la courbe des débits, la règle à la salle à Manger devrait être à 77 cm, ce qui est vérifié sur la courbe du Luirographe de la salle à Manger qui était, quant à lui, à 33 cm (20 août 2004).

Courbe de tarage

On l'a construite à partir des observations et des corrélations entre la hauteur au barrage et celle à la règle de la salle à Manger. Comme pour le Germe, c'est la règle de la salle à Manger qui nous sert de référence pour les débits. La construction de la courbe résulte de deux graphiques représentés plus loin (cf. Salle à Manger).

La relation entre le débit du Germe et la hauteur d'eau au barrage des Quatre Vents est quasi linéaire. Une règle posée à cet endroit pourrait être graduée en cm et en l/s. On se souvient que le débit du Germe est plus grand que le débit qui passe au barrage puisque la douche de la cascade Terminale située plus en aval, doit débiter une centaine de l/s.

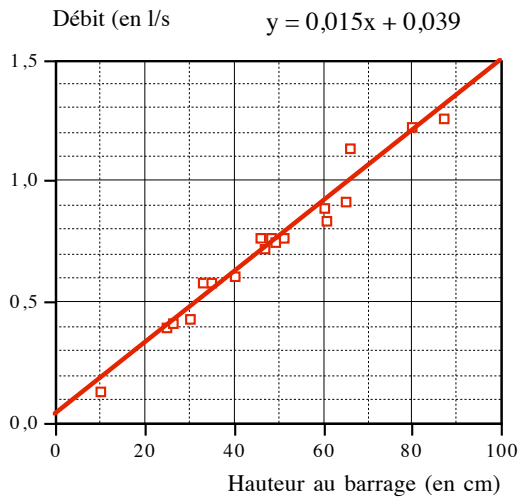


Fig. 1-5- Courbe de tarage du barrage
Relation entre le débit du Germe et la hauteur au barrage des Quatre Vents
(la hauteur H = 100 cm correspond au débordement du barrage)

Estimation des crues : on peut essayer d'estimer le débit de trop-plein du barrage quand il déborde. La hauteur entre la crête du barrage et la voûte est de 25 cm en moyenne. La largeur est d'environ 1,8 m. La surface de passage vaut 0,5 m^2. La vitesse de débordement est la vitesse critique soit :

$$V_c = \sqrt{g\,h} = \sqrt{2{,}5} = 1{,}5 \text{ m/s}$$

Le débit de déversement s'en déduit. Il vaut $Q = 0{,}8\ V_c\ S = 0{,}6\ m^3/s$. Le débit par le passage ordinaire augmente lui-aussi mais dans de petites proportions. On peut estimer que les vitesses ne changent pas, et que seule la section augmente. Ce qui fournit le nouveau débit de fuite : (1,5-0,2) x125/100 = 1,6 m^3/s. On en déduit que lorsque le barrage déborde jusqu'au plafond, mais sans mise en charge supplémentaire, le débit total du Germe est 1,6+0,6 = 2,2 m^3/s. Bien sûr, une mise en charge plus haut que la voûte au-dessus du barrage permet à un débit plus important de passer. Mais la perte des Enfers a un débit limité à celui qui correspond au débordement de la salle des Rataplanades (3,6 m^3/s environ).

Lors de notre visite pendant la crue du 1er novembre 2003, le débit total devait avoisiner 2,1 m^3/s vue la hauteur aux Enfers (2,4 m environ). Et le barrage devait déverser 0,5 m^3/s environ.

7- Les Enfers

La galerie des Enfers est située sur le trajet des touristes. C'est l'endroit critique de la visite car l'eau peut monter et même ennoyer la galerie. La galerie, assez longue, est divisée en trois tronçons par deux escaliers. Les observations qui suivent se font à débit croissant.

Observations :

Les Enfers sont complètement secs quand l'échelle à la salle à Manger ne dépasse pas 30 cm (29/03/04).

Débit de 2-3 l/s d'eau dans les Enfers quand l'échelle à la salle à Manger est de 31 cm (25/01/04).
Il y a 10 cm d'eau dans le lit des Enfers pour 35 cm à la salle à Manger (12/03/03 et 9/11/03).
Débit de 20 l/s quand l'échelle à la salle à Manger est de 35 cm (9/11/03).
Débit de 30 l/s quand l'échelle à la salle à Manger est 37 cm (24/03/04).
Il y a 15 cm d'eau dans le ruisseau pour 44 cm à la salle à Manger (2/03/03).
Le sentier des touristes est sec quand l'échelle à la salle à Manger ne dépasse pas 45 cm (le débit du Germe est alors de 650 l/s).
Le sentier des touristes est déjà mouillé quand l'eau commence à monter dans le siphon 1 de la galerie Ouest. L'échelle de la salle à Manger est alors presque à 50 cm.
Il y a 1 cm d'eau sur le sentier pour une hauteur de 50 cm à la salle à Manger (11/08/04).
Il y a 2 ou 3 cm d'eau sur le sentier pour 51 cm à la salle à Manger (12/3/3).
Il y a 4 cm d'eau sur le sentier, le Luiro sous 6-7 cm, la salle à Manger 50 cm (4/04/04).
Il y a 4 cm d'eau sur le sentier, le Luiro sous 5 cm d'eau, la salle à Manger 50 cm+.
Il y a 4 cm d'eau sur le sentier, le Luiro sous 10 cm d'eau, la salle à Manger 50 cm.(9/05/04).
Il y a 5 cm d'eau sur le sentier pour un débit total estimé à 950 l/s (27/04/03).
Il y a 6 cm d'eau sur le sentier des touristes pour 54 cm à la salle à Manger (11/08/04).
Il y a 12 cm d'eau sur le sentier des touristes pour une hauteur au barrage de 42 cm sous le déversoir (6/04/04).
Le débit aux Enfers est 460 l/s pour une hauteur de 55 cm à la salle à Manger (1er mai 2003).
Le 2e escalier coule 10 l/s pour une hauteur au barrage de 13 cm sous le déversoir et 68 cm à la salle à Manger.

Débit inférieur. On peut déterminer le débit de fuite par les conduits impénétrables qui passent sous les Enfers, et cela de deux façons différentes.
D'une part, grâce à l'indication de la hauteur à la salle à Manger qui fournit pour H = 35 cm un débit de 430 l/s.
Et d'autre part, grâce à la mesure du 1er mai 2003 qui nous indique un débit de trop-plein de 460 l/s pour une hauteur de 55 cm à la salle à Manger, soit un débit total de 900 l/s. Le débit des conduits inférieurs s'en déduit par différence, soit 440 l/s. Les deux estimations sont cohérentes. Ce débit de fuite augmente légèrement quand le débit général augmente, mais peu (tant que la mise en charge à la salle du Styx ne change pas).

Pour les crues, on se fiera aux indications du Luirographe des Enfers.

8- Le Luirographe des Enfers

Le Luirographe a été installé dans le lit du canal qui borde le sentier touristique à environ 5 m en amont de la perte des Enfers, en rive gauche et à une vingtaine de centimètres au-dessus du lit du canal.
On appelle H la hauteur d'eau comptée 0 au niveau du Luirographe. Si H est négatif, le Luiro est hors d'eau. Si H est positif, le Luiro est sous l'eau.

Observations :

H = -15 cm, 5 à 10l/s d'eau, barrage 26 cm, salle à Manger (règle) 33 cm (22/05/04).
H = - 10 cm (débit 10 l/s), le barrage est à 30 cm et la salle à Manger est à 34,5 cm (15/04/04).

H = 0 cm, les touristes ne se mouillent pas, mais c'est limite (0 à 2 cm). À la salle à Manger 43 cm (04/04/04, 05/05/04). Le débit aux Enfers est alors assez important (200 l/s ?). Le débit total doit avoisiner 0,7-0,8 m^3/s.
H = 5 cm, il y a 4 cm d'eau sur le sentier des touristes et 50 cm à la salle à Manger (4/4/4).
H = 5 cm, il y a 4 cm d'eau sur le sentier des touristes et 50 cm à la salle à Manger (18/4/4).
H = 5 cm, il y a 3 cm d'eau sur le sentier des touristes et 50 cm à la salle à Manger (28/4/4).
H = 6-7 cm : 50 cm à la salle à Manger (4/04/04).
H = 10 cm : 50 cm à la salle à Manger (9/05/04).
H = 30 cm, la galerie Ouest commence à déborder. La salle à Manger est à 68 cm et il y a 10 l/s au 2e escalier.
H = 55 cm, le barrage des Quatre Vents va déborder.
H = 70 cm, l'eau affleure le sentier des touristes au niveau du Luirographe (impraticable plus en amont pour les touristes et difficile même pour les spéléos).
H = 240 cm, l'eau amorce le siphon de la perte vers le canal des Enfers et le bas de l'escalier est inaccessible (1 /11/03)
H = 280 cm. Le goujon planté au bas de la descente aux Enfers est atteint par l'eau.
H = 560 cm. Au maximum de la crue du 20 août 2004, l'eau est arrivée 30 cm sous la salle des Rataplanades. Le débit estimé total au moment de la crue était de 2,6 m^3/s.

Les relations entre le Luirographe des Enfers et celui de la salle à Manger

On a représenté sur les courbes suivantes la relation entre les deux Luirographes à l'issue de la première campagne de mesures. Il n'y a pas eu de crue importante, mais déjà on voit nettement l'existence de deux régimes. Le changement de régime est dû au passage d'un écoulement à surface libre, au niveau de la perte des Enfers, à un écoulement noyé.

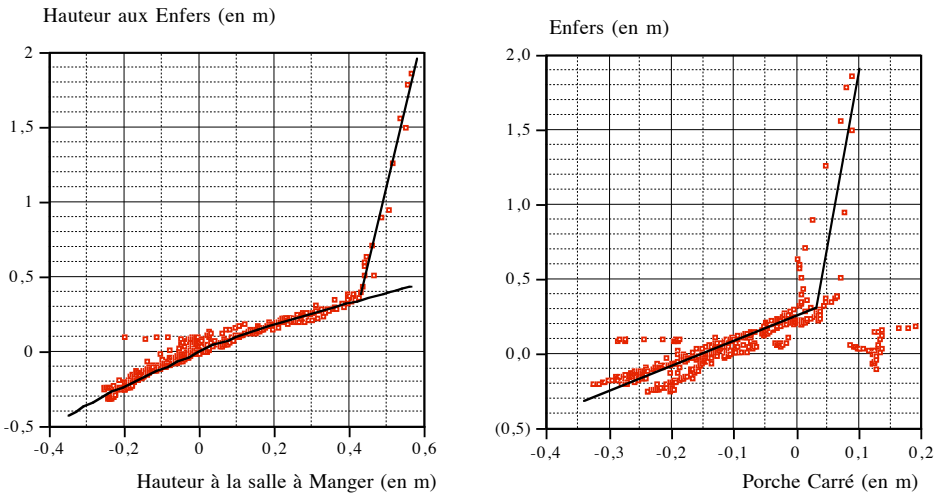


Fig. 1-6- Le Luiro des Enfers en fonction de la hauteur à la salle à Manger (première campagne)
Et à droite en fonction de la hauteur au porche Carré

Depuis l'agrandissement de la perte des Enfers, le point à l'intersection des deux courbes, c'est-à-dire l'ennoiement de la perte, s'est décalé vers la droite. Les nuages excentrés proviennent du glissement lent des indications des luirographes lors de cette première campagne de mesure.

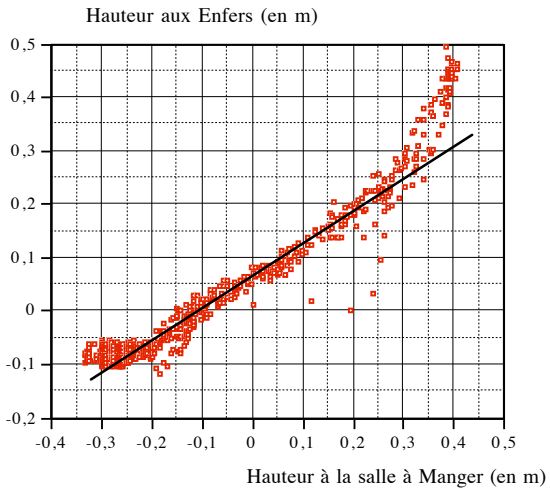


Fig. 1-7- Hauteur aux Enfers en fonction de la hauteur à la salle à Manger (crue du 11 août 2004)

Pour les débits moyens, la relation entre la hauteur au Luiro de la salle à Manger et celle au Luiro des Enfers est à peu près linéaire comme on peut le voir sur la figure ci-dessus. La droite tracée traduit cette relation quand l'écoulement reste à surface libre (pas d'ennoiement).

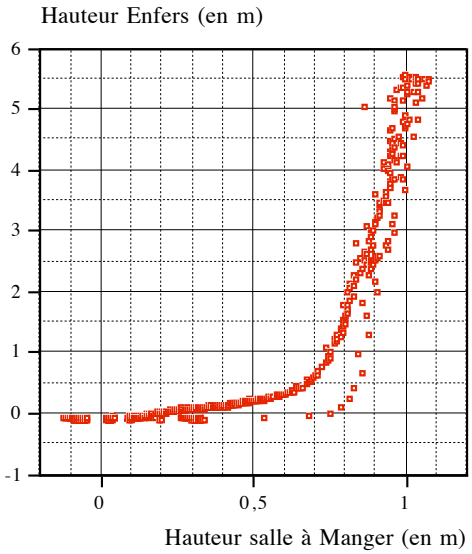


Fig. 1-8- Hauteur au Luiro des Enfers en fonction de la hauteur au Luiro de la salle à Manger (crue du 20 août 2004)

Les deux courbes au-dessus ont été construites à l'issue de la 7e campagne. La crue du 20 août, d'amplitude moyenne, a permis de mesurer une belle montée d'eau dans les Enfers. La partie inférieure de la courbe correspond à la montée de la crue. La partie supérieure de la courbe correspond à la décrue. Cette dernière possède beaucoup plus de points car la descente dure plus longtemps que la montée (les points sont espacés de trois minutes).

Rôle des dynamitages sur l'ennoiement de la perte des Enfers. En comparant les courbes (1ère campagne et 7e campagne), on constate que le point de changement de régime de l'écoulement à la perte des Enfers est passé, au niveau de la salle à Manger, d'une hauteur :

Hsam = 0,64 m , à une nouvelle hauteur

H'sam = 0,76 m.

L'ennoiement a été repoussé vers des débits plus grands : de 1,2 à 1,6 m^3/s, ce qui était bien le but recherché.

Les différents débits. Ce débit d'ennoiement de 1,6 à 1,7 m^3/s est le débit total du Germe et pas le débit des Enfers qui peut être estimé quant à lui à 1,1-1,2 m^3/s. C'est à peu près le même débit qui fait déborder le barrage des Quatre Vents (observation du 20/08/04).

Courbe de tarage du Luirographe des Enfers. Connaissant la courbe de tarage à la salle à Manger, on peut en déduire (en supposant que la descente de la crue du 20 août n'a pas été trop rapide) la courbe de tarage pour les Enfers.

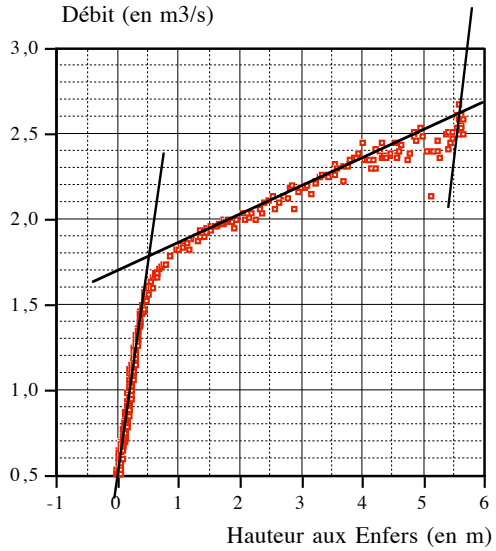


Fig. 1-9- Courbe de tarage du Luirographe des Enfers (20 août 2004)
Cette courbe correspond à la décrue (fonctionnement quasi-permanent)

La courbe de tarage du Luirographe des Enfers, fournit la relation entre le débit du Germe (en régime permanent) et la hauteur d'eau aux Enfers. Le débit n'est pas le débit aux Enfers qui est plus petit, c'est le débit total. Pour obtenir le débit des Enfers, il faut retrancher environ 0,5 m^3/s au débit total. On retrouve les deux lois de comportement de la perte des Enfers, suivant qu'elle est à écoulement libre ou noyé. Pour les grands débits, on aperçoit même le début d'un nouveau changement de régime. Il correspond aux fuites qui se produisent dans les Enfers et dans l'escalier de la descente aux Enfers. Fuites qui alimentent d'une part les arrivées d'eau sous l'escalier en fer qui conduit à la salle des Rataplanades, et d'autre part, la galerie de la Fenêtre qui passe sous le caillebotis à 10 m de l'entrée des touristes.

Débit au déversement de la salle des Rataplanades. Lors des grandes crues, la salle des Rataplanades doit déborder pour une hauteur au Luirographe des Enfers de l'ordre de 6,5 m. Le débit n'a pas pu être mesuré puisqu'aucun déversement n'a eu lieu pendant les campagnes de mesure. Le débit dans la galerie de la Fenêtre doit pouvoir atteindre un mètre cube par seconde en très grande crue, de sorte que le débit qui provoque le déversement de la salle des

Rataplanades doit dépasser 3,6 m^3/s. On voit cet effet des pertes apparaître tout en haut de la courbe de tarage. Le débit augmente alors sans que la hauteur aux Luiro des Enfers ne varie beaucoup.

Pour des crues plus fortes, la salle des Rataplanades déverse et le torrent dévale par la galerie des Tombeaux et la première entrée. L'ennoiement de cette partie doit se produire pour des crues dépassant 7 ou 8 m^3/s. La galerie au bas de l'escalier de descente aux Enfers présente le plus grand resserrement de tout le parcours de l'eau en crue (1 m^2). La perte de charge associée conduit à une mise en charge amont qui doit ennoyer toute la galerie des Enfers jusqu'à la trémie sous la salle de l'Éboulis.

Régime non permanent à la montée de la crue. Les courbes de montée de l'eau à la salle à Manger et aux Enfers ne sont pas synchrones à cause du temps d'arrivée de la crue et de la mobilisation d'un certain volume d'eau. La montée correspond à la courbe à droite. La descente à la courbe à gauche. C'est cette dernière qu'il faut prendre en compte pour la corrélation en régime permanent.

Détermination du volume d'eau mobilisé pendant la crue. La courbe représentant la montée de la crue est décalée par rapport au régime permanent (voisine de la courbe de descente plus lente) car le débit à la salle à Manger est plus grand que le débit aux Enfers pendant la montée de crue. La différence des débits est reliée à la différence de hauteur (via les courbes de tarage). On peut donc utiliser cette différence pour estimer les volumes d'eau mobilisés en fonction de la hauteur de mise en charge. Cette estimation servira pour le modèle hydraulique.

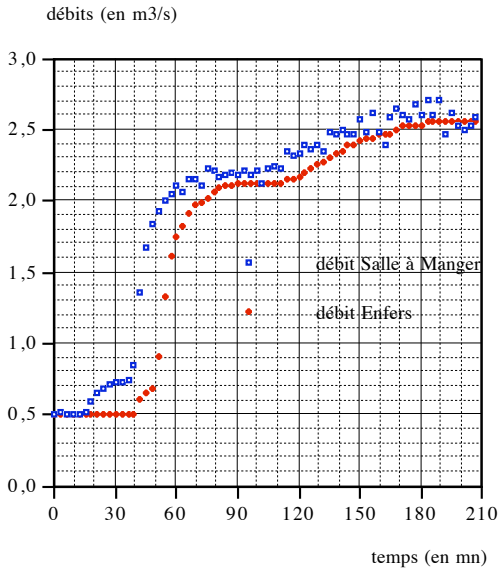


Fig. 1-10- Les débits au moment de la crue du 20 août 2004

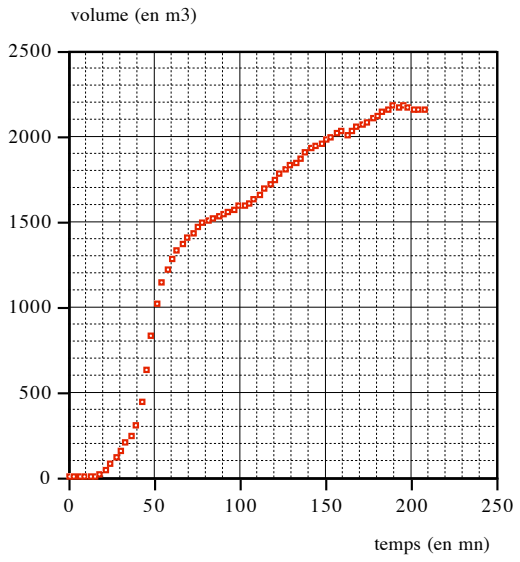


Fig. 1-11- Le volume d'eau stocké entre la salle à Manger et les Enfers
Lors de la crue du 20 août 2004

On déduit de la courbe que le volume stocké atteint 2200 m^3 pour un débit maximum de 2,5 m^3/s. Pour un débit maximum plus faible, le volume sera bien sûr plus faible. On remarque que c'est au passage de la vague de crue (points espacés) que l'accroissement du volume a été le plus important. On voit par là que l'effet dévastateur de la vague de crue générée par le déversement au sommet de la galerie Ouest est atténué vers l'aval grâce aux remplissages de réservoirs successifs.

On revient maintenant sur l'hypothèse que le débit de descente est celui d'un régime quasi-permanent. On connaît le volume et on connaît la durée. Le volume est restitué à la décrue. On en déduit que le débit à l'aval est trop grand en moyenne de $\Delta Q = V/\Delta t = 2200/100\,000 = 0{,}022\ m^3/s$ soit 22 l/s, à comparer au débit moyen pendant cette descente de 900 l/s. On voit que c'est négligeable (2%). L'hypothèse que la décrue correspond à un régime quasi permanent est donc valable. On verrait de la même façon que la décrue du 11 août ne possède pas cette propriété.

9- Le Luirographe sous la salle Saint Bruno

Il a été placé au niveau de l'eau qui coule en bassins profonds dans la fissure en face et à gauche de la galerie du Bénitier. L'appareil n'est resté que pendant la première campagne, mais des observations ultérieures sont venues compléter les données.
Le Luiro avait été placé environ 2,05 m plus bas que le bloc coincé au-dessus du siphon en aval de la galerie. On note H la hauteur au Luirographe.

Observations :

H = -145 cm. Grand étiage (SAM à 9 cm) l'eau est 3,5 m sous le bloc coincé (29/06/03).
H = 39 cm. Le niveau de l'eau est 1,66 m sous le bloc, à la salle à Manger 43 cm (5/05/04).
H = 70 cm. Le niveau est 1,35 m sous le bloc coincé. À la salle à Manger, l'échelle est à 50 cm. Pour un débit de 650 l/s (4/04/04).

H = 75 cm. Le niveau est 1,30 m sous le bloc. À la salle à Manger : 49 cm (28/04/04).
H = 137 cm. Le niveau de l'eau est 68 cm sous le bloc. À la salle à Manger : 68 cm.

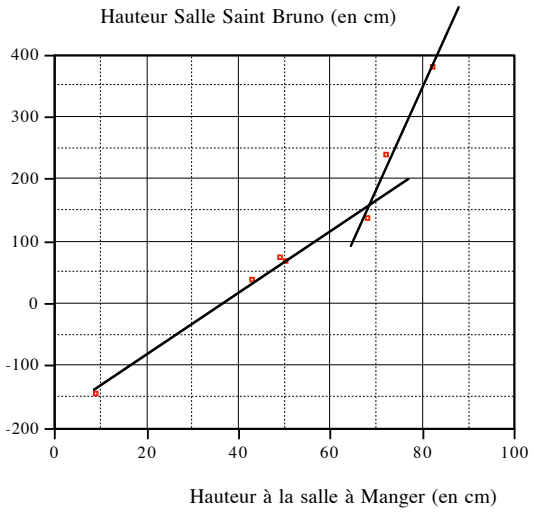


Fig. 1-12- Relation entre hauteur à la salle Saint Bruno
et hauteur à la règle de la salle à Manger

La courbe déduite des observations se décrit assez bien à l'aide de deux segments de droites. Là aussi, le changement de pente traduit l'ennoiement des conduits à l'aval.

D'après les Luirographes (première campagne de mesure)
Salle Saint-Bruno H = 240 cm, Salle à Manger H6 = 57 cm. Soit à l'échelle environ 72 cm, c'est-à-dire 1,35 m^3/s de débit.
Salle Saint-Bruno H = 380 cm, Salle à Manger H6 = 74 cm. Soit à l'échelle SAM environ 82 cm, soit 1,7 m^3/s environ.

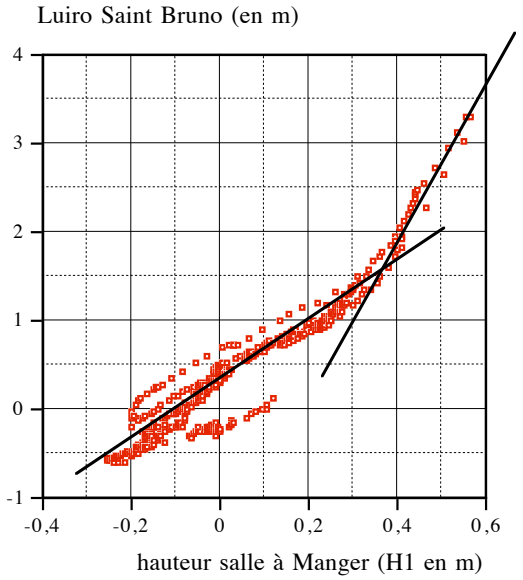


Fig. 1-13- La hauteur Salle Saint Bruno en fonction du Luiro salle à Manger (H1)
(première campagne)

La courbe (du moins la courbe principale) présente deux pentes. Le changement de pente correspond à un ennoiement. La hauteur de changement de régime est 0,68 m à la règle de la salle à Manger (fig. 12). Elle correspond à environ1,2 m^3/s. C'est plus que le débit de mise en charge de la cascade Édouard sous la salle du Styx (500 l/s). La galerie qui s'ennoie doit se trouver sous les salles Saint Bruno et de l'Éboulis.

Le jour de la crue du 20 août 2004, la hauteur d'eau au-dessus du niveau d'étiage devait atteindre (d'après la mousse de crue au niveau du balcon du Bénitier) environ 9,25 m soit H = 780 cm. Le débit était alors d'environ 2,7 m^3/s. À la salle à Manger, la règle devait être à 103 cm. Si on adopte une relation linéaire entre la salle Saint Bruno et la règle de la salle à Manger :

$$H_{SB} = 16{,}9\ H_{RSAM} - 9{,}94 \quad \text{avec H en m}$$

Alors, la relation de tarage pour les crues comprises entre 1,3 m^3/s et jusqu'à 3 m^3/s s'écrit :

$$Q = 7{,}03.10^{-3}\ H_{SB}^2 + 0{,}179\ H_{SB} + 1{,}037 \quad \text{avec } H_{SB} \text{ en m}$$

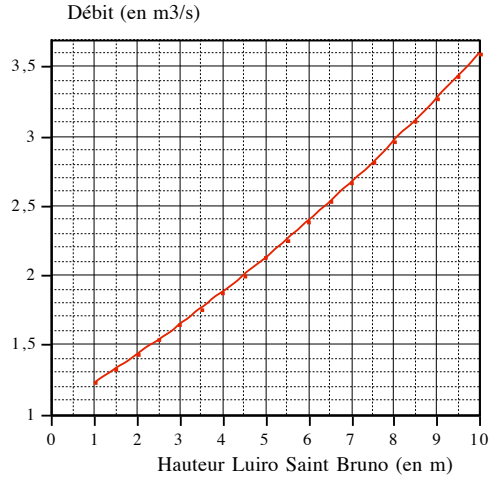


Fig. 1-14- Courbe de tarage du Luiro de la salle Saint Bruno
Valable seulement pour les débits compris entre 1,3 et 3 m^3/s

10- L'échelle à la salle à Manger et le Luiro

Cette échelle est une règle en inox spitée sur la paroi verticale d'un bloc en face de l'arrivée de l'eau du siphon de la salle à Manger. Elle est pratique, mais elle est un peu courte (50 cm) de sorte que les grandes valeurs doivent être estimées, ce qui nuit à la précision. Elle constitue avec le barrage des Quatre Vents le moyen de connaître l'état du réseau. Il faudra la compléter par une deuxième échelle permettant de mesurer jusqu'à 1 mètre de montée de l'eau.

Les principales mesures de débits :
Débit total 70 l/s pour 8 cm à la règle de la salle à Manger (27/07/04).
Débit total 87 l/s pour 8,3 cm à la règle de la salle à Manger (9/07/03).
Débit total 223 l/s pour 20 cm à la règle de la salle à Manger (14/05/03).
Débit total 300 l/s pour 25 cm à la règle de la salle à Manger (15/02/04).

Débit total 429 l/s pour 35 cm à la règle de la salle à Manger (9/03/03).
Débit total 652 l/s pour 50 cm à la règle de la salle à Manger (4/04/04).
Débit total 878 l/s pour 51 cm à la règle de la salle à Manger (21/04/03).
Débit aux Enfers (seulement) de 463 l/s pour une hauteur à la règle de 55 cm (1/05/03).

Courbe de tarage de l'échelle de la salle à Manger

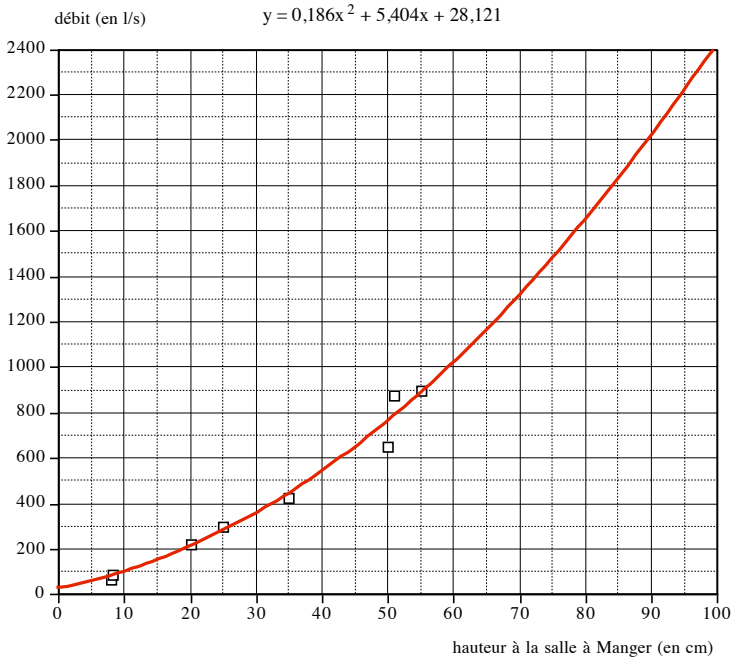


Fig. 1-15- Relation entre le débit total et la hauteur à la règle de la salle à Manger

Nous fournissons ci-dessus l'état actuel de la courbe de tarage de cette échelle résultant des mesures de débits. La valeur maximale notée est celle du 4 décembre 2003 où elle valait 64 cm. Le barrage a été noté quant à lui à H = 66 cm.

L'extrapolation pour les hauteurs plus grandes que 60 cm est hasardeuse.

Si on suppose que la largeur de la lame d'eau qui s'écoule de la salle à Manger reste constante, il serait naturel d'essayer une loi en puissance 3/2 (valable pour des déversoirs). Dans le cadre de cette hypothèse, la relation $Q = 2{,}05\ (H + 2{,}5)^{3/2}$ convient assez bien. Mais l'examen de la configuration des lieux montre qu'à partir d'une certaine hauteur, l'eau passe par dessus les blocs, ce qui permet à un débit supplémentaire de passer sans augmentation de la hauteur. La courbe monte donc plus rapidement que le loi en puissance 3/2. Si nous adoptons alors dans cette zone une loi quadratique, on obtient une autre courbe.

Tarage direct de la règle de la salle à Manger. Le 5 décembre 2004, un examen de la salle à Manger nous a montré que l'eau qui part vers le Canyon subit une nette dénivellation à partir du chaos de blocs qui forme barrage. Nous sommes partis de l'hypothèse que l'eau de crue se déversait par dessus le barrage d'une manière classique en hydraulique. La hauteur de la lame d'eau (hauteur critique) est les 2/3 de la dénivellation totale (hauteur à la règle moins hauteur de la roche). La vitesse est donnée par la vitesse critique qui ne dépend que de la hauteur d'eau. Nous avons tendu une ficelle parfaitement horizontale et avons relevé soigneusement

le profil du déversoir. Ensuite, à l'aide d'un tableur, nous avons calculé pour une hauteur donnée à la règle et en chaque tronçon de 10 cm de largeur, la dénivellation, la hauteur de la lame d'eau, la vitesse critique correspondante et le débit. Nous avons fait la somme et le résultat a été calculé pour différentes hauteurs de la règle. La figure ci-dessous représente le résultat (avec la courbe parabolique pour comparaison). Nous avons eu l'heureuse surprise de constater que dans la partie connue de la courbe de tarage, la nouvelle courbe se superposait bien à l'ancienne. Nous en avons déduit qu'on pouvait l'utiliser sans correction aucune, pour les grands débits.

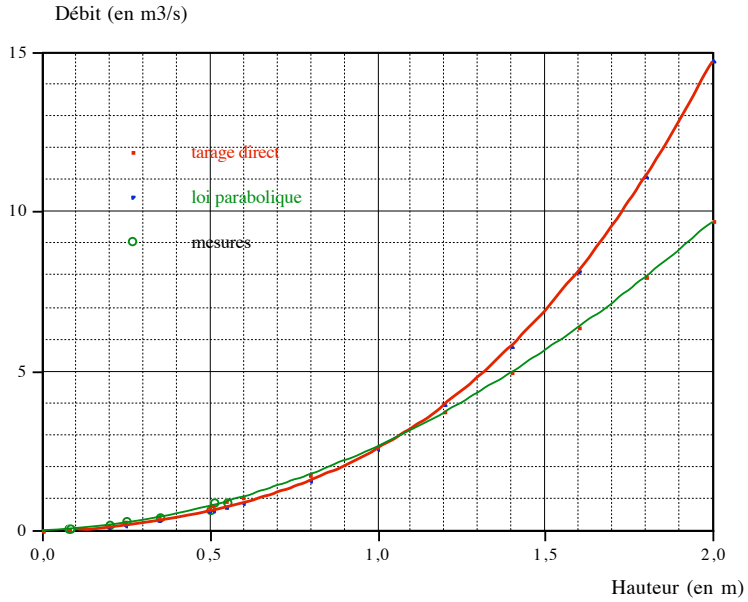


Fig. 1-16- Courbe de tarage directe de la règle de la SAM
et courbe parabolique

Pour les petits débits, de 0 à 3 m^3/s, nous adopterons la courbe parabolique. Dans la relation, Hrs est donnée en mètres et le débit Q est donné en m^3/s.

$$Q = 2{,}2\ H_{rs}^2 + 0{,}433\ H_{rs} + 0{,}0213$$

Pour 67 cm, elle donne Q = 1,25 m^3/s (24/04/04).

Pour les grands débits, supérieurs à 3 m^3/s , nous adopterons la courbe de tarage direct. En cherchant une courbe analytique passant au mieux par les points, on obtient une relation entre le débit et la hauteur d'eau à la règle de la salle à Manger. La relation peut s'écrire :

$$Q = 1{,}547\ H_{rs}^3 + 0{,}085\ H_{rs}^2 + 1{,}043\ H_{rs} - 0{,}105$$

Le jour de la crue du 11 août 2004, le niveau à la salle à Manger (d'après la mousse de crue) a dû atteindre 80 cm. Cela représente un débit d'environ 1,8 m^3/s. Le barrage des Quatre Vents devait donc déborder (ce qu'a signalé le guide le matin de la crue). Le Luiro des Enfers indiquait 58 cm, ce qui correspond environ à 1,7 m^3/s.

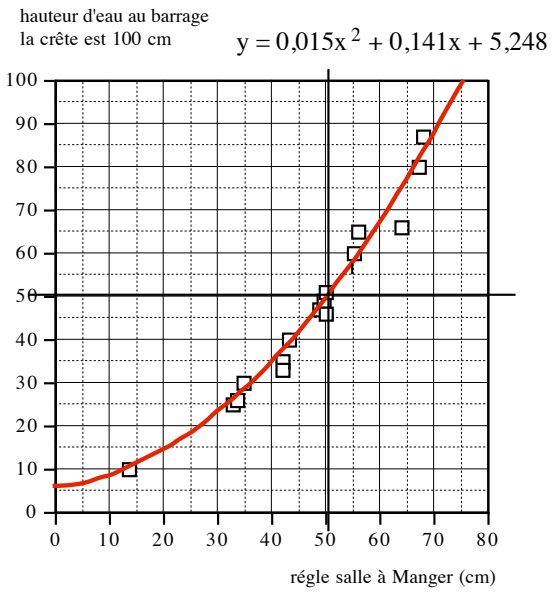


Fig. 1-17- Corrélation entre le barrage des 4 Vents et l'échelle de la salle à Manger
(à jour le 16/6/4, certains points sont estimés)

Le débordement du barrage des Quatre Vents a lieu quand la règle est à 75 cm, soit un débit de 1,5 m^3/s.

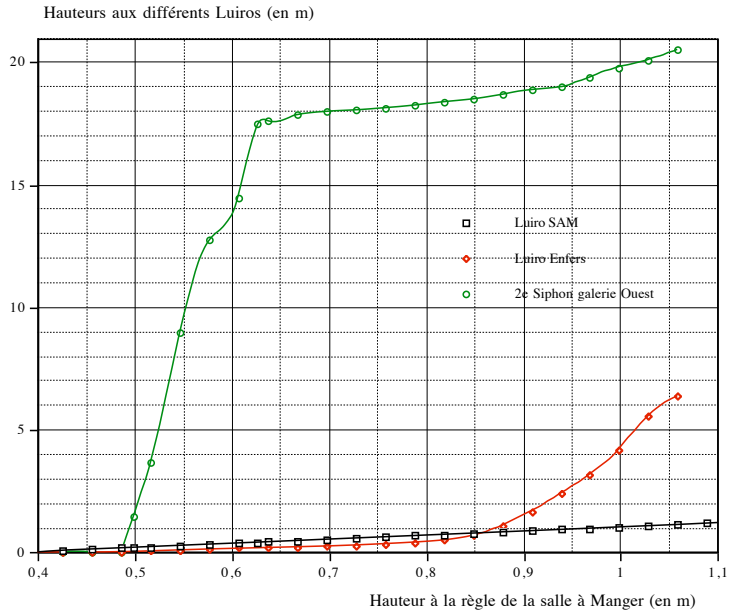


Fig. 1-18- Les hauteurs aux différents Luirographes
en fonction de la règle de la salle à Manger
(On a retenu uniquement les décrues pour minimiser les effets de stockage)

Sur la courbe ci-dessus, on a représenté les différentes hauteurs d'eau en fonction de la hauteur à la règle de la salle à Manger. On est frappé devant la disparité des relations. Le rétrécissement du conduit qui draine le 2e siphon de la galerie Ouest paraît d'une exiguïté extraordinaire. On calcule le diamètre équivalent (en terme de perte de charge). Il vaut 8 cm !

L'installation d'un Luirographe à la salle à Manger mesurant le niveau du lac précédant le déversoir naturel a permis de préciser plus correctement les débits grâce à la courbe de tarage direct. Une règle en inox a été installée sur la règle d'aluminium qui supporte le Luirographe. La correspondance des échelles entre l'échelle ancienne H et la nouvelle règle H_L est la suivante :

$$H = 117,8 - H_L \text{ (en cm)}$$

11- Le Luirographe du siphon Bonnevalle

Il a été installé à la sortie du siphon de la salle à Manger. Il est resté pendant 6 campagnes, mais les résultats de la 4e campagne ne sont pas exploitables car il a pris l'eau. Il reste donc les mesures des campagnes 1 à 3 et des campagnes 6 et 7.

1ère campagne : Luiro alu B1
2e campagne : Luiro B1, descendu de 16,5 cm plus bas qu'à la première campagne.
3e campagne : idem 2e, mais sec le Luiro était 30 cm au-dessus de l'eau le 9 juillet 2003.
6e campagne : Luiro B4 en acier, remonté de 20 cm par rapport aux 2e et 3e campagnes.
7e campagne : Luiro B4, idem 6e campagne.

D'où les relations entre les différentes campagnes :

$$H1 = H2 - 16,5 = H3 - 16,5 = H6 + 3,5 = H7 + 3,5 \text{ cm}$$

Il est intéressant de corréler les hauteurs au Luirographe et celle à l'échelle qui n'est qu'à 20 mètres de distance environ. On prendra comme référence des hauteurs H6 ou H7 (6e ou 7e campagne).

Fig. 1-19- Le Luirographe placé au siphon de la salle à Manger

Observations (les hauteurs sont estimées)

Le 1er mai 2003, le Luiro était sous environ 40 cm d'eau (mais le Luiro était déjà à l'arrêt). L'échelle de la salle à Manger était à environ 55 cm. Le débit aux Enfers (mesuré avec du sel) était 463 l/s. Soit un débit total de l'ordre de 0,9 m^3/s. Le niveau dans le siphon sous la salle Saint Bruno était 1,2 m seulement sous la margelle.

H6 = -50 cm (H2 = -30 cm), règle à 7,9 cm et de 8,3 cm (9/07/03 et 21/09/03).
H6 = -30 cm (H2 = -10 cm), règle à 16,7 cm (18/05/03).
H6 = -4 cm, règle à 42 cm (7/02/04).
H6 = 14 cm, règle à 50 cm (6e campagne), 18 cm au-dessous du sommet de la dalle inclinée, débit de 650 l/s (4/04/04).
H6 = 15 cm, règle à 43 cm (5/05/04, 7e campagne).
H6 = 40 cm (H2 = 60 cm), règle à 56-57 cm (29/10/03). Cette valeur H6 semble exagérée.
H6 = 40 cm, règle à 68 cm, eau 3 cm plus haut que la dalle inclinée, le siphon de la galerie Ouest déverse (24/04/04), ou 35 cm par comparaison avec le 4/04/04.

Mesures au Luirographe. L'examen direct de l'enregistrement du Luiro nous fournit pour les jours de visite les valeurs suivantes :
H6 = 5 cm, règle à 43 cm (7e campagne).
H6 = 8 cm, règle à 42 cm.
H6 = 8 cm (à vue 15 cm), règle à 43 cm (7e campagne).
H6 = 12 cm (H2 = 32 cm), règle à 35 cm (2e campagne).
H6 = 14 cm, règle à 38 cm.
H6 = 13 cm, règle à 50 cm (7e campagne).
H6 = 14 cm, règle à 49 cm (7e campagne).
H6 = 23 cm, règle à 50 cm.
H6 = 28 cm (H2 = 48 cm), règle à 52 cm (2e campagne).
H6 = 32 cm (H2 = 52 cm), règle à 51 cm, pour un débit de 0,878 m3/s (2e campagne).
H6 = 33 cm , règle à 54 cm (7e campagne).
H6 = 38 cm, on constate l'arrêt du déversement galerie Ouest (23/02/04), ce qui donnerait une hauteur à la règle de 58 cm, soit un débit de 1 m^3/s.
H6 = 53 cm, le déversement par dessus le barrage des 4 Vents a cessé. La règle est alors à 69 cm. Le débit est alors 1,5 m^3/s (le 20 août 2004 à 9 h).
H6 = 73 cm, le jour de la crue du 11 août 2004. Ce qui correspond à la règle SAM à 80 cm, soit 1,8 m^3/s.
H6 = 101 cm, le 20 août 2004. Cela correspond à 96 cm à la règle de la salle à Manger, soit un débit estimé à un peu plus de 2,5 m^3/s.

Relation entre le Luirographe de la salle à Manger et la règle de la salle à Manger

On a reporté les quelques indications que l'on possède entre les deux mesures.

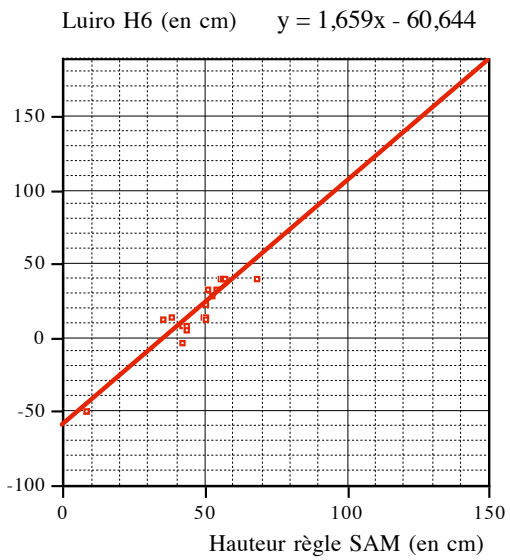


Fig. 1-20- Relation entre hauteur Luiro SAM, H6 et l'échelle SAM

La relation n'est pas précise mais il est probable que les lois de croissance sont voisines, car les deux écoulements sont à surface libre dans des gros blocs. D'où la vraisemblance d'une relation linéaire entre les deux échelles.

Tarage du Luirographe. On en déduit le tarage du Luirographe de la salle à Manger.

$$Q = 0{,}8\ H_{ls}^2 + 1{,}228\ H_{ls} + 0{,}472$$

valable pour les faibles débits, ou encore en adoptant le tarage direct de la salle à Manger, une expression valable pour de plus forts débits :

$$Q = 0{,}339\ h^3 + 0{,}647\ h^2 + 1{,}039\ h + 0{,}362$$

Dans cette expression, la hauteur au Luirographe est exprimée en mètre et le débit en m^3/s.

La courbe de tarage du Luirographe est moins précise que celle de l'échelle de la salle à Manger, mais elle est indispensable pour l'étude des crues (connues uniquement grâce aux Luirographes). C'est cette imprécision qui est la cause d'une mauvaise connaissance des débits de crue.

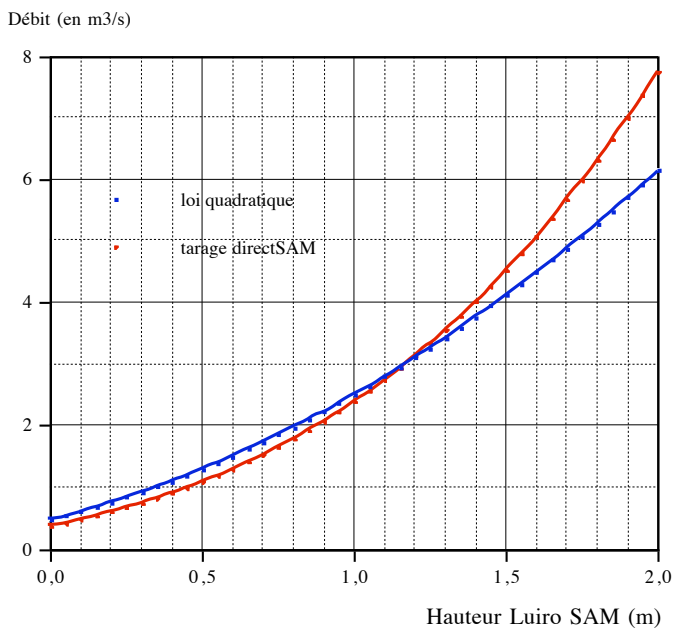


Fig. 1-21- Tarage du Luirographe de la salle à Manger
(la courbe bleue pour les faibles débits et la rouge pour les hauts débits)

12- Le Luirographe du bas du puits Lavigne

Le Luirographe du Puits Lavigne a été installé au ras de la flaque qui stagne en permanence au bas du P 13, sous le puits Lavigne et au point bas de la galerie Ouest.

Il est resté en place seulement les 6e et 7e campagne de mesures.

Son fonctionnement est particulier puisqu'il est sous l'eau seulement au moment du débordement du seuil en aval du siphon de la galerie Ouest. C'est-à-dire au moment des crues.

Le tronçon de courbe de la figure au-dessous qui possède peu de points correspond à la montée, c'est-à-dire au déversement du seuil au bout de la galerie Ouest. Le tronçon de courbe avec beaucoup de points correspond à la descente du plan d'eau à la fin de la crue. C'est bien sûr cette deuxième courbe qu'il faut considérer pour un tarage.

On constate sur l'enregistrement ci-dessous que le bas de la galerie Ouest est l'endroit le plus dangereux des Cuves, puisque lors de la crue du 20 août par exemple, l'eau est montée de deux mètres en moins de trois minutes. C'est pour cet endroit que l'expression vague de crue s'applique à plein. Cette vague de crue est facile à comprendre : il s'agit de la mise en fonctionnement brutal du déversoir de la galerie Ouest.

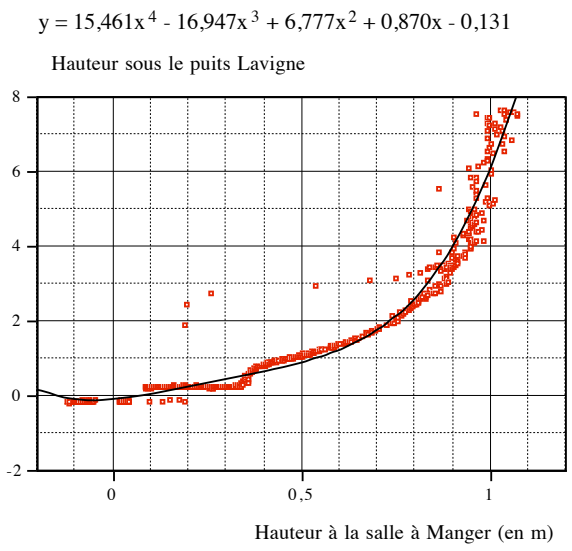


Fig. 1-22- Hauteur de l'eau sous le puits Lavigne
en fonction du Luiro de la salle à Manger (crue du 20 août 2004)

13- Le luirographe au niveau du siphon n°1 de la galerie Ouest

Le Luirographe a été installé sur la dalle qui marque le niveau de l'eau du premier siphon de la galerie Ouest. Il est dans l'eau quand le niveau ordinaire atteint 30 cm de hauteur.

Le déversoir, situé en aval, se trouve à environ 15,30 m au-dessus (comme l'indique le Luiro et la topo).

En extrême étiage, le niveau de l'eau est 3 m sous l'amarrage du fil pour 7 cm à la salle à Manger (20/07/03). Le lac, devant, fait une dizaine de mètres.

L'eau commence à monter au premier siphon quand le déversoir entre les deux siphons se met à déborder. On verra sur les enregistrements du 2e siphon que cela arrive pour un débit (en régime permanent) de 0,8 m^3/s. Ensuite, le niveau de l'eau dans la galerie en aval du siphon monte rapidement et finit par rejoindre l'altitude du déversoir.

L'eau commence à déborder dans la galerie Ouest pour un débit en régime permanent de 1 m^3/s. La hauteur du Luiro aux Enfers se mesure lors des décrues et elle vaut 30 cm. Le Luiro à la salle à Manger est alors 40 cm sous l'eau (d'après les mesures du 79e jour 2004). L'échelle de la salle à Manger n'est pas à une valeur connue, mais on peut l'estimer à 60 cm.

14- Le Luirographe au 2e siphon de la galerie Ouest

Il a été placé à 1,5 m au-dessus du 2e siphon. Il n'a été mis en place qu'à l'occasion de la 7e campagne. Mais il est resté presque 6 mois, et il y a eu deux crues.

Le déversoir entre les deux siphons se trouve à 7,4 m au-dessus de l'emplacement du Luiro.

Le déversoir en aval du 1er siphon se trouve 16,2 m au-dessus du Luiro du 2e siphon. On en déduit que la dénivellation entre les deux positions des Luirographes (de part et d'autre du 1er siphon de la galerie Ouest) est de 16,2 – 15,3 = 0,9 m. Ce qui est faible.

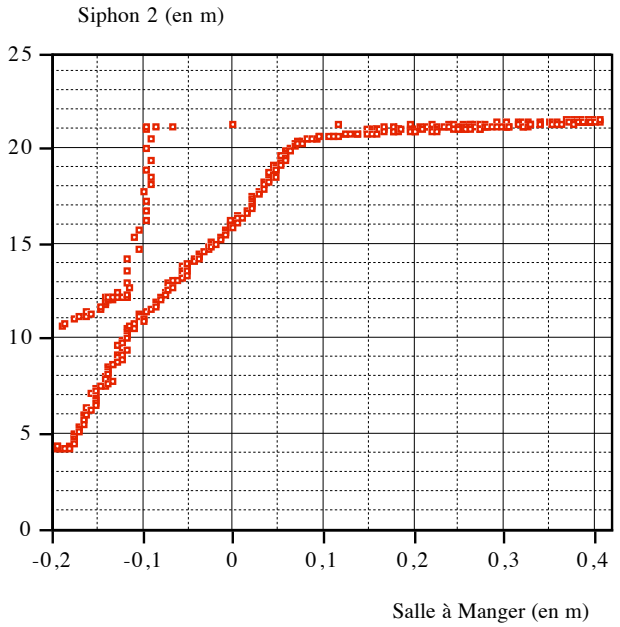


Fig. 1-23- La hauteur du Luiro du siphon 2 en fonction de celle du Luiro de la salle à Manger (le 11 août 2004)

La branche de montée de la crue est un transitoire rapide (en haut à gauche). La branche de descente (celle aux nombreux points) se rapproche plus d'un fonctionnement en régime permanent. Mais en comparant avec la crue du 20 août dont la décrue a été encore plus lente (13,5 h), on verrait que cette décrue du 11 août (7,6 h) est trop rapide pour être considérée comme quasi-permanente.

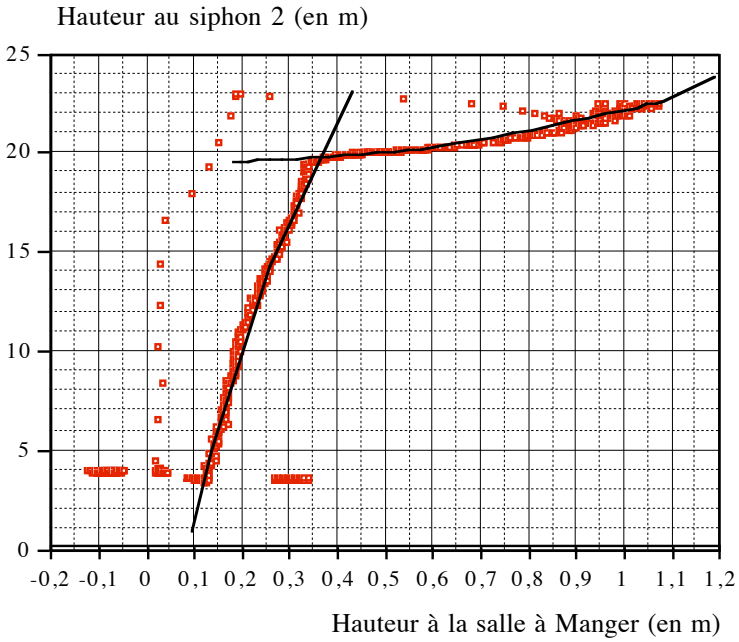


Fig. 1-24- Hauteur d'eau du Luiro du 2e siphon en fonction de la hauteur à la salle à Manger le 20 août 2004 (les hauteurs au niveau du siphon 2 sont à diminuer de 3,9 m)

Rôle du déversement sur la courbe. On voit très bien la profonde modification de la courbe de tarage au moment du déversement au-dessus du seuil. Au maximum de la crue, la hauteur au Luiro de la salle à Manger était 107 cm, ce qui donne 102 cm à la règle de la salle à Manger, soit un débit de 2,65 m^3/s.

Débit de fuite sous la galerie Ouest. On peut estimer le débit par les conduits de fuite sous la galerie Ouest en examinant la décrue au moment où le déversoir s'assèche (le 20 août à 14 h), le Luiro de la salle à Manger indiquait 33 cm, ce qui correspond à 58 cm à la règle, soit un débit de fuite (sous pleine charge) de un mètre cube par seconde. Ce débit de fuite correspond au débit total des deux pertes (celle du 2e siphon et celle du 1er siphon).

Le déversoir de la galerie Ouest donnait donc au maximum environ 1,65 m^3/s de débit de déversement.

Crue du 11 août 2004. Le Luiro de la salle à Manger a indiqué la hauteur maxi de 41 cm, ce qui correspond à une hauteur à la règle de 61 cm, soit le débit de 1,2 m^3/s. On en déduit que ce jour là, le déversoir ne délivrait qu'un débit de l'ordre de 200 l/s.

Crue du 2 décembre 2003. Le jour de la grande crue du 2-3 décembre 2003, le Germe est monté à 66 cm. Si on considère comme valable l'étalonnage fait à la première campagne, cela donne une hauteur apparente pour la première campagne de 66 -30 = 36 cm. La hauteur apparente au Luiro de la salle à Manger de H1= 82 cm sur la courbe de la campagne 1, soit 102 cm vraie pour H1, soit H6 = 98 cm, soit une hauteur à la règle de 95 cm, soit un débit de 2,5 m^3/s. Ce qui donnerait un débit au déversoir de la galerie Ouest de 1,5 m^3/s. La montée observée a été de 1,7 m au-dessus du déversoir. En prenant une largeur moyenne de 0,5 m, cela conduit à une vitesse moyenne de 1,76 m/s. La vitesse critique aurait dû être de 4 m/s. Cela veut dire que la remontée est plus grande que la hauteur au déversoir car il faut une pente pour faire couler cette eau depuis le point haut jusqu'au déversoir (et il y a aussi les pertes de charge entre le Luiro et la surface libre).

On calcule la hauteur vraie au déversoir h par la relation :

$$Q = L\,h\sqrt{g\,h} \quad \Rightarrow \quad h = \left(\frac{Q^2}{L^2\,g}\right)^{1/3} = \left(\frac{1{,}5^2}{0{,}5^2 .\, 9{,}81}\right)^{1/3} = 0{,}97 \text{ m}$$

La dénivellation entre le point haut et l'altitude du déversoir était donc de 73 cm. La vitesse au déversement était donc de 3,08 m/s.

Étude de la loi de perte de charge en aval du 2e et du 1er siphon dans la partie inconnue
La courbe de décroissance de la crue du 20 août 2004 nous permet de connaître le débit car il est le même qu'à la salle à Manger (régime quasi permanent). On en déduit donc la caractéristique débit-hauteur de la vidange.

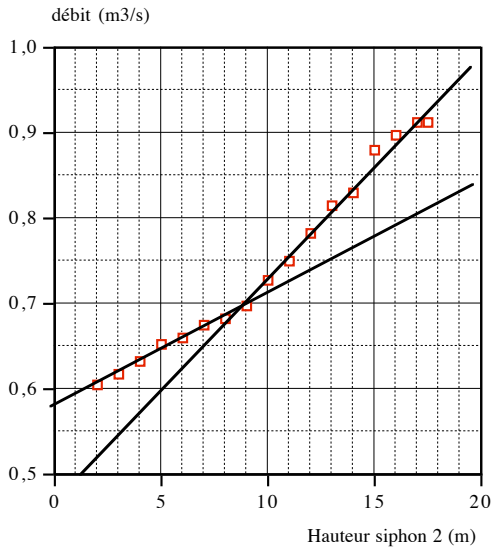


Fig. 1-25- Tarage du siphon 2 de la galerie Ouest
On voit nettement les deux caractéristiques

On a pris l'origine des hauteurs 1,5 m sous le Luirographe. On déduit de la courbe de tarage les deux relations ($H = H_{luiro} + 1{,}5m$) :

$$Q = 0{,}0135\ H + 0{,}58 \quad \text{pour} \quad H < 8{,}5\ m$$

$$Q = 0{,}0255\ H + 0{,}47 \quad \text{pour} \quad H > 8{,}5\ m$$

Le fait qu'il y ait deux tronçons de droite traduit l'existence de deux conduits de fuite (l'un pour le siphon 1 et l'autre pour le siphon 2). On remarque d'ailleurs que les deux conduits ont à peu près même conductance hydraulique.

Utilisation des transitoires. On peut utiliser la courbe de montée des crues pour évaluer les volumes mobilisés par la mise en charge.

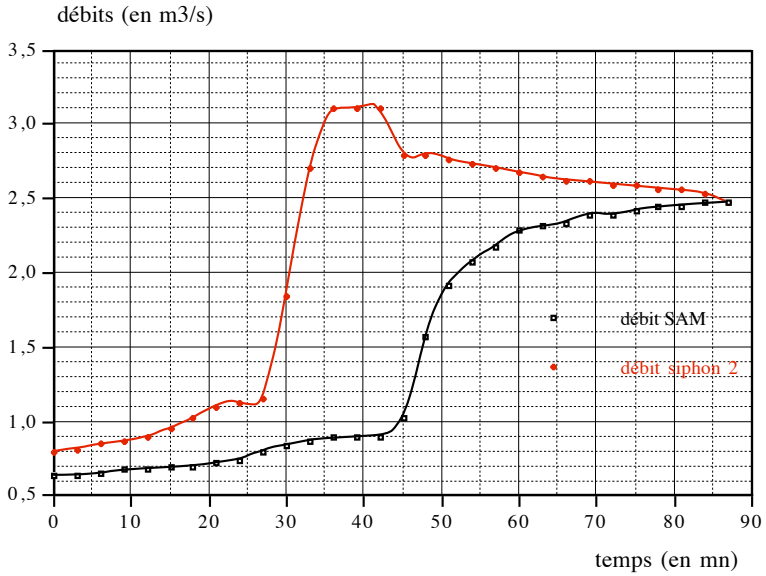


Fig. 1-26- Les deux débits totaux en fonction du temps (crue du 20 août 2004)

Sortie du siphon 2 et entrée à la salle à Manger

Sur la courbe ci-dessus, pendant la crue du 20 août 2004, sont représentés deux débits. L'un est le débit qui sort du siphon 2 vers l'aval (sous-écoulement et débordement) et l'autre est celui qui arrive à la salle à Manger. La différence des deux débits renseigne sur les volumes stockés entre le siphon 2 et la salle à Manger, c'est-à-dire sur les volumes aux Benjamins, bas de la galerie Ouest et dans la salle des Tritons.

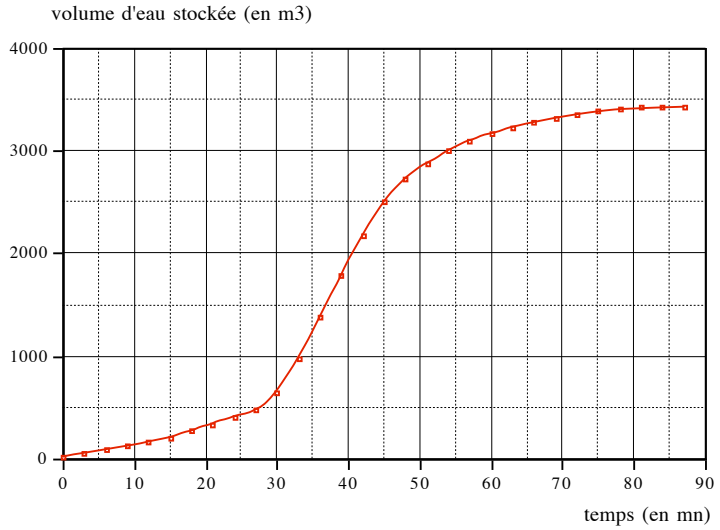


Fig. 1-27- Volume d'eau stockée au cours du temps pendant la crue du 20 août 2004

Sur la courbe ci-dessus, on voit que le volume stocké lors des grandes crues est important : ici 3400 m^3 entre le siphon 2 et la salle à Manger.

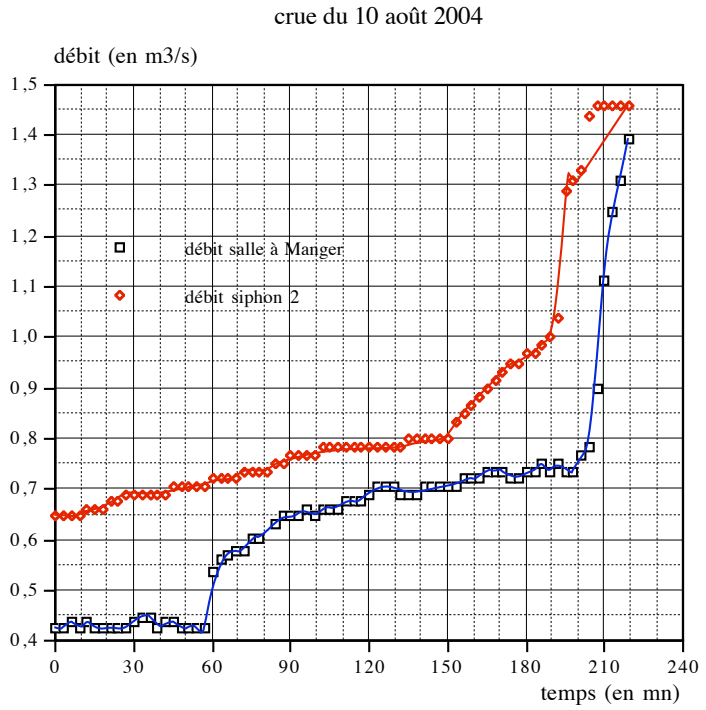


Fig. 1-28- Les deux débits pendant la crue du 11 août 2004

Les deux débits délimitent sur le graphique une surface, et il est facile de voir que le volume stocké est précisément l'aire de cette surface.

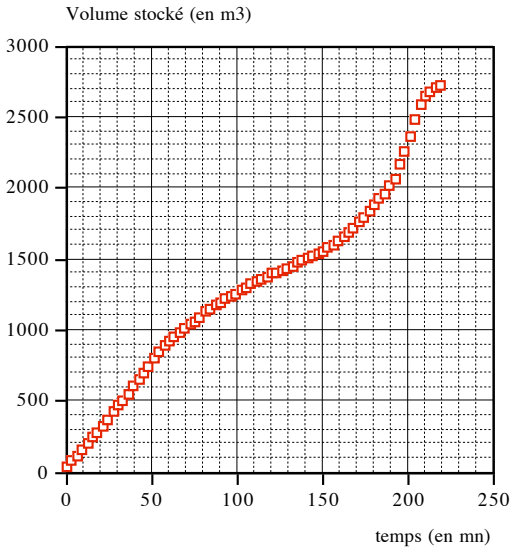


Fig. 1-29- Le volume d'eau stockée pendant la crue du 10 août 2004

On constate que le débit stocké est plus petit pour les faibles crues que pour les grandes. Mais l'ordre de grandeur de 3000 m^3 est conservé. On pourrait penser que cette différence provient de la montée plus faible lors de la petite crue, mais en réalité les deux montées sont très voisines. La différence provient du caractère non permanent de la décrue du 11 août 2004.

15- Récapitulatif des évènements

Nous présentons un résumé des évènements qui surviennent dans le cas où une crue monterait très lentement (régime quasi permanent).

Q = 70 l/s : extrême étiage (2003). L'eau coule à la salle à Manger jusqu'à la perte du Shunt. On la retrouve ensuite au barrage des Quatre vents jusqu'au siphon (douche de la cascade terminale active).
Q = 100 l/s, la douche du barrage des Quatre Vents se met à couler.
Q = 380 l/s, des griffons se mettent à couler dans les Enfers.
Q = 420 l/s, l'eau affleure à la salle du Styx et les Enfers coulent.
Q = 650 l/s, l'eau n'atteint pas encore le sentier des touristes, mais n'est pas loin.
Q = 750 l/s, le sentier des touristes se recouvre d'eau aux Enfers. Le débit qui coule au-dessous des Enfers est d'environ 440 l/s, ne change plus tant qu'il n'y a pas de mise en charge à la salle du Styx.
Q = 800 l/s, le seuil entre les deux siphons de la galerie Ouest se met à couler.
Q = 1 m^3/s, le déversoir de la galerie Ouest devient fonctionnel. Ce débit correspond au sous-écoulement dans la galerie inconnue.
Q = 1,5 m^3/s, le barrage des Quatre Vents se met à déborder. L'eau dévale dans la partie touristique, sort par la porte inférieure et par la Herse.
Q = 1,7 m^3/s, la perte des Enfers s'ennoie.

Q = 2,2 m^3/s, le barrage des Quatre Vents s'ennoie complètement.
Q = 3,6 m^3/s, la salle des Rataplanades se met à déborder. La galerie Ouest coule à 2,6 m^3/s.

Conclusions

Nous avons pu caractériser le fonctionnement de toutes les galeries connues en proposant des corrélations entre les hauteurs d'eau en régime permanent et les hauteurs d'eau en d'autres endroits. Puis à l'aide de la courbe de tarage de la règle de la salle à Manger qui a été obtenue de deux façons différentes (mesure directe des débits et calcul par les lois du déversement), nous avons pu fournir des courbes de tarage pour tous les autres points. Nous avons aussi réussi à estimer différents volumes d'eau stockée entre les siphons de la galerie Ouest et la salle à Manger d'une part, et entre la salle à Manger et les Enfers, d'autre part.

Cette étude a été l'occasion de mettre en évidence deux points très spécifiques aux circulations souterraines :

- d'une part, le changement (catastrophique au sens de la théorie des catastrophes) de comportement à l'ennoiement d'un conduit (perte des Enfers, siphon sous la salle Saint Bruno),
- et d'autre part, la généralité du modèle : mise en charge d'un conduit étroit avec déversement de trop-plein (2e siphon de la galerie Ouest, galerie Ouest, salle des Tritons, salle du Styx, salle des Rataplanades).

L'ennoyage et le dénoyage d'un conduit s'accompagnent en principe d'un phénomène d'hystérésis, mais il est probable que pour un conduit naturel, ce phénomène disparaisse du fait des fluctuations incessantes de la surface libre.

La configuration d'un conduit étroit surmonté d'un large conduit (dont le débit ancien a été capturé par le conduit récent) est liée à la spéléogenèse de cavités évoluant par abaissement du niveau de base (la plus grande partie des cavités alpines). On la retrouve donc dans toutes les cavités de ce type.

Les mesures et les observations permettent de cerner d'assez près la mise en place des petites crues. Elles seront donc très précieuses pour l'élaboration d'un protocole de sécurisation du circuit touristique.

En revanche, l'absence de mesures de débit en crue et l'absence de grandes crues au cours des campagnes de mesures nous empêchent de parler avec certitude des très grandes crues comme celles des 8 et 9 juillet 1996. Et même les petites crues restent assez imprécises quant à leurs débits.

Chapitre 2

Les crues aux Cuves de Sassenage

La détermination des courbes de tarage en différents points des Cuves a déjà fait appel aux crues qui se sont déroulées pendant les campagnes.

Dans ce chapitre, nous présentons pour les différentes crues, les observations visuelles et les indications des Luirographes. Puis, nous nous attacherons à suivre la progression du front de crue généré par le débordement de la galerie Ouest et à examiner les délais entre les différents point observés dans les Cuves.

1- Les trajets de l'eau à l'étiage et en crue, les trois nœuds

1-1- Étiage

Dans le gouffre Berger, l'eau se jette dans le 2e siphon, puis elle plonge dans le 3e et le 4e siphon. Ce dernier comporte plusieurs accès mais aucun d'entre eux n'a laissé le passage en profondeur aux spéléos plongeurs. Cette eau du 4e siphon du Berger est censée sortir directement, après un long cheminement inconnu, dans le deuxième siphon de la galerie Ouest des Cuves de Sassenage. C'est l'hypothèse qui s'accorde le mieux avec les hauteurs de mises en charge de part et d'autre.

Cette eau sort ensuite par un conduit inconnu et rejoint l'amont du siphon Bonnevalle, probablement sous le puits Lavigne. De là, l'eau peut être suivie. Elle sort dans la galerie des Tritons, traverse l'éboulis et arrive en amont du siphon de la salle à Manger. Puis, elle coule à l'air libre dans le Canyon, s'enfonce dans l'éboulis de rive droite (on la voit en passant dans cette trémie), ressort de l'éboulis en aval du Gros Éboulis, passe sous le Shunt et va se jeter dans le siphon du Rapide. Une autre branche passe par l'Épingle à Cheveux et rejoint la même zone siphonnante constituée de conduits de petits gabarits (explorés en plongée par F. Poggia). L'eau reparaît à l'air libre sur une vingtaine de mètres juste en amont de la salle Saint Bruno, puis elle s'enfonce dans un siphon impénétrable.

La sortie de cette eau se fait au niveau de la cascade Édouard, sous la salle du Styx. On ne peut la suivre du fait de la petitesse des conduits. Elle ressort pour partie dans la salle des Trois Cascades (barrage des Quatre Vents), et pour partie plus loin, un peu en amont de la cascade Terminale. De là, elle plonge dans un dernier siphon et émerge au niveau du barrage de l'ancien captage d'eau dans la grotte Carrée. Ensuite, elle sort de la grotte et constitue le Germe.

1-2- Les trois zones de mises en charge (les Trois Nœuds)

Il y a trois zones pour lesquelles l'étroitesse des passages se traduit par des mises en charge à la moindre augmentation du débit. Pour chacun de ces trois nœuds, le conduit inférieur correspond à un conduit de capture de l'écoulement. Capture en cours, car l'eau n'a pas eu le temps de les agrandir suffisamment, et c'est pour cette raison que l'eau repasse en crue dans

les galeries supérieures fossiles plus spacieuses. Cette configuration fait penser que le niveau de base est descendu assez régulièrement. De fait, le Germe sort un peu en hauteur par rapport au Furon et d'autres pertes pourraient apparaître progressivement dans la cavité au fur et à mesure de la descente de la résurgence.

Ces trois zones sont les lieux de stockage de l'eau au moment de la crue. Et ce sont les volumes associés à ces stockages qui permettent d'obtenir un délai avant l'arrivée de la crue.

a- Le 2e siphon de la galerie Ouest

Le conduit de sortie de l'eau est tellement petit que l'eau monte très facilement sur de grandes hauteurs (20 m) à la moindre augmentation du débit. On peut penser que le conduit pérenne passe sous la galerie Ouest et débouche un peu en hauteur et en amont du siphon Bonnevalle.

Une fois que l'eau a dépassé le seuil entre les deux siphons (z = 55 m), elle déverse dans le premier siphon. Une deuxième galerie de capture qui draine le premier siphon se met alors à fonctionner. Si elle ne suffit pas à évacuer le débit, la mise en charge se poursuit et le déversoir qui surplombe la galerie Ouest se met à fonctionner (z = 65 m).

C'est ce déversement, quand il est violent, qui est à l'origine des vagues de crue qui peuvent balayer le circuit touristique. Dans le détail, la crue se transmet par les petits conduits inférieurs et par le déversoir et il peut survenir que les deux montées d'eau coïncident dans le temps. On comprend que la vitesse de montée soit alors importante.

Sur les deux schémas ci-dessous, nous avons représenté l'ensemble des siphons concernés, en supposant que le 4e siphon au fond du gouffre Berger est le même que le deuxième siphon de la galerie Ouest aux Cuves de Sassenage. La longueur totale des galeries doit dépasser 1,5 km. Sur le premier schéma est dessiné le fonctionnement d'étiage, et sur le deuxième, la mise en charge lors des petites crues.

Le volume d'air situé entre les deux siphons est comprimé par la montée de l'eau. Mais on ne sait pas de combien. Cette compression retarde un peu le déversement. On peut imaginer une légère dépression à la décrue (cf. fig.1-24 et 2-12).

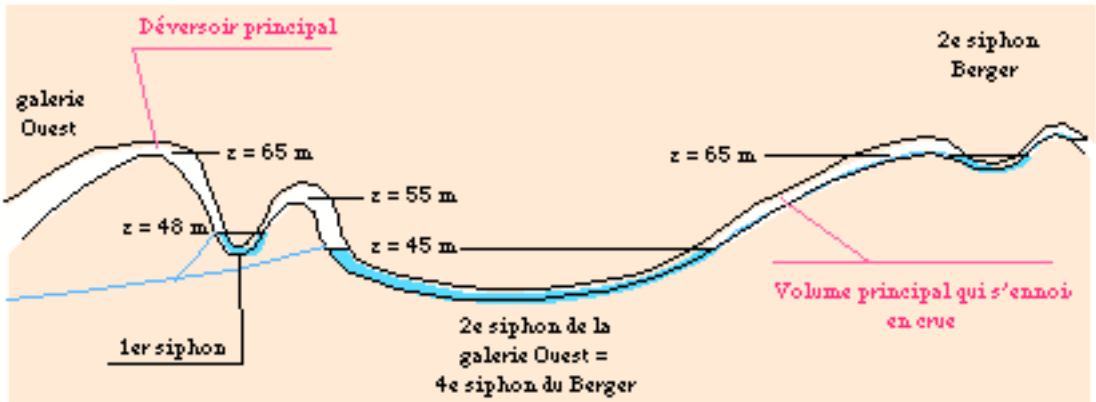


Fig. 2-1- Le nœud de mise en charge entre galerie Ouest et gouffre Berger à l'étiage

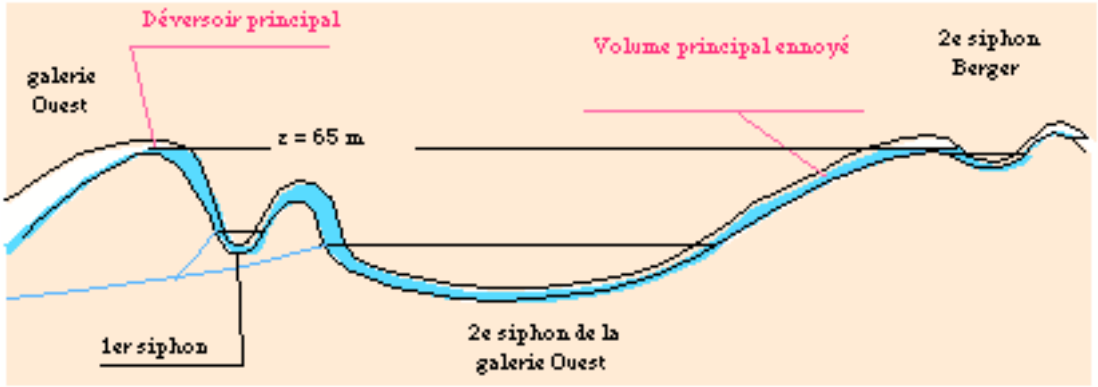


Fig. 2-2- Lors des petites crues, il se produit une grande mise en charge de 20 m

b- Le bas de la galerie Ouest et la rivière des Benjamins

Au bas de la galerie Ouest, le niveau peut monter sur une dizaine de mètres lors des grandes crues. Le détail en est encore inconnu. Mais on peut imaginer le scénario suivant. La vague de crue qui dévale la galerie Ouest se heurte à la trémie qui sépare la galerie Ouest de la rivière des Benjamins. Il y a une mise en charge instantanée de 2 à 4 mètres. Ensuite, l'eau se déverse dans la rivière des Benjamins (l'affluent de Saint-Nizier). La vague de crue se précipite vers l'aval et ennoie la galerie. Elle s'enfonce dans la trémie qui sépare les Benjamins de la galerie, encore inconnue, qui conduit au siphon Bonnevalle.

La vague remonte aussi vers l'amont de la galerie des Benjamins jusqu'au puits de 5 mètres.

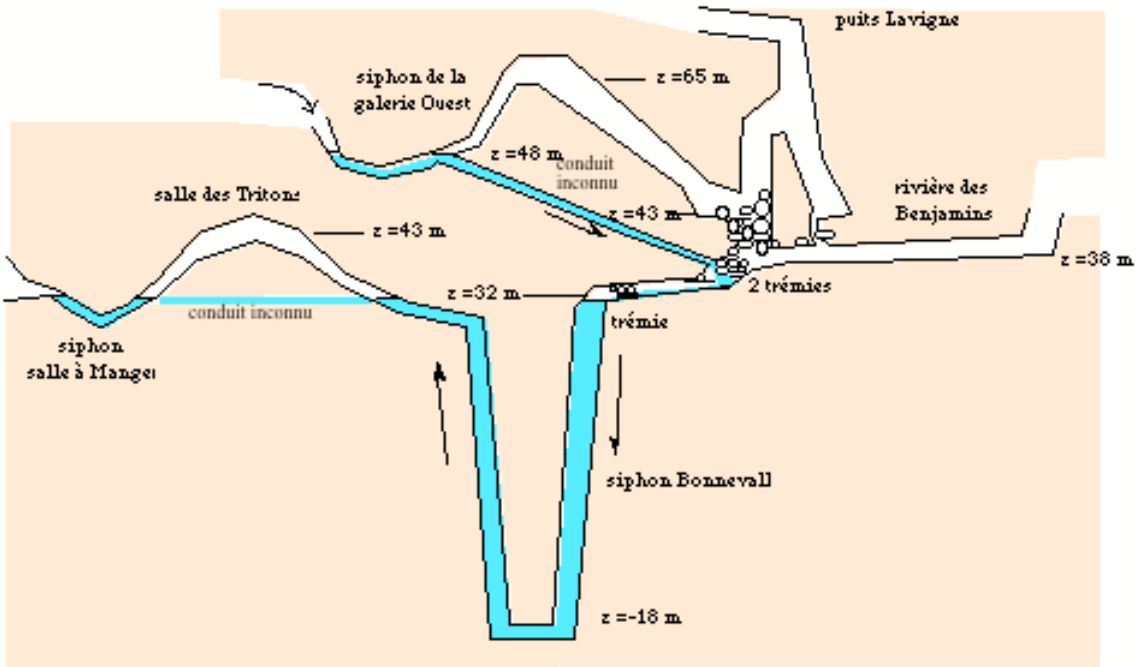


Fig. 2-3- Le siphon Bonnevalle à l'étiage

À la sortie aval de ce siphon, le tas de blocs de la salle des Tritons fait obstacle à l'eau et provoque une mise en charge. On ignore si le déversoir à la cote +43 se met à fonctionner.

L'aspect des blocs, classés le long de la remontée (gros en bas, petits en haut) conforte cette idée. Mais le niveau ne peut pas dépasser cette cote, vu la dimension de la galerie. On peut penser qu'une fois la crue installée, toute la zone comprise entre le bas de la galerie Ouest et le déversoir de la salle des Tritons est noyée avec une pente de la surface piézométrique (entre les cotes 51 m et 43 m) du fait des différentes trémies. L'installation d'un Luirographe dans les Benjamins et d'un autre à la sortie aval du siphon Bonnevalle pourrait valider ce modèle.

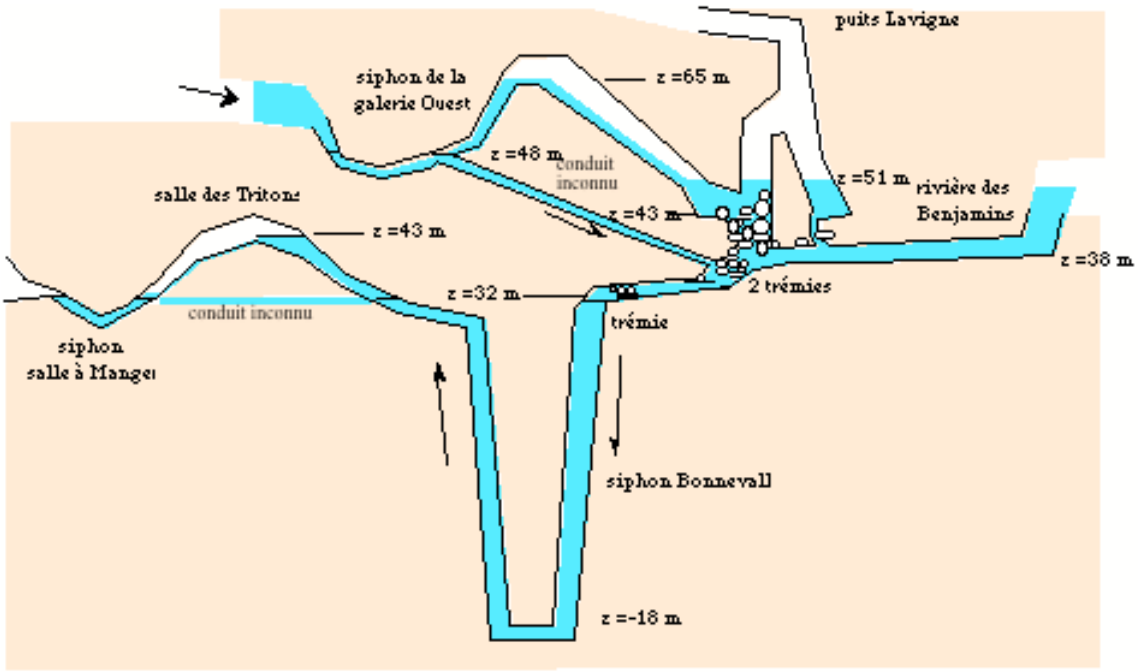


Fig. 2-4- Le nœud du siphon Bonnevalle en crue

c- La galerie des Enfers dans le circuit touristique

La dimension des conduits entre la cascade Édouard et la salle des Trois Cascades est très petite elle-aussi. La moindre augmentation de débit se traduit par une mise en charge qui fait passer l'eau par la galerie des Enfers, offrant un merveilleux spectacle aux touristes. Cette eau rejoint le conduit pérenne au niveau de la salle des Trois Cascades. Si le débit est plus grand, l'eau déborde sur le sentier des touristes, compromettant la visite. L'amorçage de la perte se traduit par une montée rapide de l'eau. Mais le débit est alors assez élevé.

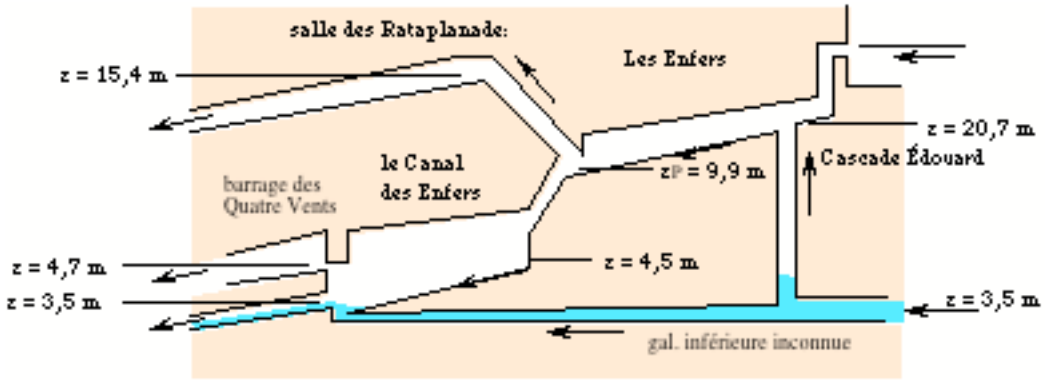


Fig. 2-5- Fonctionnement du nœud des Enfers à l'étiage

À l'étiage, les touristes ne voient pratiquement pas d'eau sauf au barrage des Quatre Vents et à la sortie, dans la salle des Pas Perdus qui domine la grotte Carrée.

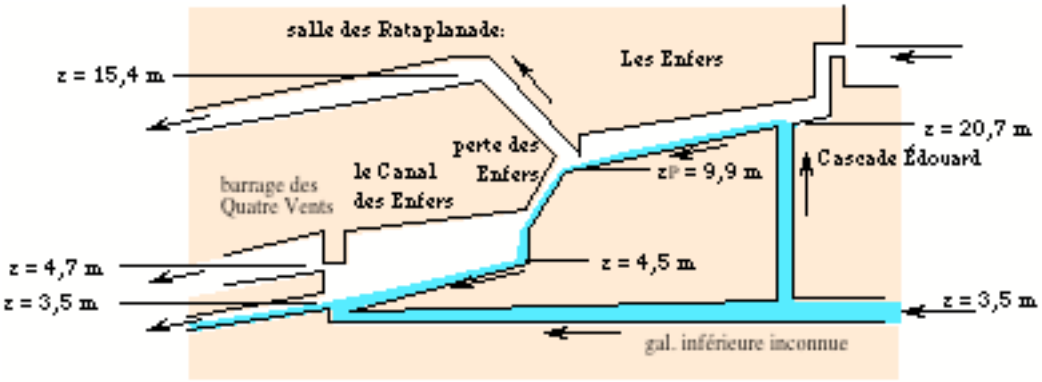


Fig. 2-6- Fonctionnement du nœud des Enfers en petites eaux

En petites eaux, un ruisseau apparaît dans la galerie des Enfers. C'est à cette période que la visite des Cuves présente de l'intérêt. Le ruisseau coule à proximité immédiate des touristes et le lit en a été canalisé de façon à laisser le sentier au sec.

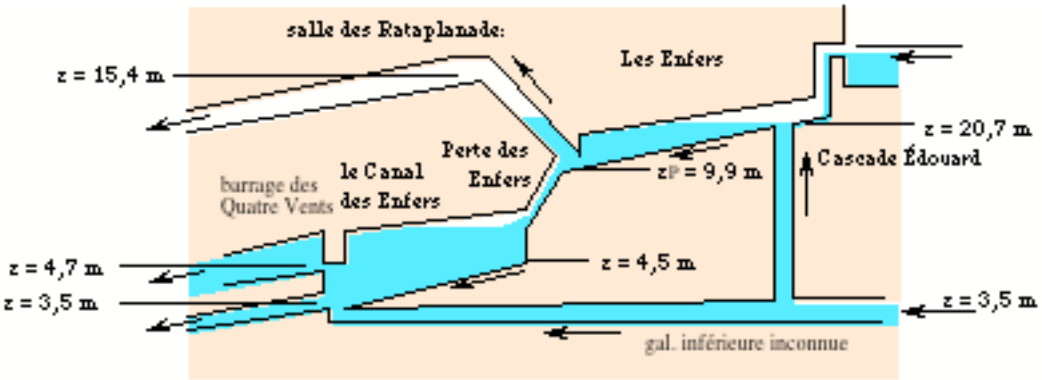


Fig. 2-7- Schéma de fonctionnement du nœud des Enfers en crue

La montée en débit se traduit par les évènements suivants : l'eau monte progressivement dans le ruisseau des Enfers et atteint presque le niveau du sentier des touristes. Ensuite, il déborde à plusieurs endroits. D'abord, au voisinage de la salle du Styx et ensuite, au bas du 2e escalier. La visite n'est alors plus possible. La montée des eaux n'a pas besoin d'être importante pour empêcher la visite. Il suffit d'une vingtaine de centimètres.

Pour les grandes crues, la perte des Enfers s'ennoie. Le barrage des Quatre Vents se met à déborder. L'eau emprunte la sortie de la visite touristique et sort par la porte-grille inférieure. Puis la Herse, grille horizontale au toit de la salle des Pas Perdus, se met à fonctionner en une magnifique cascade. Enfin pour les crues de rareté annuelle, l'eau peut utiliser la salle des Rataplanades comme trop-plein. Tout le réseau touristique est plein d'eau et même l'entrée supérieure des touristes est parcourue par un torrent.

Les crues exceptionnelles (comme celle de juillet 1996) sont beaucoup plus fortes encore. Le déversoir de la salle des Tritons fonctionne (z = 43 m). L'eau atteint dans la salle à Manger un

niveau de l'ordre de 40 m. Toute la galerie en aval est remplie d'eau. Mais le Canyon ne siphonne pas. Le gros Éboulis et le haut de la salle des Géants restent hors d'eau mais toute la galerie aval siphonne. L'eau atteint la cote 32 m à la salle Saint-Bruno. Seul le haut de la plate-forme des touristes émerge encore. Un gros torrent parcourt la galerie des Silex. Un lac occupe le bas de la salle de l'Éboulis et un entonnoir impressionnant avale l'eau dans l'escalier qui va vers les Enfers. Cette galerie est entièrement noyée jusqu'au plafond. La salle des Rataplanades siphonne ainsi que les galeries en aval. Toutes les entrées crachent l'eau. Il n'y a malheureusement pas de photos de cet épisode. On a du mal à imaginer le débit maximum instantané (12 m^3/s ?).

d) Les autres zones d'écoulement de l'eau

Entre ces trois nœuds de mise en charge, il existe deux zones d'écoulement à surface libre. La plus en amont est la galerie Ouest, de gros calibre. L'écoulement qui provient du déversement du siphon 1 n'est pas gêné du tout et arrive au bout de quelques minutes dans le deuxième nœud.

La deuxième zone d'écoulement à surface libre est celle qui est située en aval du siphon de la salle à Manger. Le torrent coule d'abord dans le Canyon et sous le Gos Éboulis, puis s'enfonce dans les siphons en aval du Shunt. De petites mises en charge peuvent arriver, mais seulement lors des grandes crues. Le pouvoir de rétention de cette zone n'est pas négligeable et contribue au ralentissement des vagues de crue.

2- Le déroulement d'une crue aux différents Luirographes

Nous allons nous intéresser aux différentes crues qui se sont déroulées de juin 2002 à octobre 2004.

Il n'y a pas eu de très grandes crues pendant la période considérée. C'est l'année 2002 qui a été la plus intéressante à cet égard. Malheureusement, les Luirographes n'avaient pas encore été acquis.

Citons les crues qui ont fait l'objet d'observations : 7 juin 2002, 16 novembre 2002, 1er janvier 2003, 2-3 décembre 2003, 11 août 2004, 20 août 2004.

Pour les autres crues, les renseignements sont des observations après la crue (mousse de crue pour la crue du 3 décembre 2003) ou des mesures au Luirographes. La plus importante de toutes est celle du 7 juin 2002, suivie, parmi celles observées, de celle du 20 août 2004 et celle du 3 décembre 2003.

Crue du 7 juin 2002. Elle a été la conséquence de pluies diluviennes qui se sont abattues la veille au soir sur le massif. L'eau a débordé par la salle des Rataplanades et de nombreux blocs dans le circuit touristique montraient la violence des eaux. La galerie des Enfers a siphonné d'un bout à l'autre. Le débit a dû dépasser 4,5 m^3/s.

Crue du 16 juillet 2002. Elle a déversé aussi par la salle des Rataplanades.

Crue du 16 novembre 2002. Nous avons pris des photos du Germe et de la zone d'entrée. Un petit débit sortait de la porte supérieure. Nous fournissons ci-dessous le relevé du niveau au siphon 1 de la galerie Ouest lors de la crue du 13 novembre.

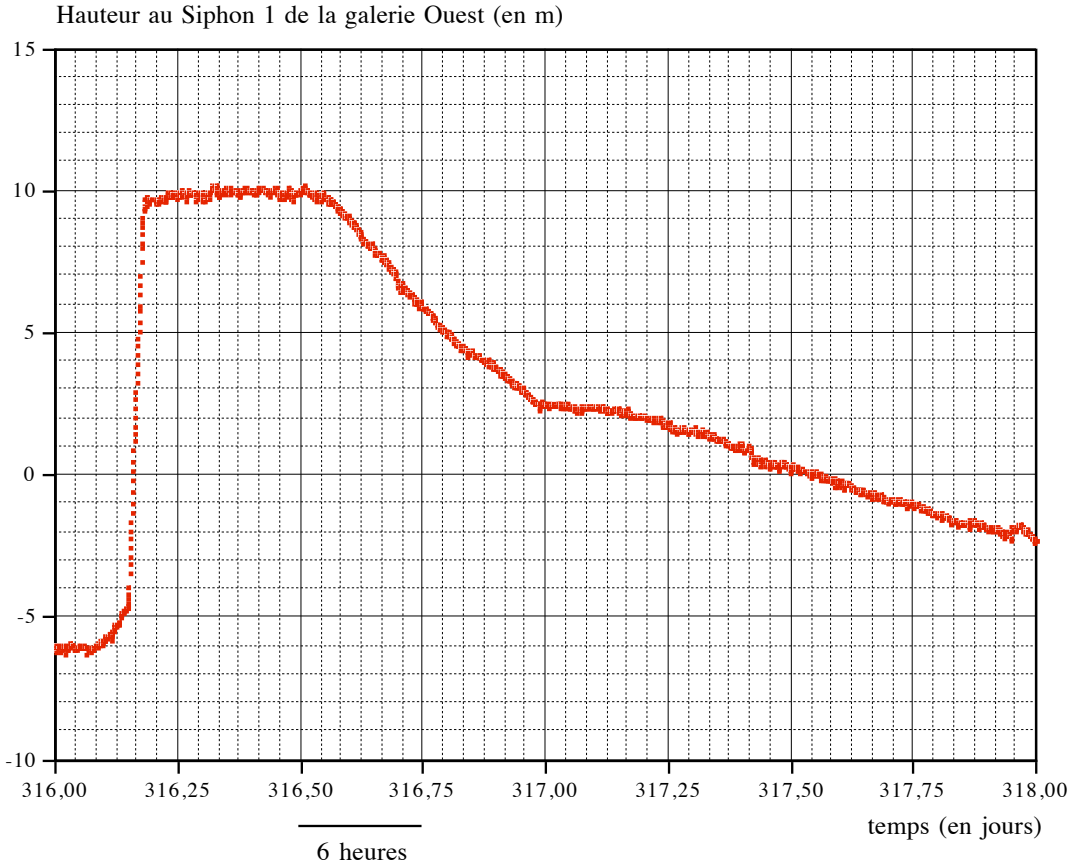


Fig. 2-8- La petite crue du 13 novembre 2003 au siphon 1 de la galerie Ouest (l'intervalle entre deux mesures est de 1 minute)

Cette petite crue du 13 novembre 2003 au cours de la 5e campagne de mesure nous a montré l'extraordinaire sensibilité du siphon 1 de la galerie Ouest qui se met en charge à la moindre augmentation de débit. C'est à ce moment qu'on a compris l'intérêt de ce secteur pour détecter à l'avance les arrivées de crue. Mais les autres Luirographes n'ayant pas fonctionné, on n'a pas pu exploiter à fond ces données.

Crue du 3 décembre 2003. Elle correspond à une grande crue dans le sud-est de la France. La grotte de la Luire a crevé. La mousse au bas de la galerie Ouest a été observée à 6,5 m de hauteur, de même dans la rivière des Benjamins. La salle des Rataplanades n'a pas débordé, mais il s'en est fallu de peu. Les Luirographes étaient en place. Mais seuls ceux placés au siphon 1 de la galerie Ouest et celui sur le Germe ont fonctionné. Le Luirographe de la salle des Géants n'ayant pas fonctionné, on n'a pas pu faire la correction de pression atmosphérique. Les indications sur le Germe sont donc flous.

Crue du 11 août 2004

Les seules crues qui ont pu être analysées correctement sont celles du 11 et du 20 août 2004. Tous les Luirographes ont à peu près fonctionné. La deuxième crue est la plus importante. Mais la salle des Rataplanades n'a pas débordé. Nous avons déjà montré des corrélations entre

les hauteurs d'eau aux différents endroits. Nous nous contenterons ici du déroulement temporel.

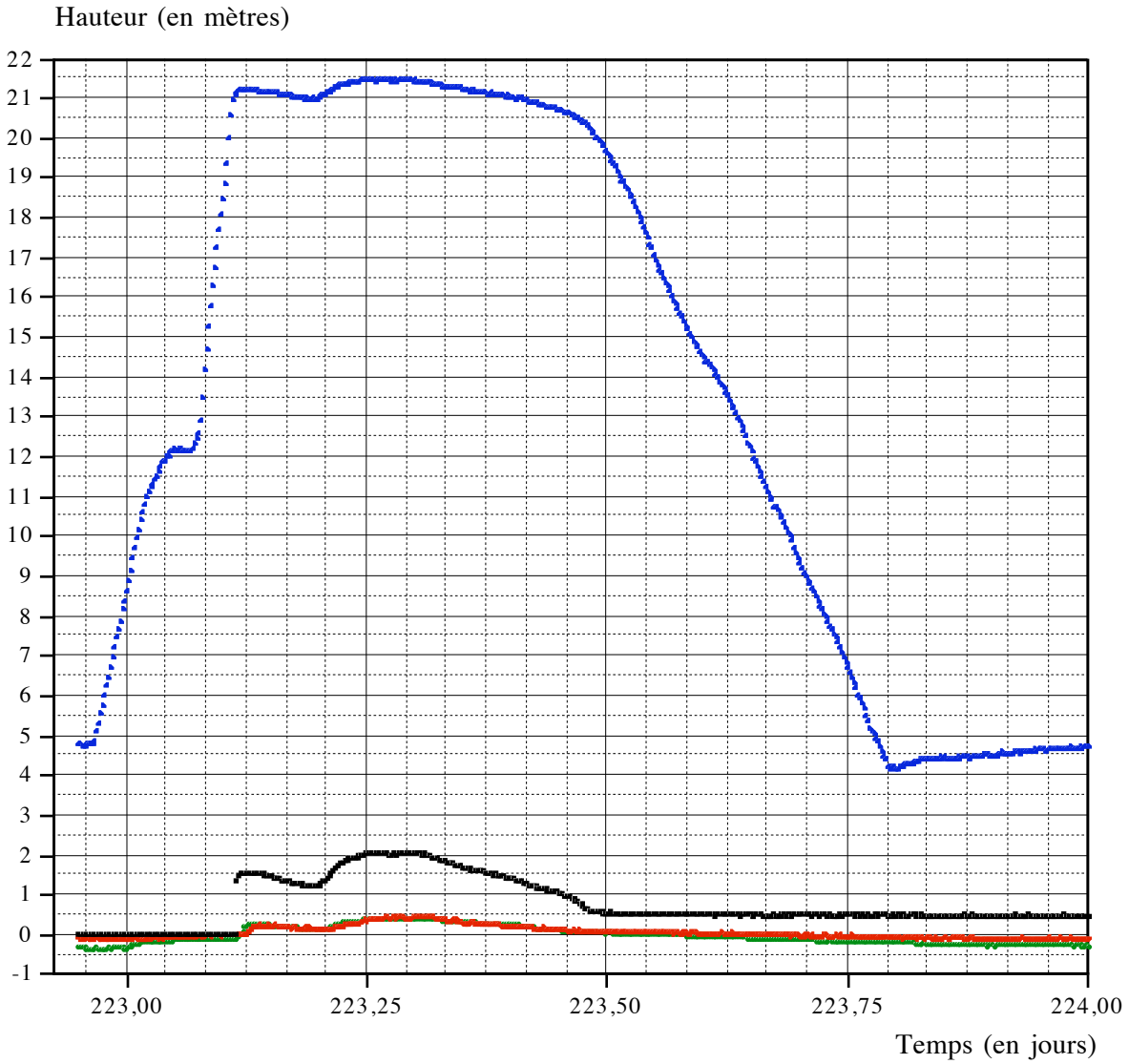


Fig. 2-9- Crue du 11 août 2004. Enregistrements des Luirographes au cours du temps (en haut le siphon 2 de la galerie Ouest, au-dessous, le bas de la galerie Ouest plus bas les Enfers et la salle à Manger)

Sur les différents enregistrements de la crue du 11 août 2004, on peut voir le déroulement de la crue. L'origine des hauteurs est arbitraire (dérive des Luiros). Le démarrage a eu lieu le 10 août à 23 h au siphon 2, puis la montée du niveau de l'eau s'est faite régulièrement avec un palier à la hauteur de 7,5 m. Ce palier s'interprète facilement. Il correspond au déversement du seuil entre les deux siphons. La crue marque un temps car le remplissage du siphon 1 prend un certain temps. Ensuite, la montée de l'eau reprend et le déversoir en aval du siphon 1 se met à fonctionner. Le torrent a coulé pendant moins de 10 heures. Il y a eu deux maximum de débit. On peut interpréter ces deux maximum par le décalage qui existe entre l'affluent Moins Mille au gouffre Berger qui voit les crues précéder celles de la rivière sans Étoiles de quelques heures. Ce décalage de l'ordre de 4 heures a été observé par les spéléos. Ici, le décalage est de 3,5 h. Puis le débit a diminué, et les niveaux aussi. Le déversoir de la galerie Ouest a cessé de couler. Et le niveau a continué à diminuer. Un moment donné, les deux

siphons ont été déconnectés par l'assèchement du seuil les séparant. Ils se sont alors vidés d'une manière indépendante. On voit sur la courbe de descente une petite différence de pente que l'on peut attriber à ce phénomène.

Amplitude

Au siphon 2 de la galerie Ouest, la montée de l'eau a été de 16,70 m au-dessus du Luiro
Au bas de la galerie Ouest, la montée a été de 2,07 m.
Au siphon de la salle à Manger, la montée a été de 0,66 m.
Aux Enfers, la montée a été de 0,53 m.

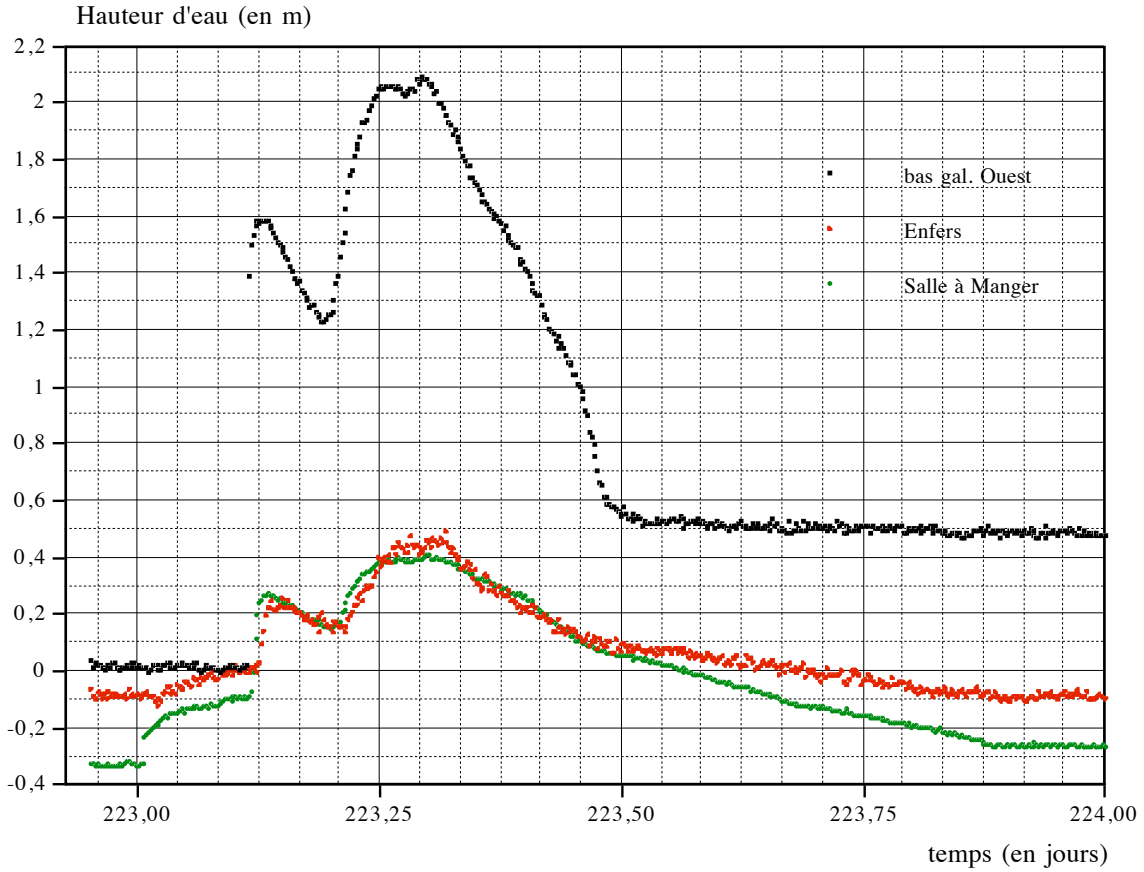


Fig. 2-10- Crue du 11 août 2004 . Enregistrements des différents Luirographes.
Bas de la galerie Ouest, Enfers, siphon de la salle à Manger

La figure ci-dessus est un zoom de la figure d'avant. Elle permet de constater que les niveaux d'eau ailleurs qu'au siphon de la galerie Ouest n'ont pas été très grands. Le bas de la galerie Ouest s'est rempli brutalement au moment du déversement du siphon 1 dans la galerie Ouest. La montée de l'eau a été de 1 mètre en moins de trois minutes.

Les montées sont comparables entre le siphon de la salle à Manger et les Enfers. La perte des Enfers ne s'est pas amorcée. Le barrage des Quatre Vents aurait débordé quelques instants d'après le guide.

Sur la figure suivante, on a encore grossi l'échelle des hauteurs. Les fluctuations de la surface libre sont bien plus grandes aux Enfers qu'au siphon de la salle à Manger. On voit nettement

l'arrivée de la vague de crue, suite au débordement de la galerie Ouest. Cette vague de crue se traduit par une montée significative d'une mesure à l'autre (espacées dans le temps de trois minutes). La vague de crue semble arriver au même moment aux deux endroits. On verra plus loin les délais réels.

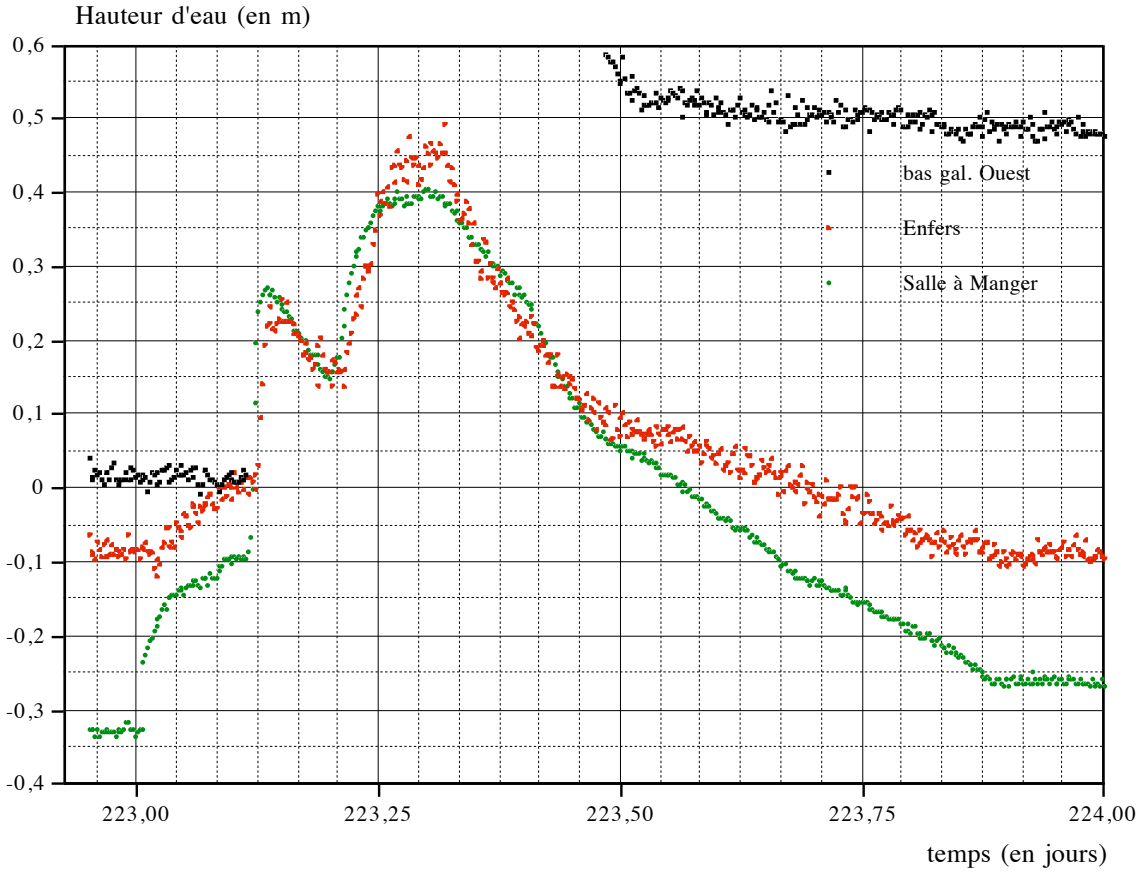


Fig. 2-11- Crue du 11 août 2004. Grossissement.
Au début des enregistrements (à gauche) les niveaux sont dans l'ordre :
bas galerie Ouest, Enfers, siphon de la salle à Manger

Crue du 20 août 2004

La crue du 20 août a été plus forte que celle du 11 août. Nous avons pu pénétrer dans la grotte quelques heures après le maximum de la crue et prendre quelques photos de l'entrée jusqu'aux Enfers. De même, des observations ultérieures de mousse de crue au plafond de la galerie en amont de la salle Saint Bruno a permis d'établir le niveau de l'eau à cet endroit. Par rapport à la crue du 11 août, la montée a été plus rapide. En particulier, on n'arrive pas à distinguer sur les piézogrammes le palier correspondant au déversement du seuil entre les deux siphons de la galerie Ouest. Mais comme la précédente, cette crue présente deux maximum qu'il est tentant d'interpréter comme pour l'autre par le décalage temporel d'arrivée des crues entre l'affluent Moins Mille et la rivière Sans Étoiles au gouffre Berger.

Puis, le débit a diminué régulièrement. On démontre qu'au moment où le torrent du déversoir de la galerie Ouest se tarit, la courbe doit montrer une tangente horizontale. C'est ce qu'on constate à peu près. Ce point est très important. Il nous donne l'altitude relative du déversoir par rapport au Luirographe. En effet, le déversement à la montée de la crue se fait avec un débit important, donc des vitesses significatives qui engendrent des pertes de charge. Ces

pertes de charge apparaissent comme une pression supplémentaire au niveau du Luirographe. Les deux courbes de montée et de descente ne sont donc pas symétriques. Ce point d'assèchement a servi aux tarages.

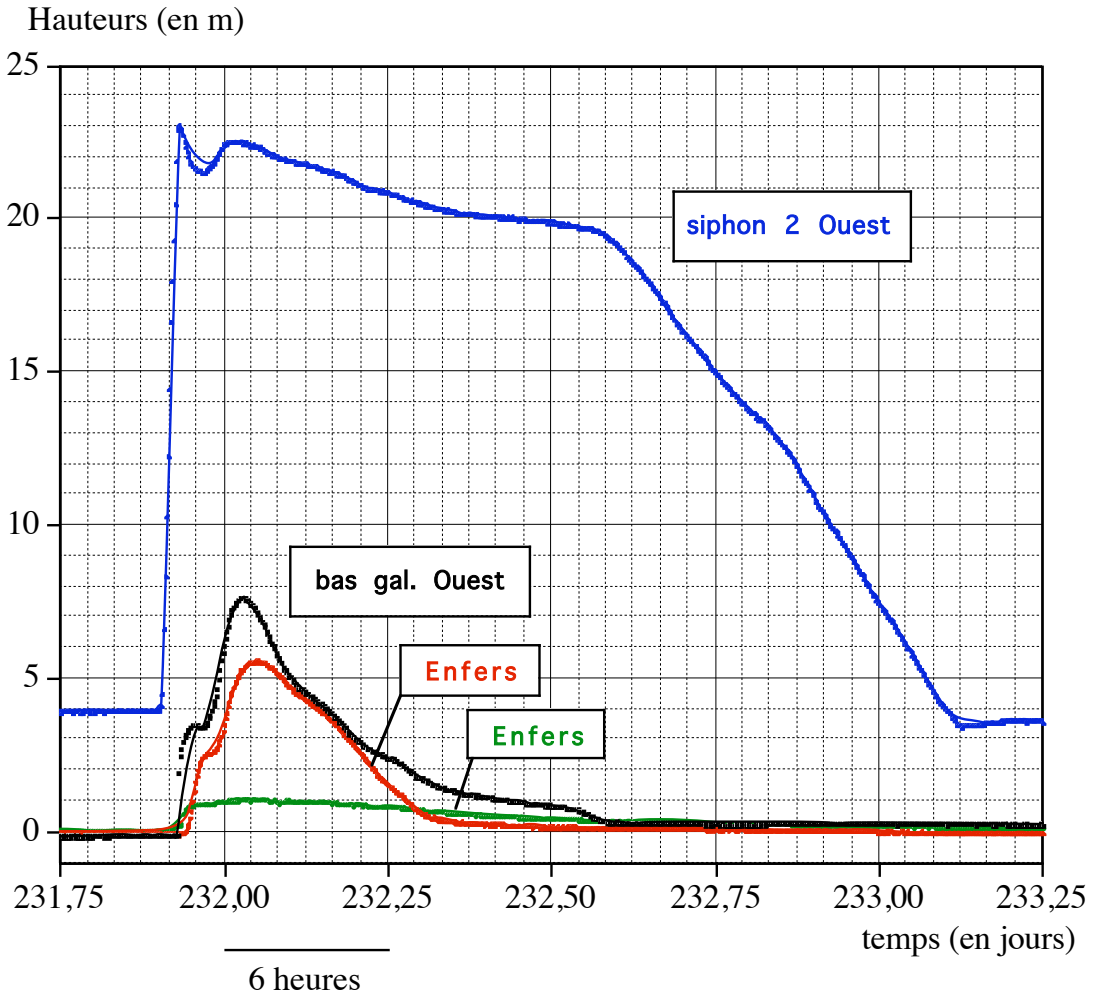


Fig. 2-12- La crue du 20 août 2004
Les différents enregistrements des Luirographes

Amplitude

Au siphon 2 de la galerie Ouest, la montée de l'eau a été de 19,0 m au-dessus du Luiro.
Au bas de la galerie Ouest, la montée a été de 7,70 m.
Au siphon de la salle à Manger, la montée a été de 1,02 m.
Aux Enfers, la montée a été de 5,60 m.

L'arrêt du torrent de la galerie Ouest a eu lieu quand le niveau derrière le siphon était de 16,2 m. Ce qui correspond à la hauteur du déversoir par rapport au Luiro. La durée du déversement a été de 15 h 30.

À l'heure exacte de l'arrivée de l'eau au bas de la galerie Ouest, le niveau de l'eau était de 17,85 m, soit 2,34 m correspondant au niveau de l'eau plus haut et à la perte de charge entre le Luiro et la surface libre. Au maximum de la crue, il était de 19,02 m, soit une mise en charge de 1,17 m supplémentaire.

La montée de l'eau au bas de la galerie Ouest a été nettement plus grande (7,6 m) que pour la crue du 11 août, ce qui indique que le débit de déversement a été beaucoup plus grand.

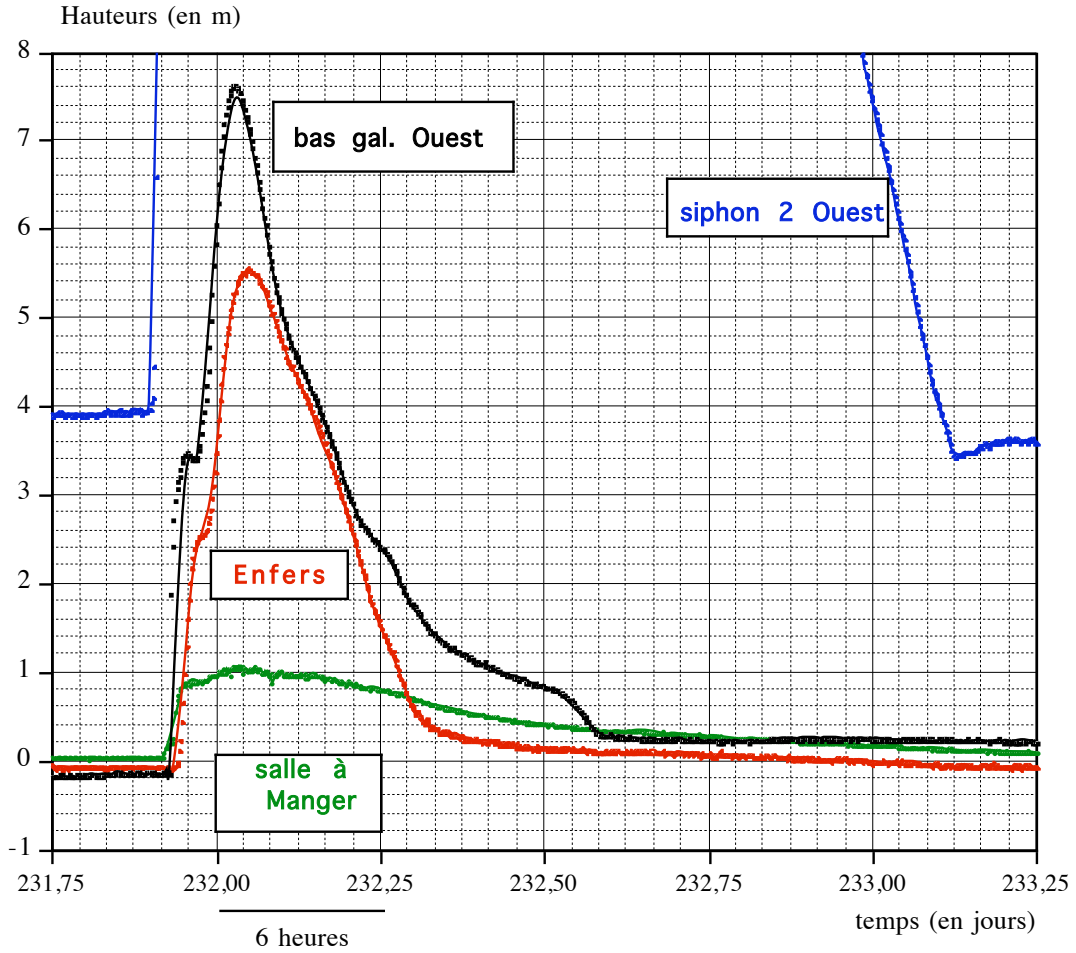


Fig. 2-13- Crue du 20 août. Grossissement

De même, ce débit a suffit à ennoyer la perte des Enfers. De ce fait, la montée de l'eau aux Enfers a été importante (5,5 m). Mais le débit n'a pas été suffisant pour faire déborder l'eau à la salle des Rataplanades. Cet épisode d'ennoiement de la perte a duré 6 heures.

3- Progression de la vague de crue, les délais

Les Luirographes avec leur fréquence d'acquisition élevée permettent de mesurer les délais d'arrivés d'un front de crue.

3-1- Analyse de la crue du 11 août 2004

Temps de passage des maxima

La crue du 11 août 2004 a présenté deux maxima. On reporte sur un tableau les instants des deux passages à ces maxima. On note t_1 le temps entre le début de la montée de l'eau et celui du premier maximum, et t_2 pour le deuxième maximum. On note H_1 la hauteur d'eau atteinte au premier maximum et H_2 celle atteinte au deuxième. H_2/H_1 est le rapport des hauteurs d'eau.

	2e siphon	Bas gal. Ouest	Salle à Manger	Enfers
t_1	3 h	3 h 06 mn	3 h 12 mn	3 h 33 mn
t_2	7 h	7 h 06 mn	7 h 15 mn	7 h 20 mn
H_2/H_1	1,012	1,31	1,2	1,65

Crue du 11 août 2004

Les décalages temporels du passage des maxima aux différents Luirographes sont de l'ordre de 20 à 30 mn seulement. On voit que les maxima sont assez bien synchronisés, bien mieux que le démarrage de la crue comme on le verra plus loin. La raison en est qu'un maximum se passe à débit constant et que les effets capacitifs sont alors minima. Les valeurs des rapports des hauteurs montrent bien la non-linéarité des relations hauteurs-débits. Mais on peut penser aussi qu'une montée sera d'autant moins amortie vers l'aval que d'autres l'auront précédé (remplissant les volumes tampons).

Propagation de la crue

La crue s'est déroulée en deux épisodes rapprochés. D'après le Luirographe le plus en amont, (au 2e siphon de la galerie Ouest) la crue a démarré le 10 août à 23 h 12 mn. L'eau a débordé le seuil entre les siphons le 11 août à 1 h 12 mn. Le niveau était 7,45 m au-dessus du Luirographe situé entre les siphons. L'eau a atteint le niveau du déversoir de la galerie Ouest à 2 h 38 mn. Le niveau était de 16,2 m au-dessus du Luirographe.

D'après le 2e Luirographe (en bas de la galerie Ouest), l'eau est arrivée en bas de la galerie Ouest le 11 août à 2 h 43 mn, soit 3 h 31 mn plus tard que le début de la montée de l'eau.

À la salle à Manger on a une première montée de 9 cm le 11 août à 0 h 9 mn, soit 57 mn après le démarrage de la crue derrière le siphon, mais nettement avant le déversement. Puis, la vague de crue est arrivée à la salle à Manger à 2 h 47 mn (soit 4 mn plus tard que le bas de la galerie Ouest).

Aux Enfers, la vague est arrivée à 3 h, soit 13 mn plus tard) qu'à la salle à Manger.

	2e siphon	1er seuil	2e seuil	Bas gal. Ouest	Salle à Manger	Enfers
ti – t1	0 mn	2 h	3 h 26 mn	3 h 31 mn	3 h 35 mn	3 h 48 mn
Δt		2 h	1 h 26 mn	4-5 mn	4-5 mn	13 mn

Les temps d'arrivée de la crue du 11 août 2004

Dans ce tableau ti – t1 représente le temps à partir du début de la crue, alors que Δt représente l'intervalle de temps entre deux stations consécutives.

3-2- Analyse de la crue du 20 août 2004

Au 2e siphon de la galerie Ouest, la crue a démarré le 19 août à 21 h 43 mn.
Le premier seuil (entre les deux siphons) a été atteint vers 21 h 57 mn (14 mn plus tard).
Le 2e déversoir a été atteint vers 22 h 12 mn (29 mn après le démarrage de la crue).

L'eau est arrivée en bas de la galerie Ouest le 20 août à 22 h 18 mn et une deuxième vague à 23 h 24 mn.
Une première montée est survenue à la salle à Manger à 22 h 05 mn et une vague de crue est arrivée à 22 h 25 mn
Aux Enfers, la première montée a eu lieu à 22 h 36 mn et la deuxième vague est arrivée à 23 h 42 mn.

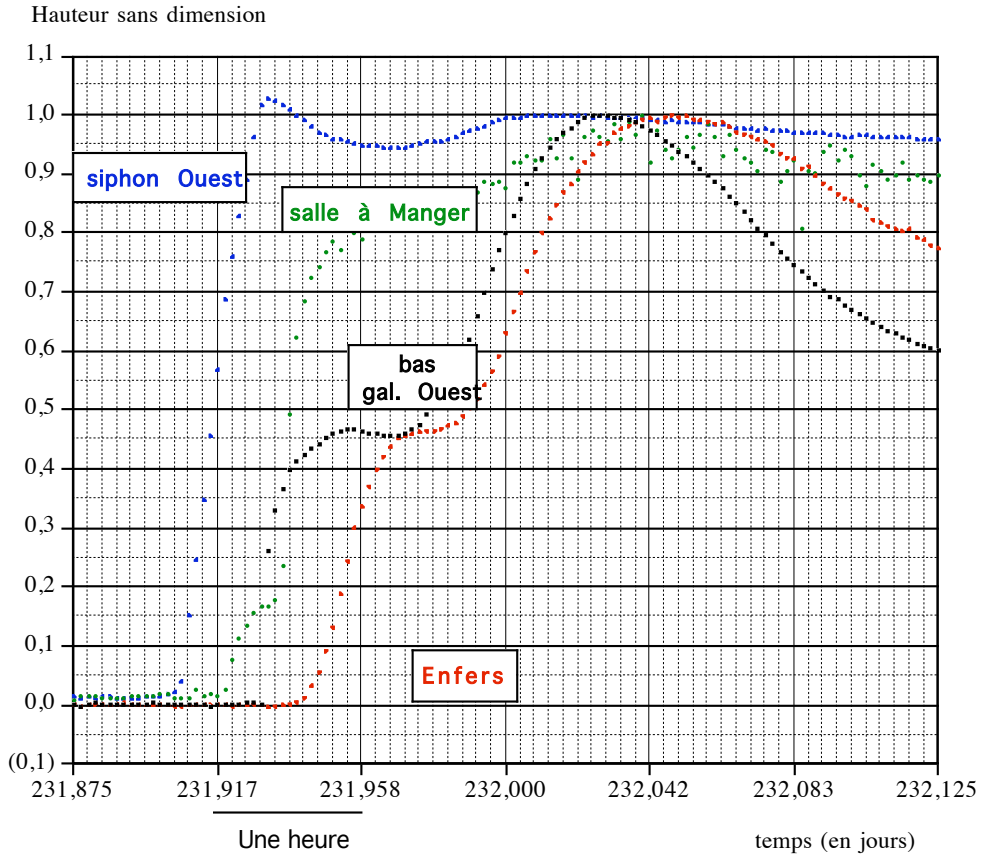


Fig. 2-14- Crue du 20 août 2004. les délais d'arrivée de la vague de crue
Les hauteurs ont été normalisées pour mieux faire apparaître les décalages temporels

	2e siphon	1er seuil	2e seuil	Bas gal. Ouest	Salle à Manger	Enfers
ti – t1	0	14 mn	29 mn	35 mn	42 mn	53 mn
Δt		14 mn	15 mn	6 mn	7 mn	11 mn

Les temps d'arrivée de la crue du 20 août 2004

Dans ce tableau ti – t1 représente le temps à partir du début de la crue, alors que Δt représente l'intervalle de temps entre deux stations consécutives.

On remarque qu'entre les deux crues, ce sont les temps de remplissage des deux réservoirs à l'amont de la galerie ouest qui ont changé. Les temps de propagation depuis la salle à Manger n'a pas beaucoup différé d'une crue à l'autre.

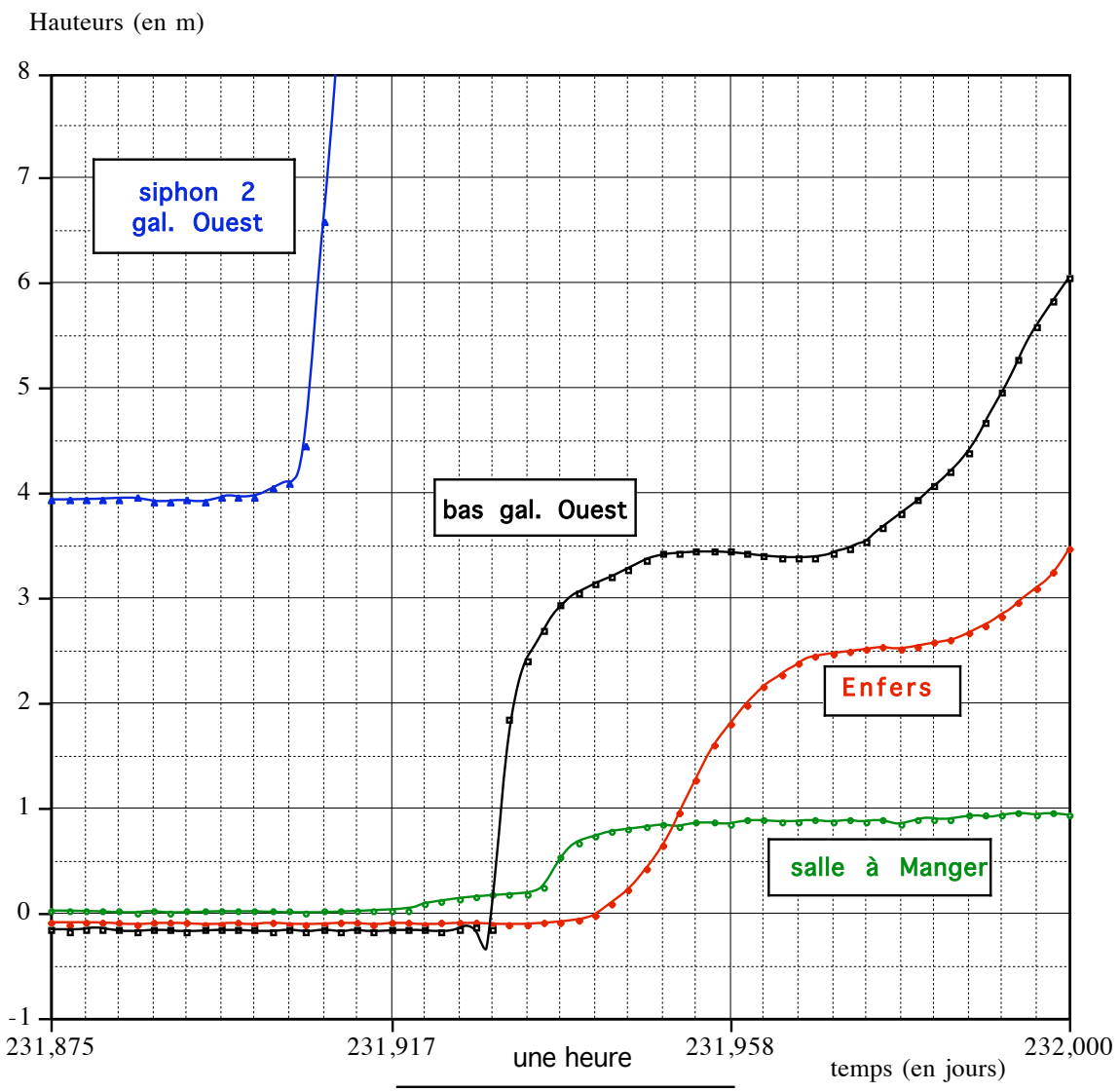


Fig. 2-15- Les délais d'arrivée de la vague de crue

Conclusion

Nous sommes capables de décrire la mise en charge du système des Cuves de Sassenage depuis le siphon de la galerie Ouest jusqu'à la sortie. La vague de crue est due au débordement du déversoir en aval du 1er siphon de la galerie Ouest. Cette vague de crue s'atténue vers l'aval, mais suffit à rendre dangereux le sentier touristique.

Si l'on considère le démarrage de la crue au siphon 2 de la galerie Ouest, les deux épisodes observées montrent que le temps d'arrivée de la crue devrait être suffisant pour la sécurisation, sauf pour des crues très rares.

Chapitre 3

Modèle hydraulique des Cuves pour les petites crues

Nous allons proposer un modèle hydraulique des écoulements dans les Cuves. Ce modèle simplifié servira à élaborer un modèle mathématique de prévision d'arrivée de vague de crue dans les Cuves de Sassenage. Par petites crues, nous entendons les débits compris entre les débits d'étiage (60 l/s) et les débits de crue (2 ou 3 m^3/s). Ce modèle est destiné à prévoir l'évolution de la hauteur d'eau aux Enfers en fonction du débit en bas du Berger. Il est calé à l'aide des mesures faites aux Luirographes au cours de plusieurs campagnes. Il est en rapport avec le problème de la sécurisation de la visite touristique de cette cavité.

Ce modèle intègre les galeries qui s'étendent du 2e siphon du gouffre Berger jusqu'à la sortie des Cuves. C'est dire que l'ensemble des conduits est complexe et long (plus de deux kilomètres), comprenant des galeries qui sont parfaitement inconnues des spéléos mais que l'on peut estimer grâce aux mesures des Luirographes.

Ce modèle ne peut actuellement que donner des résultats qualitatifs. Il ne faut pas espérer calculer une crue quelconque à quelques décimètres près. La modélisation grossière des conduits, le caractère partiellement inconnu du genre des pertes de charge (loi de puissance, bifurcation du comportement de la relation hauteur-débit …) empêchera de représenter finement la réalité. Cependant, pour des crues comprises entre des crues déjà mesurées, on peut espérer en affinant les paramètres parvenir à une représentation fidèle des observations. Pour les extrapolations aux débits extrêmes, l'incertitude croîtra.

La mise en place d'un capteur à demeure dans le 2e siphon de la galerie Ouest devrait permettre, à terme, d'affiner ce modèle. Le modèle qui suit doit donc être considéré comme provisoire (20/12/04). Il n'est conçu que comme une suite de vidanges de réservoir. Il utilise donc des équations en régime quasi-permanent pour les écoulements. En particulier, la propagation de la crue en écoulement en surface libre n'est pas analysée correctement (délais empiriques plutôt que résolution des équations de Saint-Venant). Mais cette simplification se justifie par la complexité des chemins de l'eau.

1- La modélisation hydraulique

Nous allons remplacer les conduits réels par d'autres, équivalents pour les volumes d'eau et les rétrécissements, mais plus simples pour le reste des caractères géométriques.

Les hauteurs de mise en charge seront calculées en chacun des nœuds. Comme on s'intéresse aux régimes transitoires, le débit évoluera dans le temps et ne sera pas le même en chacun des nœuds.

Le débit qui commandera le modèle sera le débit en amont des siphons du gouffre Berger. Ce débit sera supposé connu en fonction du temps. On pourra donc se donner différents scénarii de crue (crue très progressive, rapide, très brutale…).

Les pertes de charge occasionnant les mises en charge ne sont pas, *a priori*, connues mais seront calées en faisant tourner le modèle numérique à l'occasion des crues mesurées aux Luirographes.

On choisira des coefficients de conductance hydraulique k tels que le débit est relié à la mise en charge par la relation générale : $Q = k\ \Delta H^n$.
Pour un écoulement turbulent noyé, n = 1/2.
Pour un écoulement à surface libre en canal, n = 3/2.
Pour un écoulement à surface libre à travers une trémie homogène, n = 1 (démontré en annexe).
Mais nous avons vu plus haut, dans l'étude des courbes de tarage, que la complexité des situations, en particulier l'existence de déversoirs, conduit à des relations valables seulement sur un intervalle de débit. Quand ce sera possible nous prendrons donc les relations empiriques obtenues par l'expérience.

a) Modèle de mise en charge aux siphons de la galerie Ouest

On appelle Q_0, le débit, à un instant donné, au siphon aval du gouffre Berger,
Q_1, le débit de soutirage des deux siphons de la galerie Ouest (supposés de même niveau),
Q_2, le débit éventuel de déversement au sommet de la galerie Ouest.

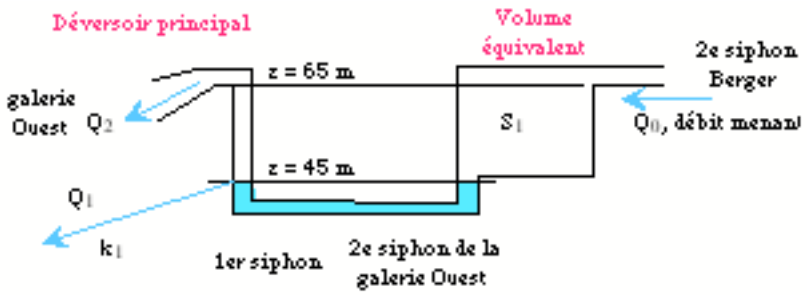


Fig. 3-1- Schématisation des siphons de la galerie Ouest

La dénivellation entre les deux siphons est négligée. Quand le niveau d'eau monte au deuxième siphon de la hauteur dz, le volume d'eau stockée est égal à S_1 dz. La dénivellation maximale est prise égale à 17,7 m.

Volume d'eau concerné par la mise en charge du 2e siphon de la galerie Ouest

Le volume à l'amont du siphon 2 de la galerie Ouest est inconnu. On le note V_0. L'examen du croquis de Frédo Poggia pour le bas du gouffre Berger permet de l'estimer à 3700 m^3.
Le volume entre les deux siphons est noté V_1 = 500 m^3.
Le volume V_2 à l'aval du 1e siphon est estimé à 800 m^3 (l = 4 m, h = 5 m, L = 40 m). Soit un volume total V = 5000 m^3.

Lors de la crue du 20 août 2004 le siphon s'est rempli en 33 mn, ce qui permet d'estimer le débit moyen soustrait par le remplissage du réservoir : $Q = V / \Delta t$ = 5000/33/60 = 2,5 m^3/s. Ce

débit est considérable, du même ordre de grandeur que le débit qui sort en aval. Ce qui signifie que le débit amont, celui qui vient du gouffre Berger a été divisé par deux au moment de la montée en charge.

Lors de la crue du 11 août 2004, le siphon s'est rempli en 150 mn (en enlevant l'arrêt intermédiaire), cela conduit à un débit soustrait de $Q = V / \Delta t = 5000 /150/60 = 0{,}55\ m^3/s$.

De même l'examen de la décrue du 11 août 2004 permet alors d'estimer le débit supplémentaire moyen apporté par la vidange du réservoir lors de cet épisode à $Q = V/\Delta t = 5000/7/3600 = 0{,}2\ m^3/s$.

Surface horizontale moyenne. Le volume total maximal de stockage d'eau est pris égal à 5000 m^3. Cela donne pour surface horizontale moyenne $S_1 = 5000/20 = 250\ m^2$. La montée de l'eau est notée H_1. L'origine est prise 1,5 m sous le niveau du Luirographe. Elle varie entre 0 et 20 mètres.

Ces données suffisent pour modéliser le fonctionnement de ce nœud. La conductance k_1 des deux boyaux de fuite est donnée par la valeur du débit au déversement $k_1 = Q/H$.

La courbe de tarage nous fournit l'expression linéaire approchée :

$$Q_1 = 0{,}029\ H_1 + 0{,}5$$

Cette relation est valable tant que la hauteur H_1 ne dépasse pas 17,20 (hauteur correspondant au déversement = 15,7+1,5 m). Au-delà, il faut ajouter un débit de déversement Q_2, dont la relation de tarage adoptée s'écrit (relation supposée linéaire provisoirement) :

$$Q_2 = k'_1\ (H_1 - 17{,}2)$$

Nous adoptons : $k'_1 = 0{,}57\ m^2/s$, valeur qui assure un débit de 1,7 m^3/s pour une dénivellation de 3 m.

On a donc les relations :

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + S_1 \frac{dH_1}{dt}$$

$$H_1 = 37\ (Q_1 - 0{,}5) \quad \Rightarrow \quad \frac{dH_1}{dt} = 37\ \frac{dQ_1}{dt}$$

La valeur numérique adoptée pour la surface horizontale est : $S_1 = 250\ m^2$.

b) Modèle de mise en charge du siphon Bonnevalle-Benjamins

On appelle $Q_1 + Q_2$ le débit qui se jette dans le siphon Bonnevalle,
Q_3, le débit qui transite dans les blocs de la salle des Tritons,
Q_4 , le débit de débordement éventuel au sommet de la salle des Tritons.

Dans ce schéma très simplifié, on a rassemblé les trois surfaces de réservoir en une seule. De même, les trois resserrements successifs (entre galerie Ouest et Benjamins, entre Benjamins et Bonnevalle, et entre Bonnevalle et siphon de la salle à Manger) ont été regroupés en k_2. Le détail des trois mises en charge successives n'est donc pas pris en compte finement, mais la

modélisation est nettement plus simple et suffira pour la prévision aux Enfers. Nous adopterons pour surface horizontale la valeur $S_2 = 250\ m^2$. On appelle H_2 la mise en charge du réseau. La valeur de la conductance du rétrécissement est donnée par $k_2 = Q/\Delta H^{1/2}$.

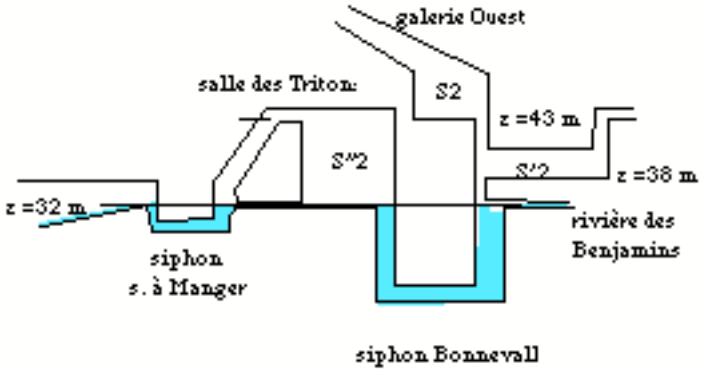


Fig. 3-2- Schématisation du nœud Bonnevalle-Benjamins

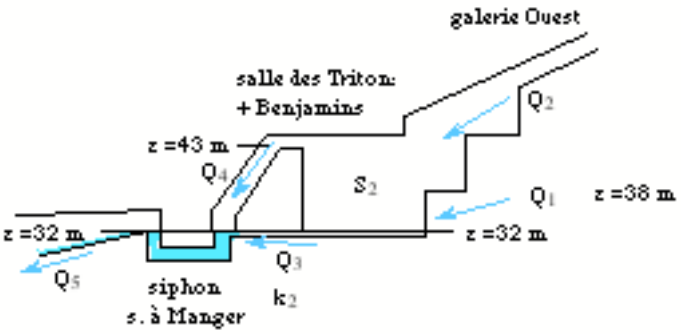


Fig. 3-3- Schéma encore plus simple du nœud Bonnevalle-Benjamins

Des hypothèses faites plus haut, on obtient les relations :

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + S_2 \frac{dH_2}{dt}$$

$$Q_3 = k_2\, H_2^{1/2} \quad \Rightarrow \quad \frac{dH_2}{dt} = 2\,\frac{Q_3}{k_2^2}\,\frac{dQ_3}{dt}$$

$$Q_3 + Q_4 = Q_5$$

Les valeurs numériques adoptées sont :

$S_2 = 250\ m^2$,

$k_2 = 1{,}5\ m^{5/2}\ s^{-1}$ (soit un débit de 5 m^3/s pour une remontée de 11 m).

Ces valeurs sont compatibles avec le volume d'eau stockée, estimé dans le chapitre précédent. Mais, la mise en charge et la conductance ne sont pas connues réellement.

c) La galerie intermédiaire entre le siphon de la salle à Manger et la cascade Édouard.

On appelle Q_5 (= $Q_3 + Q_4$) le débit qui arrive à la salle à Manger.
Q_6 est le débit qui arrive sous la salle Saint Bruno.

On se contente de supposer l'écoulement à surface libre. On dira que le volume stocké est proportionnel à la hauteur de l'eau, qui est proportionnelle au débit à la puissance 2/3. On adoptera comme surface horizontale de l'eau la valeur S = 2x 200 = 400 m^2. La relation entre la hauteur et le débit s'écrit : $Q = k_3 H^{3/2}$.

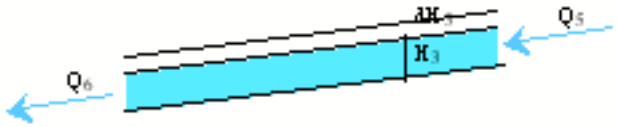


Fig. 3-4- La galerie entre salle à Manger et salle Saint Bruno

On pourrait prendre en compte numériquement le temps de propagation le long de la galerie (quelques minutes) en écrivant que le débit Q_6 fourni par la deuxième équation est celui pour la valeur du temps situé quelques minutes dans le futur. On calcule ce délai temporel par la vitesse de propagation :

$$\Delta t = \frac{L}{V} = \frac{L}{\sqrt{g\,H_3}} = \frac{L}{\sqrt{g}}\left(\frac{k_3}{Q_5}\right)^{1/3} = 70\left(\frac{k_3}{Q_5}\right)^{1/3}$$

On obtient les relations :

$$Q_5 = k_3\, H_3^{3/2}$$

$$Q_5 - Q_6 = S_3\,\frac{dH_3}{dt}$$

$$\text{ou encore} \quad Q(t+\Delta t)_6 = Q(t)_5 - S_3\,\frac{dH(t)_3}{dt}$$

$$\text{avec} \quad \frac{dH_3}{dt} = \frac{2}{3}\,\frac{1}{k_3^{2/3}\,Q_5^{1/3}}\,\frac{dQ_5}{dt}$$

On adoptera les valeurs numériques :

L = 200 m
S_3 = 2000 m^2,
k_3 = 3 $m^{3/2}\,s^{-1}$ (soit une hauteur de 1 m pour un débit de 3 m^3/s).

Le volume mobilisé est de 2000 m^3 pour une crue de 3 m^3/s.

d) Modèle des Enfers

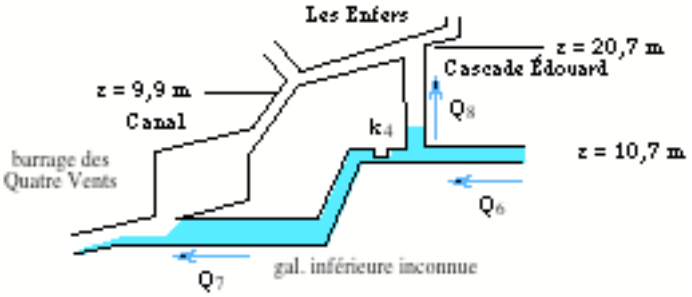


Fig. 3-5- Schématisation des Enfers

On appelle :
Q_6, le débit qui arrive sous la salle du Styx,

Q_7, le débit passant sous les Enfers,
Q_8, le débit dans la galerie des Enfers.

Le secteur des Enfers est simplement représenté par un trop-plein (provenant de la cascade Édouard) qui remplit plus ou moins la galerie. On appelle H_4 la remontée de l'eau au niveau de la cascade Édouard. On a besoin du resserrement équivalent dans la galerie inconnue. On supposera la valeur de la conductance $k_4 = Q/\Delta H^{1/2}$. On se servira aussi de la caractéristique (hauteur-débit) de la galerie des Enfers au niveau de l'emplacement du Luirographe, caractéristique sous forme de deux droites, trouvées au chapitre précédent (pente k_5 et k'_5).

On obtient les relations :

$$Q_6 = Q_7 + Q_8$$

$$Q_7 = k_4 \, H_4^{1/2}$$

$$H_5 = \frac{Q_6}{k_5} \quad \text{pour } Q_6 < 1{,}8 \ \text{m}^3/\text{s}$$

$$H_5 = \frac{Q_6 - 1{,}7}{k'_5} \quad \text{pour } Q_6 > 1{,}8 \ \text{m}^3/\text{s}$$

On adoptera les valeurs numériques :

$k_4 = 0{,}15 \ m^{5/2} \ s^{-1}$ (soit un débit de 0,47 m^3/s pour une montée de 10 m).
$k_5 = 3 \ m^2 \ s^{-1}$ (soit une hauteur de 0,5 m pour un débit de 1,5 m^3/s).
$k'_5 = 0{,}167 \ m^2 \ s^{-1}$ (soit une hauteur de 6 m pour un débit de 2,6 m^3/s).

Le calage des différents coefficients. Nous avons estimé les différents coefficients par les mesures à l'aide des Luirographes. Le principe est d'estimer les débits pour une hauteur donnée de la mise en charge. Cela n'a pas été très facile car nous manquons de valeur des débits en crue. Cette étude a été faite dans le chapitre sur les corrélations entre hauteurs et débits.

Un examen rapide de la modélisation physique montre les points faibles de cette modélisation. Le débit de déversement à la galerie Ouest reste à déterminer directement à l'aide de la hauteur au-dessus du déversoir. On n'a pas pu le faire à cause du manque de précision du Luirographe (glissement). Cette donnée permettrait de remonter correctement au débit amont du gouffre Berger à partir de la hauteur d'eau au siphon (via une hypothèse sur la surface horizontale). La répartition altitudinale de la surface du réservoir associé pourrait se faire par une étude des débits reconstitués provenant du Berger au cours de plusieurs crues. On essayerait alors de diminuer les irrégularités de la courbe de débit en augmentant celles de la fonction surface.

Enfin, les deux relations entre, d'une part, Q_3 et H_2, et d'autre part, Q_7 et H_4 sont hypothétiques et mériteraient des études complémentaires.

Ce sont ces approximations qui conditionnent la précision du modèle mathématique. Lui, peut-être aussi précis numériquement que l'on veut.

2- La modélisation numérique

Nous construisons le modèle mathématique numérique en langage Visual Basic sur le logiciel Excel de Microsoft.

Les différentes inconnues sont : $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_8, H_1, H_2, H_3, H_4$.
La variable dépendant du temps (débit venant du gouffre Berger) Q_0 , est supposée connue au cours du temps. On se donne une configuration initiale plausible pour éviter des discontinuités numériques. Cette configuration est un étiage. Il n'y a aucun débordement. Les valeurs initiales sont :

$$Q_0 = Q_1 = Q_3 = Q_5 = Q_6 = Q_7 = 0{,}2 \ m^3/s$$

$$Q_2 = Q_4 = Q_8 = 0$$

$$H_1 = 37\,(Q_1 - 0{,}5) \qquad H_2 = \left(\frac{Q_3}{k_2}\right)^2 \qquad H_3 = \left(\frac{Q_5}{k_3}\right)^{2/3} \qquad H_4 = \left(\frac{Q_7}{k_4}\right)^2 \qquad H_5 = 0$$

Ensuite, on commence les itérations temporelles en faisant varier Q_0 . On démarre la simulation d'une crue. Connaissant partout les valeurs à l'instant t, on en déduit les valeurs à l'instant $t + \Delta t$, que l'on notera avec un ' . Nous modifions les relations écrites lors de la modélisation pour les adapter à la programmation en Basic. En particulier, on utilise la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4, très stable, pour les équations de montée en charge (1er et 2e nœud).

Pour le premier nœud :

On pose $\quad Q_{1max} = 0{,}027\ H_{1max} + 0{,}5$

Pour traduire la relation : $\dfrac{dH_1}{dt} = \dfrac{1}{S_1}(Q_0 - Q_1 - Q_2)$ on décompose en quatre lignes :

$$H_{1\text{-}1} = H_1 + \frac{\Delta t}{2\,S_1}(Q_0 - 0{,}027\ H_1 - 0{,}5)$$

$$H_{1\text{-}2} = H_1 + \frac{\Delta t}{2\,S_1}\left(\frac{Q'_0 + Q_0}{2} - 0{,}027\ H_{1\text{-}1} - 0{,}5\right)$$

$$H_{1\text{-}3} = H_1 + \frac{\Delta t}{S_1}\left(\frac{Q'_0 + Q_0}{2} - 0{,}027\ H_{1\text{-}2} - 0{,}5\right)$$

Les grandeurs $H_{1\text{-}1}, H_{1\text{-}2}, H_{1\text{-}3}$, $H_{1\text{-}4}$,$Q_{1\text{-}1}$ sont des grandeurs auxiliaires pour la méthode de Runge-Kutta.

$$H_{1\text{-}4} = H_1 + \frac{\Delta t}{6\,S_1}\left(Q_0 - 0{,}027\ H_1 - 0{,}5 + 2\left(\frac{Q'_0+Q_0}{2} - 0{,}027\ H_{1\text{-}1} - 0{,}5\right) + 2\left(\frac{Q'_0+Q_0}{2} - 0{,}027\ H_{1\text{-}2} - 0{,}5\right) + (Q'_0 - 0{,}027\ H_{1\text{-}3} - 0{,}5)\right)$$

$$H_{1\text{-}4} = H_1 + \frac{\Delta t}{6\,S_1}(3\,Q_0 + 3\,Q'_0 - 3{,}0 - 0{,}027\ (H_1 + 2\,H_{1\text{-}1} + 2\,H_{1\text{-}2} + H_{1\text{-}3}))$$

$$Q_{1\text{-}1} = 0{,}027\ H_{1\text{-}4} + 0{,}5$$

$$\text{si} \quad Q_{1\text{-}1} < Q_{1max} \quad \text{alors} \quad H'_1 = H_{1\text{-}4} \ ; \ Q'_1 = Q_{1\text{-}1} \quad \text{et} \quad Q'_2 = 0$$

$$\text{si} \quad Q_{1\text{-}1} \geq Q_{1max} \quad \text{alors} \quad H'_1 = H_{1max} \quad ; Q'_1 = Q_{1max} \quad \text{et} \quad Q'_2 = Q'_0 - Q_{1max}$$

Pour le deuxième nœud, on utilise de nouveau la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 (5 lignes) :

$$H_{2\text{-}1} = H_2 + \frac{\Delta t}{2\,S_2}\left(Q_1 + Q_2 - k_2\sqrt{H_2}\right)$$

$$\text{On pose} \quad Q_p = \frac{Q'_1 + Q_1 + Q'_2 + Q_2}{2}$$

$$H_{2\text{-}2} = H_2 + \frac{\Delta t}{2\,S_2}\left(Q_p - k_2\sqrt{H_{2\text{-}1}}\right)$$

$$H_{2\text{-}3} = H_2 + \frac{\Delta t}{S_2}\left(Q_p - k_2\sqrt{H_{2\text{-}2}}\right)$$

$$H_{2\text{-}4} = H_2 + \frac{\Delta t}{6\,S_2}\left(Q_1 + Q_2 - k_2\sqrt{H_2} + 2\left(Q_p - k_2\sqrt{H_{2\text{-}1}}\right) + 2\left(Q_p - k_2\sqrt{H_{2\text{-}2}}\right) + \left(Q'_1 + Q'_2 - k_2\sqrt{H_{2\text{-}3}}\right)\right)$$

$$Q_{3\text{-}1} = k_2\,H_{2\text{-}4}^{1/2}$$

$$\text{Si} \quad Q_{3\text{-}1} < Q_{3max} \quad \text{alors} \quad H'_2 = H_{2\text{-}4} \quad ; \quad Q'_3 = Q_{3\text{-}1} \quad \text{et} \quad Q'_4 = 0$$

$$\text{Si} \quad Q_{3\text{-}1} \geq Q_{3max} \quad \text{alors} \quad H'_2 = H_{2max} \quad ; \quad Q'_3 = Q_{3max} \quad \text{et} \quad Q'_4 = Q'_1 + Q'_2 - Q_{3max}$$

$$Q'_5 = Q'_3 + Q'_4$$

On peut tenir compte du temps de propagation en rajoutant un délai égal à celui mesuré par le Luirographe (Délai1 = 200 s). On pourrait faire dépendre ce délai des grandeurs physiques.

Pour le parcours à surface libre :

$$H'_3 = \left(\frac{Q'_5}{k_3}\right)^{2/3}$$

$$Q'_6 = Q'_5 - S_3\,\frac{H'_3 - H_3}{\Delta t}$$

On peut introduire un deuxième décalage temporel pour Q_6 (par exemple Délai2 = 300 s).

Pour le troisième nœud (il faut bien sûr rajouter les deux délais vus plus haut) :

$$\text{Si} \quad Q'_6 < k_4\,H_{4max}^{1/2} \quad \text{alors} \quad Q'_7 = Q'_6 \quad ; \quad Q'_8 = 0 \quad \text{et} \quad H'_4 = \left(\frac{Q'_7}{k_4}\right)^2$$

$$\text{Si} \quad Q'_6 \geq k_4\,H_{4max}^{1/2} \quad \text{alors} \quad Q'_7 = k_4\,H_{4max}^{1/2} \quad ; \quad Q'_8 = Q'_6 - Q'_7 \quad \text{et} \quad H'_4 = H_{4max}$$

$$H_5 = \frac{Q_6}{k_5} \quad \text{pour } Q_6 < 1{,}8 \text{ m}^3/\text{s} \qquad H_5 = \frac{Q_6 - 1{,}7}{k'_5} \quad \text{pour } Q_6 > 1{,}8 \text{ m}^3/\text{s}$$

L'itération temporelle consiste à repartir du siphon amont avec la nouvelle valeur du débit, et conduit à un balayage du même type. Le calcul progresse de lui-même et s'arrête au bout du

temps modélisé choisi. On sort les résultats : débits et hauteurs au cours du temps sous forme de colonne de valeurs dans un tableau Excel qui sert de vitrine d'affichage.
Le listing du programme en Visual Basic de Microsoft est donné en annexe.

3- Exploitation du modèle mathématique

Le code de calcul sur Visual Basic de Microsoft est rapide. Il faut une quinzaine de secondes seulement pour calculer un épisode complet de crue. Nous avons limité la durée réelle du phénomène simulé à 9000 secondes soit 2,5 heures. Si l'on veut simuler des scénarios plus longs, il faut augmenter la taille mémoire des différentes grandeurs. Il ne nous a pas paru opportun de le faire puisque le but de ce modèle est l'étude des montées de débits. Ce sont en effet les effets transitoires qui génèrent les vagues de crue (le débordement du déversoir de la galerie Ouest).

On peut à partir du tableau Excel soit tracer directement quelques courbes, soit exporter dans un grapheur les valeurs numériques pour les visualiser.

3-1- Forme d'une crue

Nous avons adopté des crues de formes variées (en sinus, en courbe de Gauss ou autres). Ces crues idéales sont bien sûr assez différentes des crues observées, mais elles ont l'avantage d'être facile à entrer dans le calcul.

Le Cemagref de Grenoble a fait des études sur la forme d'un hydrogramme unitaire de torrent de surface de petits bassins versants (comme celui des Cuves). On rappelle qu'un hydrogramme unitaire est la relation entre le débit et le temps pour une arrivée d'eau de pluie instantanée. Il propose la relation suivante qui constitue une sorte de forme standard de crue :

$$\frac{q}{q_{max}} = 2\,\frac{(t/D)^4}{1 + (t/D)^8}$$

Cette crue unitaire est donc caractérisée par deux paramètres : le débit maximal et le temps de montée D de la crue. Si les pluies ne sont pas ponctuelles dans le temps mais s'étirent, la crue s'étend elle aussi dans le temps.

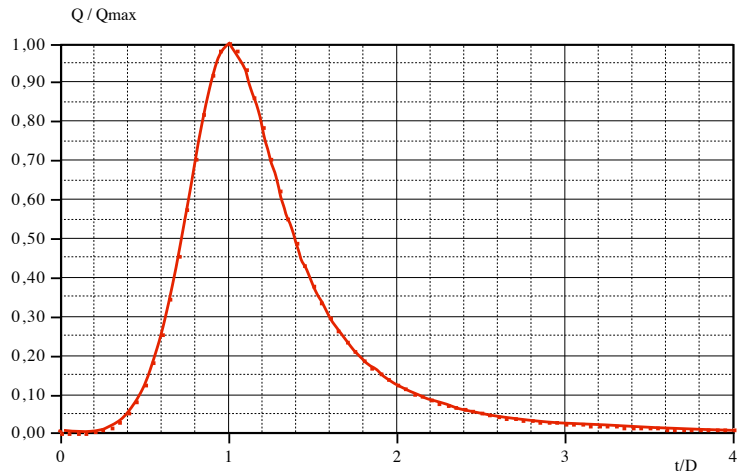


Fig. 3-6- Profil de l'hydrogramme unitaire en Dauphiné (Cemagref)

Expérimentalement, il doit exister une relation entre ces deux paramètres. Cette relation dépend du cheminement de l'eau. Les observations des torrents de surface conduisent à la relation :

$$q_{max} \approx \frac{A}{D} \quad \text{(avec } q_{max} \text{ en m}^3\text{/s et D en s)}$$

Le volume d'eau (en m^3) pour la pluie unitaire est V = 17 D. q_{max} (avec D en s et q_{max} en m^3/s). Soit, en utilisant la relation entre ces deux paramètres : V = 17 A. On voit qu'il suffit d'adopter pour A la valeur 1/17 pour obtenir le débit correspondant à une chute instantanée de 1 m^3 d'eau sur le bassin versant.

$$q = \frac{1}{17\,D} \frac{(t/D)^4}{1 + (t/D)^8} \quad \text{(avec D en s et q en m}^3\text{/s)}$$

Le volume total d'eau tombée est la surface sous l'hydrogramme unitaire.

Les crues mesurées aux Cuves peuvent être très rapides. Celle du 11 août a un temps de montée Δt = 4 h. L'intervalle entre les deux maxima est de 3 h 30 mn. Celle du 20 août a été très rapide : Δt = 0,5 h. On voit donc qu'il faudrait adopter une valeur de D de l'ordre de 30 mn ou moins.

Ces crues très rapides et brèves sont fortement retardées et atténuées par les réservoirs disposées dans les Cuves, réservoirs que nous avons estimés à $V_1 + V_2 + V_3$ = 5000 + 3000 + 2000 = 10 000 m^3 pour une crue analogue à celle du 20 août 2004. En effet pour un débit maxi de 3 m^3/s, cela représente un retard de 55 mn. Ces retards sont à la base de la sécurisation.

3-2- Différentes crues observées et simulées

Une autre exploitation du modèle consiste à retrouver les différentes crues qui ont été observées. L'absence de connaissance de la répartition temporelle du débit de sortie du gouffre Berger représente un handicap. En effet, c'est ce paramètre qui est utilisé dans ce modèle.

Pour remonter au débit Q_0 à partir de la chronique des hauteurs H_1, on écrit la relation :

$$Q_0 = k_1\, H_1 + Q_{00} + k'_1\,(H_1 - H_{1D}) + S_1 \frac{dH_1}{dt}$$

avec k_1 = 0,027 m^2/s ; Q_{00} = 0,5 m^3/s ; k'_1 = 0,57 m^2/s ; H_{1D} = 15,7 m et S_1 = 250 m^2.

Une fois déterminée la chronique des débits d'entrée, on exécute le programme comme pour les autres simulations.

Les mesures prises pendant la crue du 20 août 2004, nous permettent de reconstituer le débit provenant du gouffre Berger (fig. 14).

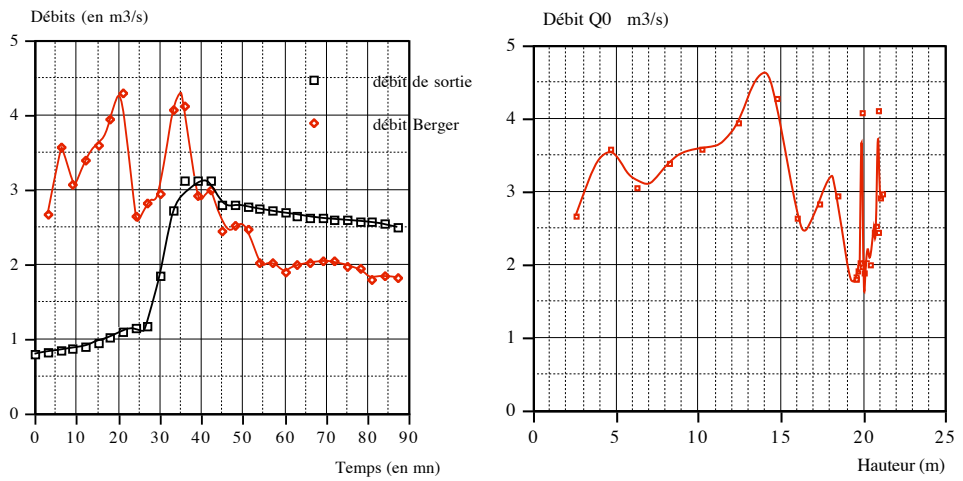


Fig. 3-7- Reconstitution du débit venant du Berger (20 août 2004)
à partir de la hauteur d'eau au siphon 2

On voit sur la figure que cette hypothèse de la constance de la surface horizontale de la surface libre n'est pas très valable. Cela explique les fluctuations apparentes rapides du débit du Berger qui risquent n'être que des artefacts. Il vaudrait mieux considérer que c'est la surface qui dépend fortement de la hauteur. Mais ce n'est pas trop gênant pour la simulation, au moins pendant la montée de l'eau.

Ayant déterminé le débit venant du Berger, on saisit le fichier des valeurs des débits du Berger dans le logiciel et on le fait tourner.

On aurait pu imaginer adopter comme paramètre menant du modèle mathématique la hauteur d'eau au 2e siphon, puisqu'il s'agit de la grandeur mesurée. Mais en adoptant ce paramètre, on s'interdisait d'utiliser le volume stockable du côté du gouffre Berger, volume qui est le plus important de tous.

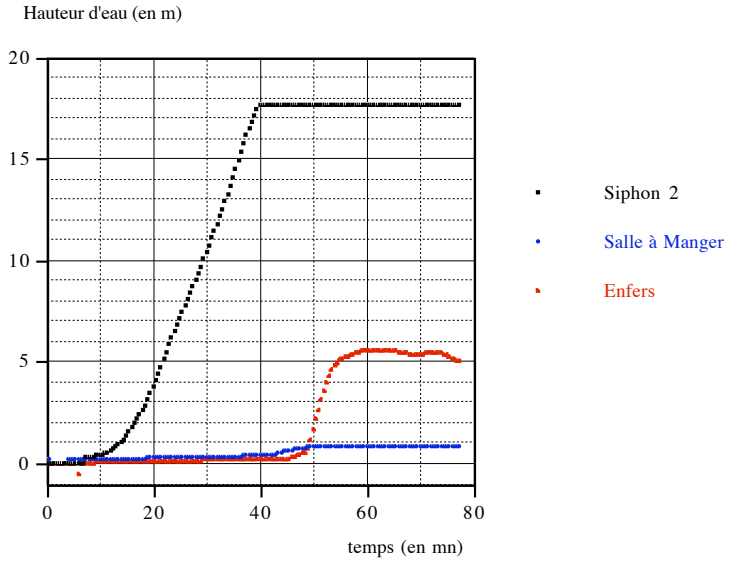


Fig. 3-8- Exemple de test de simulation
pour des conditions analogues à celles du 20 août 2004.

Les résultats de la simulation sont plausibles. On voit nettement la vague de crue progresser vers l'aval. On retrouve à peu près les différents délais observés par les Luirographes.

On peut tester le modèle aussi pour la crue du 11 août 2004. Cela nous permettra d'examiner la constance de S_1.

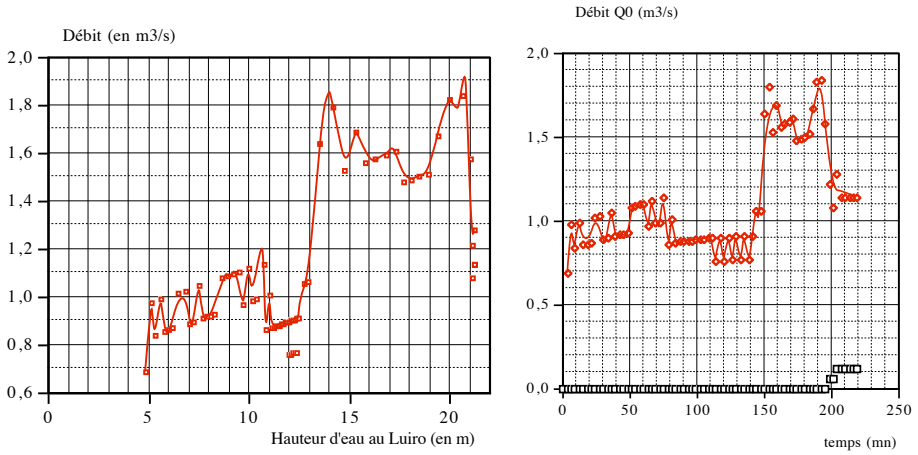


Fig. 3-9- Le débit Q_0 pour la crue du 11 août 2004

IL faudrait un certain nombre de crues pour reconstituer proprement la courbe : surface horizontale S_1 en fonction de l'altitude.

Bien entendu, il faudrait utiliser cet outil sur des crues qui n'auraient pas servi au calage du modèle, pour vérifier sa validité dans des conditions variées. C'est un gros travail que nous n'avons pas entrepris car les mesures aux Luirographes sont trop peu nombreuses et entachées par des dérives bien gênantes.

3-3- Quelques essais de simulations plus ou moins catastrophiques

On peut utiliser ce logiciel pour étudier les effets de crues différentes. Par exemple, des crues dont l'ampleur a une fréquence plus rare que les crues observées. Mais il faut prendre garde de ne pas prendre des paramètres d'entrée extravagants. Le code n'est pas conçu pour les très grandes crues pour la raison que le chemin de l'eau n'est pas entièrement connu pour ces crues. À partir de quel débit total, un torrent parcourt-il la salle Saint Bruno ? On voit par là que l'absence d'observation pour les crues exceptionnelles rend non valide, dans de telles circonstances, le modèle mathématique.

Il ne faut pas prendre des débits de pointe improbables. En revanche, on doit jouer sur les vitesses de montée de la crue. On sait que le torrent du gouffre Berger (la rivière sans Étoile) se met en crue plus lentement que l'affluent Moins Mille (composée de la rivière Moins Mille et de la rivière Écumante). L'arrivée de la crue au siphon terminal correspond à la succession dans le temps de plusieurs arrivées. On peut imaginer que des concours de circonstance fassent que l'arrivée de la crue venant de la rivière sans Étoile coïncide avec l'arrivée de la crue venant des autres torrents (pluie torrentielle qui débute à la cuvette de la Sure, puis se poursuit sur la cuvette du gouffre Berger pour enfin se terminer sur les Clapiers de Sornin).

Nous n'avons pas cherché à exploiter plus avant cet outil de modélisation car nous préférons l'améliorer avant.

Conclusions

L'observation des écoulements de l'eau au cours des crues associée à des mesures continues de hauteur d'eau nous a permis de construire un premier modèle mathématique de la progression des hauteurs d'eau aux différents endroits des Cuves de Sassenage.

Ce modèle n'est pas encore suffisamment détaillé pour permettre de prévoir finement la vitesse de progression des vagues de crues qui sont générées par le débordement du déversoir au sommet de la galerie Ouest.

Mais il constitue un outil supplémentaire qui, à terme, devra permettre d'affiner le protocole pour la sécurisation du circuit touristique de la grotte.

_____

Chapitre 4

Hydrologie du gouffre Berger et sécurisation du circuit touristique

La sécurisation du circuit touristique, au sens où on l'entend dans ce rapport, porte seulement sur la possibilité de connaître un peu à l'avance l'arrivée d'une crue pour éviter aux touristes de subir l'inconvénient de se mouiller les pieds au cours de leur visite, voire d'être bloqués côté salle Saint Bruno pendant un certain temps.

Elle repose sur une prévision et une estimation des vitesses de montée des crues possibles, sur la réalisation d'une installation matérielle et sur un protocole se traduisant par des règles simples à respecter.

Nous allons donc examiner dans un premier temps les différentes sortes de crue, c'est-à-dire plus précisément, les différentes possibilités d'augmentation de débit en fonction de leur rareté. C'est de l'hydrologie classique mais avec la difficulté que les évènements rares obéissent rarement dans la nature aux lois mathématiques du hasard.

Ensuite, nous aborderons succinctement la question de l'équipement matériel qui servira au déclenchement des alertes.

Enfin, nous proposerons un protocole à respecter, en fonction d'un niveau de sécurité qui sera jugé acceptable par la commission de sécurité.

1- Estimation des différentes crues arrivant au bas du gouffre Berger

Nous allons faire ici une courte étude hydrologique sur le Germe. C'est-à-dire que nous allons examiner les rapports entre les phénomènes de fortes pluies et les débits qu'on peut en attendre dans les Cuves.

1-1- Les bassins versants

Le bassin versant total des Cuves est d'à peu près 12 km^2. Le bassin versant côté Sornin est à peu près 10 km^2. C'est celui qui nous intéresse pour les phénomènes de vagues de crue. Grosso modo, on peut dire que le gouffre Berger est alimenté par un bassin versant s'étendant de la pointe de la Robertière au sud (affleurement urgonien seulement) et s'évasant progressivement vers le nord par les Clapiers, la cuvette de Sornin et celle de la Sure. Le bassin versant concerne d'abord des affleurements urgoniens, mais une partie des revêtements Sénoniens qui surmontent le précédent doivent aussi être drainés par le Germe.

Pendant les grands épisodes pluvieux, il est très probable que le bassin versant diminue car des ruisseaux de surface se mettent à couler, ramenant l'eau directement au Furon et privant le Germe d'une partie de son alimentation.

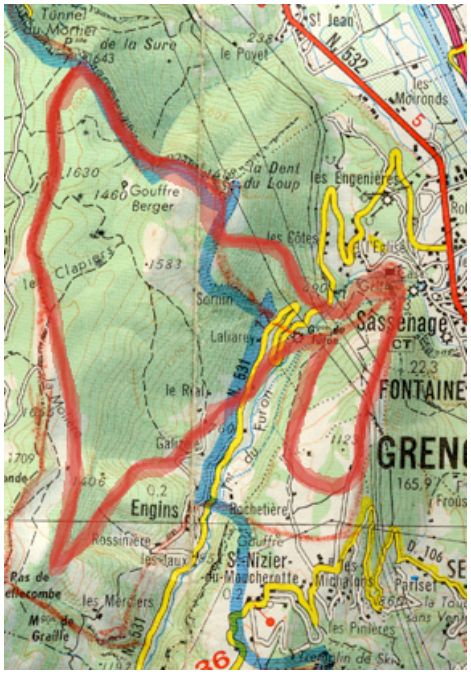


Fig. 4-1- Le bassin-versant des Cuves de Sassenage

Deux sous-bassins indépendants. On a vu que l'alimentation en eau du 2e siphon de la galerie Ouest aux Cuves était due à l'eau arrivant dans le premier siphon (dit de –1122) au gouffre Berger. Ce siphon est alimenté par deux cours d'eau souterrains principaux : d'une part, l'affluent –1000 et, d'autre part, la rivière Sans Étoiles. Le premier est lui même décomposé en deux affluents principaux, la Rivière –1000 qui a été jonctionnée au réseau de la Fromagère, et la Rivière Écumante qui provient de la zone dite des « Clapiers » de Sornin et dans laquelle aucun gouffre important n'a encore été découvert par les spéléos.

Le débit est donc scindé en deux sous débits, à peu près égaux.

Un épisode pluvieux, affectant en même temps les deux bassins versants, ne se traduit pas par une arrivée synchrone de la crue au niveau du siphon du gouffre Berger. D'après les observations des spéléos, l'affluent Moins Mille précèderait la rivière sans Étoiles de 2 à 4 heures suivant la violence de la crue.

On voit donc que deux orages, l'un éclatant d'abord sur les cuvettes de Sornin et la Sure, l'autre éclatant 2 à 4 heures plus tard sur les Clapiers pourraient arriver en même temps au siphon. Cela correspondrait à la configuration temporelle la plus dangereuse. En général en été, c'est la configuration opposée qui est la plus fréquente.

1-2- Les débits

Débits d'étiage. Le débit d'étiage du Germe est de 80 l/s et 70 l/s pour les grands étiages. Les études d'André Bourgin ont montré dans le Vercors un débit d'étiage de 7 l/s et par kilomètre carré. Cette valeur s'accorde au bassin versant supposé.

Débits moyens. Le débit moyen du Germe est d'un peu plus de 500 l/s, correspondant à un peu moins de 50 l/s et par km^2 de bassin versant. Ce qui est une valeur régionale admise.

On calcule les grandes crues d'après les plus grandes précipitations observées. Il faut distinguer suivant le laps de temps. Par exemple, une averse de 20 mm en une heure est possible mais pas 480 mm en 24 heures, du moins dans le Vercors.

Nous n'avons pas d'observations de pluviométrie pour Sornin.

Estimation des débits à l'entrée des siphons de la galerie Ouest

La configuration des torrents du gouffre Berger ressemble assez bien à celles qu'on peut rencontrer en surface. En particulier, les zones d'accumulation de l'eau ne sont pas très importantes. Il est donc naturel de penser que le comportement du gouffre Berger ou du gouffre de la Fromagère ressemblera à celui d'un torrent de surface. C'est pour cette raison que nous allons utiliser des résultats obtenus sur des circulations de surface pour l'écoulement dans les parties supérieures du réseau.

Pluie décennale. Pour la détermination de la pluie de rareté décennale, le Cemagref (Grenoble) propose une corrélation valable pour le Dauphiné entre la pluie journalière de fréquence décennale P (en mm) et la hauteur de pluie annuelle moyenne P_a (en mm) :

$$P = \frac{P_a}{16} + 15 = \frac{1400}{16} + 15 = 102 \text{ mm}$$

Si on prend comme moyenne annuelle une lame de 1400 mm, on obtient une pluie journalière de rareté décennale de 102 mm. Cette valeur semble correcte pour un bassin versant comme le nôtre.

Débit instantané maximum. Pour le calcul du débit de fréquence décennale d'un torrent de bassin versant connu, Lager (1984) propose la relation :

$$Q_{10} = 5{,}5.\ 10^{-3}\ (Q_A\ S)^{0,4}\ P_{j10}^{3/2}$$

Dans cette relation Q_{10} est le débit maximum de rareté décennale (en m^3/s), S est la superficie du bassin versant en km^2, P_{j10} est la valeur de la pluie journalière de rareté décennale (en mm), Q_A est le débit moyen (en m^3/s). On en déduit :

$$Q_{10} = 5{,}5.\ 10^{-3}\ (5)^{0,4}\ 102^{3/2} = 10{,}8\ m^3/s$$

Une autre relation peut être utilisée. C'est la méthode Crupédix du Cemagref (1980) pour calculer le débit instantané décennal :

$$Q_{10} = S^{0,9} \left(\frac{P}{83}\right)^2 = 10^{0,9} \left(\frac{102}{83}\right)^2 = 6{,}3\ .\ 1{,}51 = 12\ \ m^3/s$$

Ces débits sont compatibles avec les estimations faites par la DDAF (rapport de Gautier-Durrafour) pour les plus grandes crues du Germe.

Retenons la valeur de 12 m^3/s comme limite pratique du débit à l'entrée du siphon du Berger.

Pluies continues. Considérons une pluie continue sur une journée complète, par exemple de 5 mm de hauteur d'eau par heure, et regardons quelle sera la réponse au niveau du siphon du gouffre Berger. Au bout de plusieurs heures, le débit se stabilisera à la valeur 50 000 m^3 par heure, soit 14 m^3/s, valeur qui correspond à la pluie tombée, car l'évaporation devient négligeable dans ces conditions. Les torrents sur les pentes vont soustraire une partie du bassin versant, de sorte qu'on peut admettre un débit de 12 m^3/s au niveau de la galerie Ouest (valeur déjà vue plus haut). Ce débit correspond à une précipitation de 120 mm d'eau pendant une journée. Cette valeur est un peu plus forte que la pluie de rareté décennale vue plus haut (de 102 mm). Bien entendu, pour une crue comme celle-là, il n'y a pas de visite touristique aux Cuves ! Donc pas de problème.

Grosse averse instantanée. Une averse qui tombe sur un sol parfaitement sec ne pénètre pratiquement pas dans le calcaire. En effet, le sol végétal suffit pour retenir une lame d'eau de 30 ou 40 mm de hauteur. C'est seulement quand une averse tombe sur un sol saturé d'eau (après un épisode pluvieux) qu'elle peut pénétrer dans le réseau souterrain. Nous nous placerons dans ce contexte-là. Cette averse, en forme de fonction de Dirac, a été très étudiée par les hydrologues. Elle conduit à la notion d'hydrogramme unitaire qui est le débit en fonction du temps en un point du système, suite à cette impulsion.

Le Cemagref de Grenoble a fait des études sur la forme d'un hydrogramme unitaire de torrent de surface de petits bassins versants (analogues en surface à celui des Cuves). Il propose la relation suivante qui constitue une sorte de forme standart de crue pour pluie instantanée :

$$\frac{q}{q_{max}} = 2\,\frac{(t/D)^4}{1 + (t/D)^8}$$

Cette crue unitaire est donc caractérisée par deux paramètres : le débit maximal et le temps de montée D de la crue. Si les pluies ne sont pas ponctuelles dans le temps mais s'étirent, la crue s'étend elle aussi dans le temps.

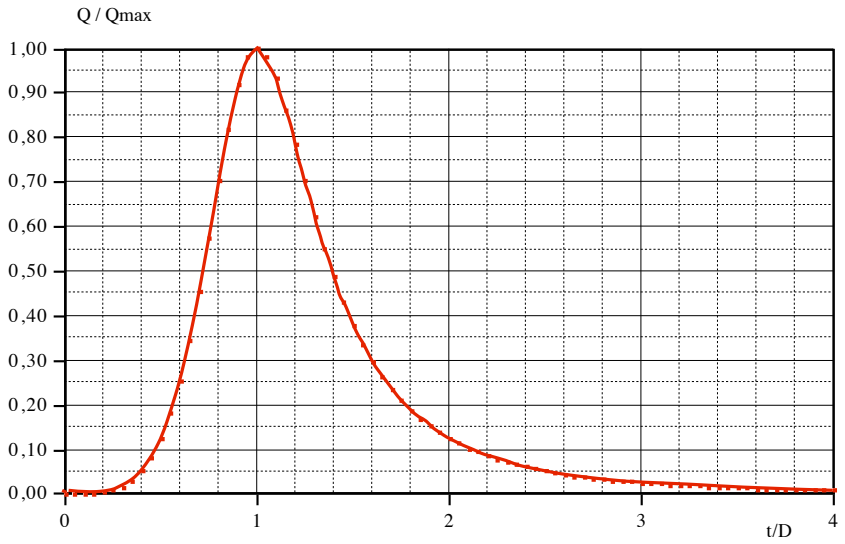


Fig. 4-2- Profil de l'hydrogramme unitaire en Dauphiné (Cemagref)

En tenant compte de la relation entre ces deux paramètres (cf. chapitre précédent), on obtient :

$$q = \frac{V_0}{17\,D}\,\frac{(t/D)^4}{1 + (t/D)^8} \qquad \text{(avec D en s et q en m}^3\text{/s)}$$

V_0 est le volume total d'eau tombé instantanément ou presque (en m^3).

On peut aussi simuler deux crues superposées séparées par un intervalle de temps.

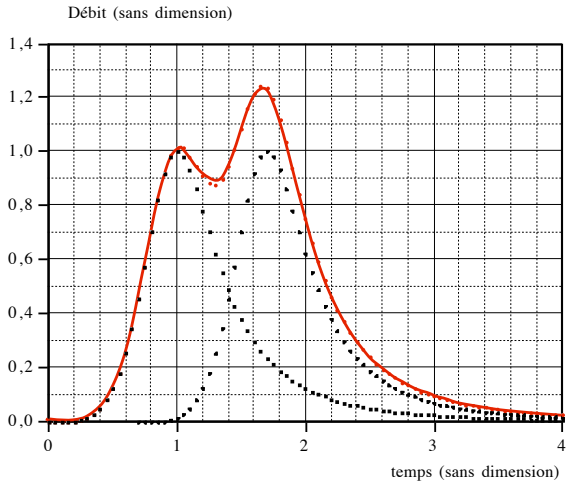


Fig. 4-3- Arrivée décalée de deux crues instantanées identiques

On voit que le déphasage entre les arrivées de l'affluent Moins Mille et de la rivière Sans Étoiles (supposé ici de 2/3 D) atténue beaucoup le maximum de la crue qui passe de 2 à 1,2 soit 40 % de diminution. Il faut garder à l'esprit qu'il s'agit ici d'hydrogrammes unitaires et pas de crues réelles.

Les crues mesurées aux Cuves peuvent être très rapides. Celle du 11 août a un temps de montée de 4 h. L'intervalle entre les deux maxima est de 3 h 30 mn. Celle du 20 août a été très rapide, le temps de montée est de 0,5 h. L'intervalle entre les deux maxima a été de 2,5 h.

La crue du 20 août a été d'une brutalité exemplaire puisque le maximum de débit est arrivé seulement 30 mn après le début de la crue. J'ai d'ailleurs ce jour là observé depuis Grenoble l'orage qui est monté du sud et a progressivement envahi et caché Sornin sous un rideau d'eau. On peut donc adopter pour D la valeur de 30 mn ou un peu moins.

Une grande averse instantanée (pendant un temps nettement plus court que D = 30 mn) ne dépasse guère 20 mm de hauteur (orage d'une violence exceptionnelle). Cela représente un volume d'eau V_0 de 200 000 m^3. L'expression du débit instantané est donc (avec x = t/D) :

$$q = 6{,}6\,\frac{x^4}{1 + x^8}$$

Le débit maximum est obtenu pour x = 1, soit $q_{max} = 3{,}3\ m^3/s$. On voit que cette averse isolée, lorsqu'elle tombe sur un sol totalement saturé, conduit à des débits analogues à celui observé le 20 août 2004.

1-3- Les délais en fonction des débits

Le délai qui sépare l'arrivée de la crue dans le siphon 4 du gouffre Berger, de la montée de l'eau aux Enfers, dépend *a priori* du débit avant l'arrivée de la crue et du débit au moment du déversement.

Discontinuité des débits à l'aval des siphons de la galerie Ouest. L'existence de la retenue au niveau des siphons de la galerie Ouest conduit à occulter, pendant un certain temps, l'augmentation du débit, de sorte que ce déversoir joue le rôle d'amplification de la vitesse d'augmentation du débit. Examinons la figure ci-dessous. Le débit qui arrive aux siphons du gouffre Berger augmente. Le réservoir associé se remplit et le débit qui sort à l'aval est plus petit (débit de fuite). À l'instant du déversement, le débit qui se met à déverser est $Q_2 - Q_1$. On voit bien que vers l'aval, il y a une discontinuité des débits qui passe en un temps négligeable de Q_1 à Q_2. C'est cette augmentation brutale qui crée la vague de crue. Une discontinuité se traduit par une vitesse infinie d'augmentation du débit. Cette vitesse infinie devient une vitesse finie au fur et à mesure que le front de crue progresse. Mais même au niveau des Enfers, l'augmentation des débits est plus rapide que celle que l'on trouverait à l'entrée du siphon au bas du gouffre Berger. Et on a bien vu dans les chapitres précédents que c'est ce déversement qui est la cause des problèmes.

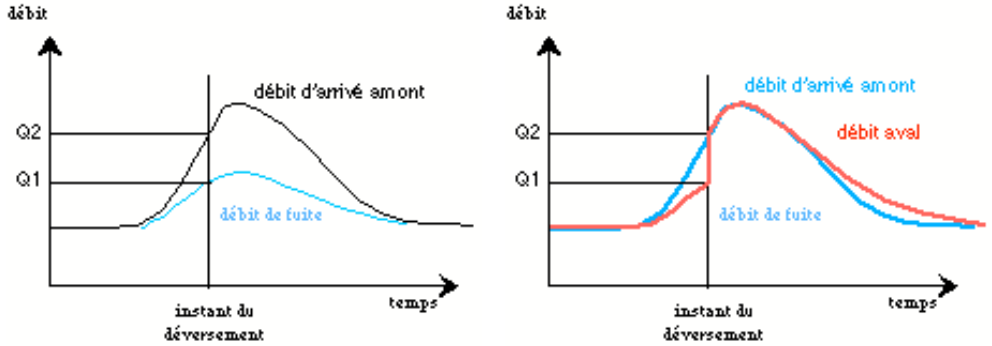


Fig. 4-4- Les débits amont et aval.
Quand on compare le débit aval du débit amont, on voit bien le rôle des réservoirs et la discontinuité $Q_2 - Q_1$ au moment du déversement.

Propagation de la vague de crue. Si on part d'un débit maximum de 3 m^3/s au moment où le déversoir se met à fonctionner, il est facile de trouver les délais pour l'arrivée aux Enfers de la vague de crue correspondante. Ces délais sont ceux qui ont été mesurés le 20 août 2004 (cf. analyse des crues).

Pour que le débit au moment du déversement soit plus grand, il faut que la pluie soit plus grande ou qu'un déphasage entre les averses sur l'ensemble du bassin versant amène une synchronisation des deux crues. On a vu que l'effet de synchronisation pouvait augmenter le débit de 40 %.

La vague de crue sera la plus forte dans le cas où le déversement est synchronisé avec le maximum de la crue. C'est le cas le plus dangereux. C'est d'ailleurs ce qui s'est produit le 20 août 2004.

Délai et effet d'échelle. Pour disposer d'un délai connu et prévisible, il faut savoir estimer l'influence du débit sur le délai. C'est un effet d'échelle. Le délai est principalement dû aux volumes d'eau stockés au passage de la vague. La hauteur d'eau dans le torrent à l'air libre est grosso modo proportionnelle au débit à la puissance 2/3 alors que la hauteur d'eau dans les conduits noyés est proportionnelle au débit au carré. Dans les trémies à l'air libre, homogène, on peut montrer que la hauteur est proportionnelle au débit. De toutes ces lois de puissance, on déduit que la hauteur d'eau doit varier comme le débit à une puissance voisine de 1. Et donc (si les surfaces restaient constantes) que le volume stocké devrait augmenter en proportion du débit. On aurait donc tendance à penser que le délai ne change pas trop si le débit augmente. Mais la complexité des dispositions géométriques ne se laisse pas enfermer facilement dans des formules aussi simples.

On a donc intérêt à chercher à extrapoler les résultats obtenus pour les petites crues.
On ne dispose en fait que de deux crues, celles du 11 août et celle du 20 août 2004. Mais ces deux crues sont exemplaires. Les temps de remplissage des réservoirs associés aux siphons de la galerie Ouest sont très différents. Mais on a déjà remarqué plus haut que les temps de propagation entre le déversoir et les Enfers étaient comparables. Examinons ce point plus précisément.

Crues	Déversoir gal. O.	Bas gal. O	Salle à Manger	Enfers
11 août 2004	0 mn	4,5 mn	9 mn	22 mn
20 août 2004	0 mn	6 mn	13 mn	24 mn

Tableau des délais entre l'instant du déversement et le passage de la vague de crue

On voit sur le tableau ci-dessus que la vague de crue a mis un peu plus de temps à arriver lors de la crue la plus importante. Il faut bien voir que ce que l'on mesure est le temps de passage du maximum de vitesse de montée de l'eau. Le début de la vague est plus difficile à percevoir.

On conclut de cet examen que le temps d'arrivée d'une crue se décompose en deux durée. La première correspond au temps de remplissage des réservoirs associés aux siphons de la galerie Ouest qu'on notera Δt_1 et le deuxième correspond à la propagation de la crue qu'on notera Δt_2.

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 \qquad \text{avec } \Delta t_1 = \frac{V}{q} \text{ et } \Delta t_2 = 20 \text{ mn}$$

Le volume V a été estimé à 5000 m^3. Pour une crue correspondant à une averse instantanée de rareté décennale, le temps de remplissage du réservoir se calcule en fonction de l'instant d'arrivée de la crue par une intégrale :

$$V = \int_0^t q\,dt = \int_0^{t/D} 6{,}6.\ 1800\ \frac{x^4}{1 + x^8}\,dx = 11880 \int_0^{t/D} \frac{x^4}{1 + x^8}\,dx$$

L'inconnue est ici t. On peut trouver la primitive de la fonction et calculer t. Mais il est plus commode de résoudre cette équation graphiquement à partir de la courbe de l'intégrale de l'hydrogramme unitaire

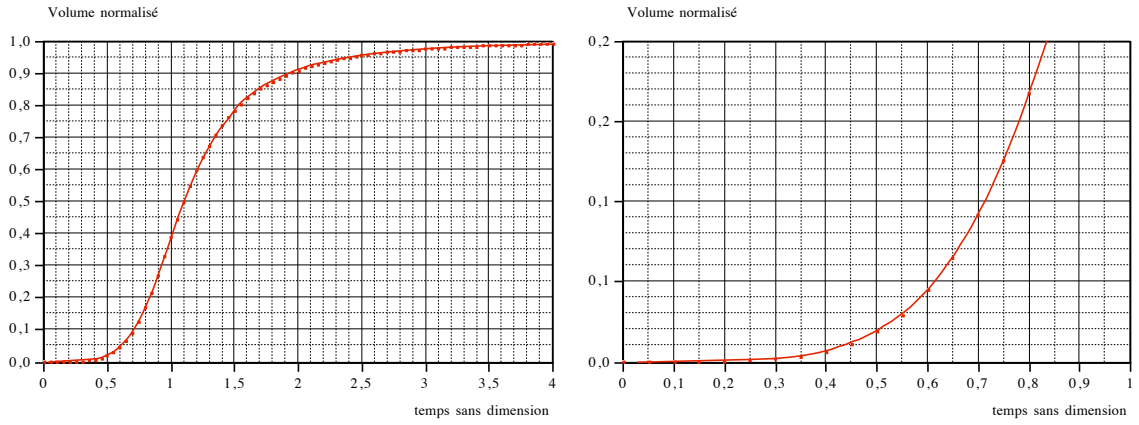


Fig. 4-5- Le volume normalisé, avec grossissement à droite

L'intégrale non normée vaut 16,9. On en déduit le temps par la valeur de l'intégrale normée.

$$V = 11880.\ 16{,}9.\ \mathrm{In}\,(x) = 5000 \quad \Rightarrow \quad \mathrm{In}(x) = \frac{5000}{11880.\ 16{,}9} = 0{,}025 \quad \Rightarrow \quad x = 0{,}46 \quad \Rightarrow \quad \Delta t_1 = 14 \text{ mn}$$

Ce temps de 14 mn correspond au temps de remplissage pour les crues décennales.
On peut donc tabler sur un temps total de 14 + 20 = 34 mn de délai pour les crues décennales.

Ce délai paraît suffisant pour l'évacuation de touristes qui seraient dans la cavité alors que l'orage aurait éclaté 4 heures plus tôt à Sornin, suite à un épisode pluvieux ayant saturé le sol.

2- L'installation matérielle

Le présent rapport ne concerne pas la réalisation matérielle du système de prévision ou d'annonce des crues. Nous nous contenterons de quelques idées générales.

Le dispositif que nous préconisons comprend un capteur installé à demeure entre les deux siphons de la galerie Ouest et relié par fil à une centrale d'acquisition installée près de l'entrée ou dans le bureau des guides (avec rappel salle Saint Bruno).

Le capteur de pression doit être installé si possible dans le siphon 2 pour profiter des plus grands délais. Il suffit de le mettre juste au-dessous de la surface libre des étiages.

Le fil de connexion doit être assez solide. Dans le siphon 1, il doit faire l'objet d'un aménagement très sérieux (fixations rapprochées, aucune ganse qui pendrait dans le siphon).

Sur le reste du parcours, le fil doit être installé discrètement pour ne pas nuire à l'esthétique de la cavité. Il doit être placé hors de portée du chemin normal de progression dans la grotte. De la qualité et du soin de l'installation dépendra la fiablité de la sécurisation.

Côté sortie, le système installé doit pouvoir résister aux grandes crues qui ennoient complètement la grotte touristique.

Un micro-ordinateur doit récupérer les données provenant du capteur. Un test doit pouvoir démontrer la non rupture de la ligne. Un code de calcul implanté dans l'ordinateur offrira une visualisation de la hauteur d'eau dans le siphon au cours des dernières heures.

Au moment où les seuils préconisés par la commission de sécurité seront atteints, une alerte doit se déclencher. Ce processus de mise en alerte (voyant lumineux et avertisseurs sonores dans la grotte touristique) doit pouvoir être testé à tout moment.

À partir de la mise en alerte du système, le code de calcul fournit, en fonction des données qu'il reçoit et en fonction des données passées, une estimation du délai d'arrivée de la crue dans les Enfers. Ce délai correspondra au dépassement de l'eau sur le sentier des touristes.

Bien entendu, ce délai n'est qu'indicatif puisqu'une augmentation soudaine du débit peut le raccourcir. Le délai est une extrapolation vers l'avenir et dépend donc de tout ce qui peut se passer entre l'instant présent et l'instant au bout du délai. Mais en prenant en compte les informations liées à la crue décennale, on peut facilement proposer des critères de sécurité fiables.

La plus grande difficulté consistera peut-être à préserver l'outil de prévision (capteur, ligne, micro) en bon état.

En cas de panne de ce système, il faudra impérativement revenir à une gestion plus stricte, par exemple, celle qui prévaut depuis l'incident.

3- Le protocole de sécurisation

Le protocole à respecter est basé sur le délai probable d'arrivée des crues. Le protocole que nous préconisons repose pour une raison de simplicité sur seulement deux grandeurs liées à la montée de la crue.

Les deux grandeurs. La première grandeur est la hauteur d'eau, H (en m), au-dessus du capteur placé dans le siphon. Elle est associée au volume restant à remplir au niveau des siphons de la galerie Ouest.

La deuxième grandeur est la vitesse de montée de l'eau, dH/dt, exprimée en m/mn. On sait que cette vitesse de montée de l'eau dépend du débit qui arrive du gouffre Berger. Cette vitesse serait proportionnelle au débit si l'aire des surfaces libres ne dépendait pas de la hauteur d'eau et si le débit de fuite était lui-aussi proportionnel à la hauteur.

L'observation de ces grandeurs conduit à deux niveaux d'alerte.

Premier niveau d'alerte. Le premier niveau est simplement l'information que la cavité se met en charge. Ce niveau d'alerte repose sur l'observation de la vitesse de montée.

$$\frac{dH}{dt} \geq V_1$$

V_1 est une valeur décidée par la commission de sécurité, par exemple V_1 = 2 cm/mn.

Ce niveau d'alerte se traduit visuellement par des voyants lumineux facilement perceptibles par le guide (par exemple de couleur orange). Ils l'informent qu'une montée des eaux se produit en amont.

Deuxième niveau d'alerte. Il correspond à l'évacuation immédiate des touristes. Ce niveau d'alerte se traduit visuellement par des voyants lumineux, par exemple de couleur rouge, et un signal acoustique. Il repose sur deux critères :

L'un porte sur la hauteur maximale admissible de l'eau au niveau du capteur du 2e siphon de la galerie Ouest : H_2 (en m). La hauteur H d'eau est prise égale à 0 pour le niveau de l'eau le 8 mai 2004 (hauteur à la règle de la salle à Manger 42 cm). H_2 représente donc la dénivellation par rapport à cette hauteur prise comme référence.

L'autre porte sur la vitesse maximale admissible de montée de l'eau au niveau du capteur : V_2 (en m/mn)

On adopte comme valeur limite H_2 du niveau au niveau du siphon 2, la valeur qui, en régime permanent, donne un niveau d'eau limite pour le sentier des touristes (avec une marge de sécurité).

Par ailleurs, l'ordinateur détermine à chaque incrément temporel (10 s par exemple), la vitesse de montée (moyennée sur une minute pour éviter les problèmes de batillage). Cette vitesse supposée constante dans le temps fournit un temps de remplissage des réservoirs. Ce modèle, pour cette vitesse de montée et la hauteur atteinte, fournit un délai d'arrivée de la crue.

La vitesse de montée V_2 qui déclenche l'évacuation sera celle qui correspond au délai fixé par la commission de sécurité.

Détermination de la hauteur maximale H_2

On se base sur les variations très lentes (pour éviter les déphasages pendant les transitoires). Il n'y a que la 7e campagne qui permet de proposer une valeur.

Quand l'eau tangente le sentier des touristes dans la galerie des Enfers mais sans qu'il y ait d'eau sur le sentier, on a les valeurs suivantes (observations du 5 mai 2004 et aussi du 2 mars 2003 et du 8 mai 2004, et décrue du 20 août 2004) :

Au barrage des Quatre Vents : H = 41 cm,
Règle de la salle à Manger : 43 cm
Luirographe de la salle à Manger : 15 cm
Siphon 2 de la galerie Ouest : 7,7 m au-dessus du niveau d'étiage (le jour de la crue du 20 août 2004, le niveau à 22 h 57 mn était de 9,77 m, on diminue de 3,6 m pour la dérive du Luiro et on ajoute 1,5 m la hauteur au-dessus de l'eau).

On voit donc qu'en régime permanent ou quasi permanent, une hauteur d'eau de 7,7 m au-dessus du niveau du 8 mai 2004 au 2e siphon de la galerie Ouest fournit un débit qui laisse encore le sentier des touristes sec.

On propose pour la sécurisation une hauteur H_2 = 5 m (au-dessus du niveau du 8 mai 2004).

Les variations de la pression atmosphérique peuvent atteindre 4% soit 4000 Pa, soit encore 0,4 m de colonne d'eau au maximum. On voit qu'en adoptant 5 m, on reste à l'abri de cette erreur.

Vitesse maximale V_2

On a vu que le délai d'arrivée de la vague de crue est donné par la somme des deux termes dont l'un dépend de la vitesse et l'autre est quasi constant :

$$\Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{H_{max} - H}{V_2} + 20 \qquad \text{(en mn si V est en m/mn)}$$

La valeur H_{max} est la hauteur au-dessus du niveau de l'eau le jours de l'installation, soit 17,70 m. Ce jour là, le 8 mai 2002, la hauteur à la salle à Manger était de 42 cm.

Pour un délai Δt (= $\Delta t_1 + \Delta t_2$) choisi par la commission de sécurité, cela conduit à la vitesse maximale V_2 :

$$V_2 = \frac{17{,}70 - H}{\Delta t - 20} \qquad \text{(H en m, V en m/mn et } \Delta t \text{ en mn)}$$

Par exemple pour Δt = 30 mn et H = 1 m, V_2 = 1,70 m/mn.
Pour Δt = 50 mn et H = 5 m, V_2 = 0,42 m/mn.

La règle choisie se traduit par le graphique ci-dessous :

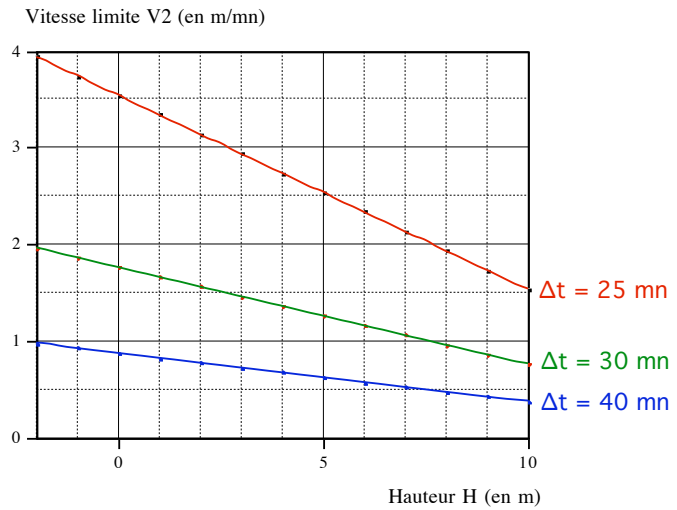


Fig. 4-6- La vitesse maximale de montée de l'eau V_2 (en m/mn)
en fonction de la hauteur d'eau H
pour différents délais, Δt, retenus par la commission

Le graphe au-dessus permet de se faire une idée de ce qu'il est possible de choisir comme délai. Un délai de 30 mn sera beaucoup moins contraignant qu'un délai de 50 mn.

Il faut prendre garde que le délai choisi correspond au temps d'arrivée de la vague de crue. C'est cette vague de crue qui est dangereuse. Mais l'eau commence à déborder le sentier des touristes, sans danger pour les touristes, mais avec les désagréments que l'on devine, avant

que l'onde de crue n'arrive aux Enfers, car l'écoulement par les conduits de fuite sous la galerie Ouest voit son débit augmenter avant que le déversoir ne déborde (augmentation de la charge). On voit donc qu'il faut tester sur des vraies crues le protocole de sécurité afin de vérifier que le désagrément de se mouiller les pieds est évité aussi aux touristes.

Le débordement sur le sentier des touristes se produit quand le Luirographe des Enfers tangente l'eau, c'est-à-dire que H = 0 cm. C'est cette valeur que nous retiendrons.

4- Test du protocole sur les crues du 11 août et du 20 août 2004

Nous allons tester le protocole adopté au-dessus pour les deux crues que nous connaissons le mieux. La première, celle du 11 août a été faible et lente, la deuxième, celle du 20 août a été assez forte et rapide.

Crue du 11 août 2004, la montée de l'eau au siphon 2 a été assez lente. Les vitesses de montée n'ont pas dépassé la valeur 0,09 m/mn. L'alarme aurait donc été déclenché par la hauteur H_2 = 5 m (soit 3,5 m au Luirographe en place). Cette hauteur a été atteinte au siphon 2 à 222,997 soit le 10 août à 23 h 56 mn. La hauteur 0 cm au Luirographe des Enfers est celle à partir de laquelle l'eau commence à envahir le sentier des touristes. Elle a été atteinte à 223,025, soit le 11 août à 0 h 36 mn. On voit que le délai réel était de 40 mn.

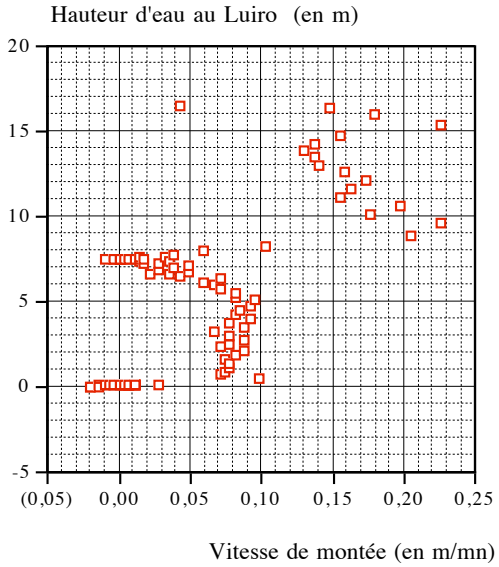


Fig. 4-7- Vitesse de montée lors de la crue du 11 août 2004

Sur le graphique ci-dessus, nous avons reporté les vitesses de montée en fonction de la hauteur d'eau. Jusqu'à 7 m, elles ont été faibles, puis ont augmenté ensuite

Crue du 20 août 2004. Nous avons représenté les vitesses de montée de l'eau au siphon 2 dans la figure ci-après. Elles se groupent en deux paquets. L'un voisin de 0,68 m/mn pour des hauteurs au Luirographe variant entre 0 et 13 m et l'autre voisin de 0,42 m/mn pour les hauteurs comprises entre 13 m et 19 m.

Si on adopte un délai Δt = 25 mn, on obtient une vitesse limite V_2 qui dépasse toujours la vitesse réelle. On en déduit que l'alarme 2 aurait été déclenché pour H = 5 m (réél) soit 3,5 m au Luirographe. Ce niveau a été atteint à l'instant 231,909 soit le 20 août à 21 h 49 mn. Du côté du Luirographe des Enfers, le niveau de l'eau 0 cm a été atteint aux Enfers le 231,938,

soit le 20 août à 22 h 30 mn. On voit que le délai réel était de 40 mn, nettement plus grand que celui demandé.

Si on adopte le délai de 40 mn, la vitesse limite V_2 aurait été de 0,6 m/mn à 5 m et de 0,8 m/mn à 1,5 m (soit 0 m au Luirographe). Il est probable que l'alarme se serait alors déclenché dès le début de la montée de l'eau, c'est-à-dire à 231,908 soit un peu plus d'une minute avant l'autre. Le délai aurait été de 41 mn, ce qui respectait tout juste le protocole de sécurité.

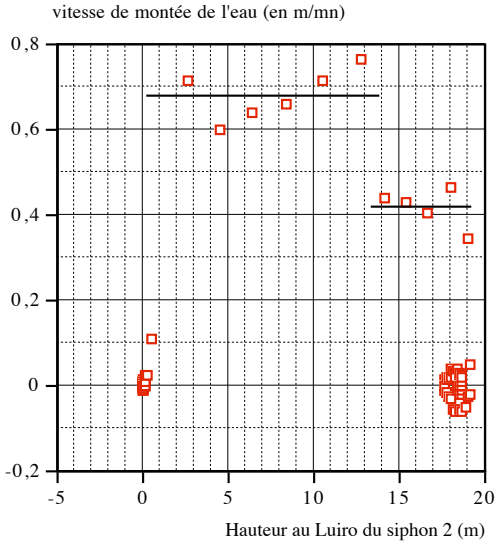


Fig. 4-8- Les vitesses de montée de l'eau au siphon 2 le 20 aout 2004-12-17
On voit nettement l'existence de deux vitesses différentes 0,68 m/mn et 0,42 m/mn

On voit donc que le protocole de sécurité qui prend en compte le délai de propagation de l'onde de crue entre les siphons de la galerie Ouest et la galerie des Enfers permet aussi de gérer le problème de la montée lente de l'eau dans les Enfers résultant de l'augmentation du débit de fuite.

Conclusions

L'étude hydraulique des Cuves de Sassenage nous a fourni les principales clés du fonctionnement en crue du réseau. Ces clés sont les courbes de tarage en différents sites des Cuves.

Les observations de terrains et les mesures aux Luirographes ont conduit au repérage de points critiques du réseau (les trois Nœuds) dont nous avons modélisé d'une manière simplifiée le comportement en crue.

Ensuite, les grandes crues de rareté décennale ont été estimées par l'étude hydrologique du bassin versant. Elles conduisent à un débit maximal de 12 m3/s. À partir de ces données et d'un délai, qui sera fixé par la commission de sécurité, nous avons pu proposer deux règles simples pour commander l'évacuation des touristes.

La première règle est une hauteur limite d'eau au 2e siphon de la galerie Ouest (H = 5 m).

La deuxième règle est une vitesse limite de montée de l'eau.

Si une ou les deux règles ne sont pas respectées, les touristes doivent être immédiatement évacués de la grotte. Le délai d'évacuation n'est pas très grand, de l'ordre d'un quart d'heure.

Le dispositif matériel associé à ces deux règles comprend un capteur de pression dans le 2e siphon de la galerie Ouest, une ligne tout le long et un terminal à l'entrée de la grotte. Un système d'alarme doit être visible en tout point du parcours touristique.

La bonne marche du capteur doit être testée à chaque visite. De même, la fiabilité du système d'alarme doit être testée chaque jour.

Une fois le dispositif matériel installé, il faudra prévoir une phase de validation qui consistera à guetter les premières crues afin de vérifier la pertinence des deux critères. Ce n'est qu'une fois la validation acquise qu'on pourra les appliquer pendant les visites touristiques.

L'exploitation des nouvelles données provenant des indications du capteur en place dans le 2e siphon conduira à affiner légèrement les règles de sécurisation, et une modification pourra alors être proposée à la commission de sécurité.

Par ailleurs, l'installation d'un Luirographe à la salle à Manger (et non au siphon de la salle à Manger) permettra de bénéficier d'une mesure directe du débit qui améliorera la connaissance des grandes crues.

Bibliographie sommaire

Nous indiquons quelques références sur les Cuves de Sassenage. Elles sont rangées par ordre chronologique. On trouvera d'autres références dans l'inventaire du Vercors (CDS Isère) ou dans l'ouvrage en préparation sur cette cavité.

Fonné J. et S. -1900- Les Cuves de Sassenage - R.A.D. - t 2 J. Fonné n° 8 : 174-187 ;S. Fonné n° 10 : 228 - 235 ; J. Fonné n° 11 : 253-260 ; J. Fonné 12 : 270-282.

Bourgin A. -1954- Circulations souterraines, les Cuves de Sassenage. Revue de G.A. - t 42 n° 3 - p. 457 à 464.

Letrône M. -1955- Plongées souterraines Bulletin du C.N.S. - n° 4, p 18-20.

Cadoux J. Lavigne J. Mathieu G. Potié L. Bourgin A. -1955- Opération - 1 000 – Arthaud, Grenoble.

Roussin D. -1969- Contribution à l'étude et à l'exploration des Cuves de Sassenage - Spelunca - n° 2 - p. 110-119.

Durrafour Cl., Gautier C -1969- Étude hydrologique du bassin du Furon - D.D.A. Isère - Inédit.

Lequatre Ch. -1969- Hydrologie karstique du Vercors - T.E.R. - I.G.A. - p.18-19-22-24-26-27-39-40-42 à 44.

Bartala -1971- Colloque sur l'hydrogéologie karstique du Vercors - Grenoble 1968 p. 69

Chouteau -1971- Colloque sur l'hydrogéologie karstique du Vercors - Grenoble 1968, p. 92

Eymas -1971- Colloque sur l'hydrogéologie karstique du Vercors - Grenoble 1968, p. 101

Fourneaux -1971- Colloque sur l'hydrogéologie karstique du Vercors - Grenoble 1968, p. 119

Lavigne J. -1971- Colloque sur l'hydrogéologie karstique du Vercors - Grenoble 1968, p. 143

Lismonde B. -1973- Les Cuves de Sassenage. Scialet 2 - Bulletin du C.D.S. Isère, p 19-34

Al-Anbar N. -1979- Infiltration et écoulement en milieu karstique. Étude statistique des données climatologiques et hydrologiques. Hydrogéologie du bassin versant du Furon - Vercors (France). Thèse de 3e cycle soutenue à l'Université scientifiqueet médicale de Grenoble, 287 p.

Lismonde B., Frachet J.-M. –1979- Grottes et scialets du Vercors. Tome 2, le Vercors Nord.,CDS Isère éditeur, p 12, 14, 26, 30, 37, 108-115, 264, 303, 304, 306, 313.

Poggia F. -1980- Plongées régionales. Scialet 9 p 36-37.

Poggia F. -1981- Info-plongée n° 30 p 9.

Poggia F. –1984- Info-plongée n° 40 p 5.

Poggia F. -1987- Plongées régionales. Scialet 16, p 72-73.

Gauchon Ch. –1990- Fréquentation et aménagements des cavités naturelles en Provece et dans les Préalpes. Mémoire de DEA Univ. Bordeaux 3 (institut de géographie et d'étaudes régionales), 139 p (Les Cuves p. 61, 63-66, 69, 73, 77-78, 80-82, 83-85, 87, 89, 91-94, 96, 100-102, 104, 106-108, 110-111, 114, 121)

Caillault S., Haffner (D.), Krattinger (T.) -1997- Spéléo dans le Vercors. Édisud, tome 1. Cuves de Sassenage p 20-27.

Delannoy J.-J. -1997- Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la transversale de Ronda (Andalousie). Les apports morphogéniques du karst. Thèse d'état en Géographie à l'IGA Grenoble. 678 p éditions du Septentrion (Lille). Cuves de Sassenage p 207-209, 265.

Annexe

Contexte et déroulement de l'étude

Dans cette annexe nous apportons une relation détaillée de l'incident du 23 mai 2003, puis nous fournissons un compte-rendu de la réunion de la commission de sécurité du 21 juin 2002 à la mairie de Sassenage avec la proposition d'étude que nous avons présentée à l'époque. Ensuite, nous donnons le texte de la convention entre la commune de Sassenage et le Comité Départemental de spéléologie de l'Isère signée fin 2002. Enfin, nous recopions les cinq rapports d'avancement envoyés au maire de Sassenage tout au long des campagnes de mesure.

1- L'incident du jeudi 23 mai 2002 aux Cuves de Sassenage

Secours aux Cuves de Sassenage (par Éric Sanson sur la liste Speleo-fr)

Une classe de 22 élèves de cinquième et 3 accompagnateurs visitent la partie touristique des Cuves de Sassenage en compagnie du guide de la grotte. Ils se font surprendre par une très brusque montée des eaux, jamais observée jusqu'alors, 1 mètre en 15 minutes, rendant périlleux l'itinéraire vers la sortie.
Le guide accompagne le groupe vers un endroit sûr et ressort prévenir les secours.
L'eau continue à monter et forme un siphon de 25 m de long dans la galerie des Enfers avec un fort courant, puis redescend rapidement en début de soirée. Les nombreux sauveteurs sur place équipent les passages avec des mains courantes, puis raccompagnent les victimes équipées de baudriers vers la sortie dès que le niveau d'eau le permet, il est 24 h.

Éric Sanson CTA Isère.

Cuves de Sassenage (commentaire de Baudouin Lismonde paru sur la liste Speleo-fr)

Voici quelques renseignements sur le sauvetage des Cuves de Sassenage du 23 mai 2002 J'ai repris la coupe de Fonné (vers 1899 !) et je l'ai légendée pour l'adapter au sauvetage. Il n'y a pas de difficulté pour arriver à la descente aux Enfers. C'est à cet endroit qu'en crue un siphon s'amorce. Le cours d'eau est le trop-plein du Germe (qui coule à l'étiage en contrebas). Ce trop-plein rejoint la galerie juste en amont du rapide de la topo. En crue, ce rapide amont est dangereux et les enfants qui l'avaient franchi n'ont pas pu le remonter (ils auraient été plus à l'aise en amont). Ils se sont donc arrêtés au sommet de la deuxième échelle, très impressionnante en crue car elle semble presque siphonner. L'eau continue à dévaler pour se perdre au pied de la descente des Enfers dans un siphon.

Les sauveteurs sont parvenus vers 16 h au bas de la deuxième échelle, mais ils n'ont pas osé la remonter (les enfants étaient juste au-dessus !). Ensuite le niveau est monté et ils n'ont pas pu s'approcher. Le bas de l'escalier de la descente aux Enfers a siphonné complètement. Vers 19 h 30, j'ai vu que le niveau descendait, les parois étaient couvertes de mousse de crue et l'éclairage pour les touristes rendait la vision des flots surréaliste. Je savais par expérience que la deuxième échelle est plus impressionnante que vraiment difficile à franchir. Aussi, nous

sommes retournés dans l'actif, une équipe du secours en montagne, Jean-Louis Rocourt et moi. Les CRS plantaient des goujons au plafond tous les 5 m pour limiter les conséquences si un spéléo était bousculé par le courant (très fort dans les rapides). Finalement, on a rejoint le bas du deuxième escalier. Le sauveteur devant était un solide gaillard tout à fait détendu. Il a planté deux goujons à la perceuse, a pu monter deux marches et a aperçu les enfants juste au-dessus. La jonction était faite. Ensuite, des vivres ont été acheminés et France Rocourt est venu vérifier le bon état de chacun des sauvés.

Autre commentaire. Lors de cette crue, l'eau a siphonné aux Enfers, mais sans monter dans l'escalier. À la sortie, la Herse coulait fort. L'accès au barrage des Quatre Vents était très difficile et on envisageait de le faire sauter en fixant une charge au bout d'un bâton. Heureusement, j'ai réussi à persuader J.-L. Rocourt et les autres de la bêtise de l'opération. Il a suffit de faire une topo à vue pour montrer qu'une modification du niveau de la salle des Trois Cascades ne pouvait pas influer sur celui de la perte des Enfers. Une remarque faite par Alain Pouteil-Noble est que la couleur du Germe le jour de la crue était très marron, comme charriant une belle quantité d'argile. Les autres crues de l'année 2002 n'ont pas renouvelé ce phénomène. L'eau du Germe, même en crue reste assez claire. D'où venait ce trouble ? Il ne semble pas que c'était lié au niveau de la crue somme toute modeste. Il a dû se produire dans les Cuves un effondrement qui a généré cette suspension.

2- Compte rendu fait par B. L. de la visite et de la réunion de la commission de sécurité

Le vendredi 21 juin 2002

Cette visite avait été demandée par les services de la Préfecture à la demande du maire de Sassenage.
Après les présentations d'usage, à 8 h 30, une colonne monte aux Cuves de Sassenage. Elle est composée du Lieutenant Colonel Kaiser des Pompiers, de Thierry Larribe de la 3SI, de Philippe de la Grimp, du Maire de Sassenage et de son conseiller municipal chargé des Cuves, de J. Biju Duval de la DDAF Isère, un représentant de la préfecture, de M. Kanapa pour la Jeunesse et les Sports, Garnier pour les grottes aménagées de Rhône Alpes, de Hervé Sérafin, guide aux Cuves, et d'autres (France et Jean-Louis Rocourt, Éric Sanson, François Landry, Baudouin Lismonde, une stagiaire qui est chargée de la valorisation des Cuves, une équipe de la télé, et d'autres (dont j'ai oublié le nom).

Pendant la visite on discute beaucoup des différentes crues qui se sont succédées aux Cuves et surtout de celle du 8 juillet 1996. D'après Sérafin, ce jour là, le niveau de l'eau est monté dans la salle Saint Bruno deux mètres en contrebas de la plateforme supérieure, terminus de la visite touristique.

La porte inférieure reste bloquée par les pierres amenées lors de la crue du 7 juin.

Certains points sont notés :
On pourrait creuser sous le deuxième escalier pour augmenter le passage de l'eau. On pourrait installer une main courante en rive droite dans le rapide juste en aval du débouché de l'eau en crue. On pourrait rajouter deux grilles pour éviter d'être aspiré par l'eau en crue au niveau de la perte des Enfers et juste en amont du refuge des gamins. On parle aussi d'agrandir la perte. Biju-Duval prend des photos et retrouve à la sortie l'emplacement exact du limnigraphe de 1968. C'est une bonne nouvelle. Il pense installer une échelle limnimétrique juste à la sortie du porche. Elle sera visible depuis la passerelle.

Redescendus en bas, les participants assistent à une réunion. Elle a lieu au deuxième étage de l'Hôtel de Ville. Elle est présidée par le Lieutenant-Colonel Kaiser. Un échange de vues a d'abord lieu où chacun amène des précisions :

Th. Larribe propose les mesures urgentes : évacuation des blocs au-dessus de l'escalier de la descente aux Enfers. Dynamitage des blocs sous le deuxième escalier. Pose de grilles (J.-L. Rocourt), stages de dynamitage de la perte des Enfers.

H. Sérafin explique quels étaient ses repères pour ouvrir ou non la visite. Il avait noté un repère à l'entrée qui indiquait le passage ou non aux Enfers. Assez souvent, la visite avait lieu avec présence d'eau sur le côté, mais jamais les touristes n'avaient à se mouiller les pieds. Il ne s'inquiétait pas trop de la météo. Il savait par ailleurs que l'eau débordant du barrage indique que les Enfers sont impraticables (même repère que la Herse).

Le Colonel demande qu'un téléphone soit installé. Garnier signale qu'il en existe qui peuvent se brancher sur la ligne électrique.

B. Lismonde et J. Biju-Duval indiquent les appareils à mettre en place et les mesures à faire pour avoir une idée du comportement hydraulique des Cuves. Ces mesures permettront peut-être de mettre au point un protocole d'alerte de crue. Mais les résultats ne pourront pas être obtenus dans l'immédiat. Il faut donc prévoir un réglement provisoire.

H. Sérafin propose de retenir la règle : pas de visite si eau aux Enfers. Mais d'autres font remarquer que la montée de l'eau n'est pas prise en compte. Il y a l'aspect niveau de l'eau et l'aspect montée possible de l'eau. Ce deuxième point est l'objet d'une assez longue discussion. Éric Sanson propose de s'en tenir à la pluie à Sassenage. Biju-Duval signale que ce n'est pas suffisant. Finalement, on pense tenir la solution par un accord avec le gîte de Sornin et un appel téléphonique pour savoir s'il a plu.

Régle provisoire adoptée :
pas d'eau aux Enfers
et pas de pluie tombée à Sornin.

Cette régle est sévère car elle empêchera la visite des Cuves une grande partie de l'automne (d'après Sérafin).

Il sera installé deux armoires de secours (avec éclairage à Led, couverture de survie, trousse à pharmacie), une au parloir des Fées, l'autre à la salle Saint Bruno. Un téléphone à la salle Saint Bruno.

Cf. le compte rendu de cette réunion avec en annexe les suggestions proposées par Lismonde.

Quelques réflexions sur le problème des crues aux Cuves de Sassenage

(texte présenté à la réunion sur la sécurité des Cuves)
Baudouin Lismonde, 12 juin 2002

À la suite de l'incident survenu le jeudi 23 mai 2002 se pose la question de la sécurisation de la grotte touristique des Cuves de Sassenage. Nous proposons ci-après quelques pistes de réflexion.

Le problème est double :

- d'une part, il faut améliorer la connaissance du fonctionnement hydrologique du réseau souterrain quant à sa réactivité à des averses données, et connaître la vitesse de progression de l'onde de crue dans la grotte des Cuves.
- d'autre part, il faut élaborer des protocoles pour que les situations potentiellement dangereuses, soient détectées et évitées.

1- Amélioration de la connaissance hydrologique des Cuves dans sa partie touristique

Le fonctionnement hydrologique de la cavité ne sera connu qu'en recoupant la topographie (celle de Fonné complétée par la topo moderne et des mesures supplémentaires), les observations visuelles, l'expérience des connaisseurs et les mesures de la hauteur d'eau dans la grotte. Comme il est hors de question d'aller dans le réseau en grande crue, ce sont des capteurs-enregistreurs qui y suppléront.

Les mesures de la DDA dans les années 70 à la sortie des Cuves ont fourni les débits moyens et les crues possibles dans le réseau. Le débit moyen est de 500 l/s, le débit d'étiage annuel est de l'ordre de 70 l/s, la plus grande crue mesurée le 24 décembre 1968 est de 15 m^3/s en débit instantané. La plus grande crue depuis quarante ans a été, semble-t-il, la crue du 8 juillet 1996, celle de l'accident au gouffre Berger, qui a emporté la porte d'entrée des Cuves.

Les données globales sont assez bien connues. En revanche, on ne connaît pas assez bien la réponse du réseau touristique à des montées plus ou moins rapides de débit. On a besoin de connaître la mise en fonctionnement des différents trop-pleins de la grotte en fonction du débit, et les vitesses de progression du front de crue.

1-1- Limnigraphe à la sortie. Une première action consisterait à demander à la DDAF (ou la Diren) si elle veut bien remettre un limnigraphe à l'entrée de la grotte, au même emplacement que celui retenu vers 1968. La courbe d'étalonnage dressée en 1970 est peut-être encore valable, de sorte que l'investissement en temps ne sera pas trop grand. Ce limnigraphe donnera la référence indispensable pour caler tous les autres capteurs. Une fois les mesures achevées et le limnigraphe retiré, le maintient à demeure d'une échelle limnigraphique permettra d'estimer les débits, et donc l'état du réseau, d'un seul coup d'œil.

1-2- Détecteurs de pression. Les détecteurs-enregistreurs de pression sont d'un usage qui se répand dans les études des cavités naturelles (comme le Luirographe de Laurent Morel). D'une autonomie importante et d'une grande solidité, ils peuvent affronter les crues. La mesure de pression renseigne sur la hauteur d'eau. Ces capteurs fournissent donc la valeur de la mise en charge des réseaux. À l'intérieur de la grotte, on peut installer deux capteurs de pression pour mesurer et enregistrer simultanément les hauteurs d'eau en deux points du réseau. La fréquence d'acquisition sera de l'ordre de la minute.
On pourra faire trois campagnes de mesures successives :

- un capteur aux Enfers et un autre à la sortie,
- un capteur en bas de la salle Saint Bruno et un autre aux Enfers,
- un capteur à la salle à Manger et un autre aux Enfers.

Bien entendu, si on dispose de quatre capteurs, on peut procéder à toutes ces mesures simultanément (question de crédits à demander au Conseil Général). Peut-être la DDAF possède-t-elle des capteurs de ce type et pourrait-elle les prêter ?

La corrélation entre le débit total fourni par le limnigraphe et les hauteurs d'eau en différents endroits permettra de connaître l'état global du réseau depuis l'extérieur, et la vitesse de propagation de l'onde de crue.

En particulier, les deux capteurs de la salle à Manger et des Enfers fourniront le déphasage temporel entre l'arrivée d'une crue au débouché du siphon du Berger et la montée des eaux dans la galerie des Enfers.

1-3- Visites en crue. Des visites à différents moments d'une crue montreront les galeries actives pour un niveau donné.

Conclusion. Ainsi, toutes ces mesures (météo, DDAF, spéléo) et observations (spéléo, guide), associées à l'étude de la topographie et à la confrontation avec l'expérience des connaisseurs du réseau, donneront une image réaliste de la progression des mises en charge (fonctionnement des trop-pleins successifs) au cours d'une crue donnée et fourniront un modèle hydraulique simple des conduits de sortie.

Un capteur-enregistreur de pression revient à 800 euros (constructeur Laurent Morel à Lyon). Il en faudrait au moins deux pour faire des corrélations. Des spéléos pourraient assurer gratuitement le suivi de l'affaire si la DDAF réinstalle un limnigraphe.

2- Protocole réglementaire pour assurer la sécurité des touristes

- Sur le deuxième aspect, les choses sont plus compliquées. Les bulletins météo sont notoirement insuffisants pour estimer le risque de montée brutale d'eau dans les Cuves. Il faut donc trouver un système qui s'ajoute à l'indication de la météo. Nous en proposons un certain nombre, à discuter en fonction de leurs coûts et de leurs fiabilités.

2-1- Observateur extérieur. Une première solution consisterait à installer un téléphone à la salle Saint Bruno, relié à l'extérieur, afin qu'on puisse prévenir le guide d'événements extérieurs (orage…). Mais un orage sur Sornin n'est pas forcément très visible de Sassenage, et il faut une personne extérieure de confiance. Ce système n'est donc pas suffisant tout seul.

2-2- Pluviographe sur Sornin. Le bassin versant des Cuves de Sassenage comprend d'abord le plateau de Sornin (10 km^2), la partie ouest du plateau des Charvets (1 à 2 km^2) et quelques

pertes du Furon dont le bassin d'alimentation est à chercher sur les plateaux est du Vercors au dessus de Lans-en-Vercors. Les pertes du Furon ne sont pas à craindre car un simple regard sur le Furon renseigneront de la crue. On peut installer un détecteur d'averse sur les plateaux de Sornin ou environnant (pluviométre avec télé-transmission). Ce détecteur d'averse consultable de la salle Saint Bruno permettrait au guide d'évaluer le risque. Les critères à respecter seraient élaborés à partir des résultats de l'étude hydrologique et d'un rodage durant un certain temps. Mais cette installation-là, pour être fiable, serait assez coûteuse.

2-3- Détecteur salle à Manger. On peut imaginer un système au fonctionnement plus simple qui consiste à installer un détecteur de niveau à la sortie du siphon du gouffre Berger et le relier à un système d'alarme (dans la partie touristique). Bien entendu, il faut faire une étude préliminaire afin de connaître, pour différentes crues, le décalage de temps entre la montée d'eau à la salle à Manger et l'arrivée de la crue dans le réseau touristique.

Si l'étude montre que pour les crues annuelles, le temps est suffisant pour l'évacuation des touristes (10 mn), alors un tel système sera assez facile à installer. Mais il faut se garder de penser que ce système sera infaillible. En effet, il est facile de voir que le temps séparant l'arrivée de la crue à la salle à Manger et son arrivée aux Enfers est grosso-modo un temps de remplissage de réservoir. Si on estime le volume de ce réservoir à 6000 m^3 (par exemple), le temps de remplissage varie à peu près comme l'inverse du débit : 600 s pour une augmentation de 10 m^3/s (10 mn), 300 s pour une augmentation de 20 m^3/s (5 mn). On voit facilement qu'il ne peut y avoir de sécurité absolue, puisque l'augmentation instantanée du débit n'est pas limitée, tout en devenant pour les grands débits de plus en plus rare.

Heureusement, ces très grandes crues obéissent à un scénario classique. Un temps pluvieux s'installe et le sol est gorgé d'eau. Une grosse averse survient alors et comme le sol est gorgé, il ne peut rien retenir de la pluie qui dévale dans les conduits souterrains. A contrario, si une grosse averse survient sur un sol sec, les 30 premiers millimètres de l'averse sont absorbés par le sol et le sous-sol proche de la surface. On voit donc que la plupart des grandes crues succèdent à un premier épisode pluvieux. La très grande crue de 1996, par exemple, a comporté deux gros épisodes pluvieux séparés de 12 heures. C'est le deuxième qui a été de période de retour peut-être centenale.

3- Travaux possibles de génie civil

Ils sont de deux sortes : tunnel vers l'extérieur, ou tunnels intérieurs.

3-1- Tunnel vers l'extérieur. On peut envisager de creuser un tunnel qui relierait la salle Saint Bruno, ou un point de ce secteur, à l'extérieur. Comme cela, en cas de crue ou de signe d'une mise en charge, les touristes seraient évacués par ce conduit artificiel.

La topographie levée par les spéléos (Agnès Daburon, Baudouin Lismonde) montre malheureusement que si la distance horizontale est faible entre le pied de la falaise et le réseau touristique (de l'ordre de la dizaine de mètres), la distance verticale dépasse 80 mètres. Le coût d'un tel aménagement semble totalement prohibitif.

3-2- Tunnels intérieurs. Il se trouve que le 7 juin 2002, une grande crue de fréquence peut-être décennale est survenue suite à des averses orageuses dans l'ouest du Vercors. Ces crues ont fait de gros dégâts dans les Terres Froides et sur la bordure ouest du Vercors. Aux Cuves de Sassenage, l'eau est montée dans les Enfers jusqu'à déverser au sommet de l'escalier dans

la salle des Ratapanades et cela avec un gros débit capable de transporter des blocs de 2 à 3 kg. Au cours d'un tel épisode catastrophique, la presque totalité des galeries touristiques est noyée ou parcourue par un violent courant.

Ces très rares crues, qui dépassent les 10 m^3/s, sont imparables, mais pour des crues plus modestes on peut essayer de limiter l'ampleur de la mise en charge du réseau des Enfers en facilitant l'évacuation de l'eau des crues. Il suffit dans le principe d'agrandir les conduits existants ou d'en ouvrir de nouveaux.

Le guide Sérafin, qui connaît bien le secteur, propose d'agrandir le conduit numéroté 48 et 11 sur le plan Fonné. Ce conduit serait nettement plus spacieux si de grandes dalles disposées en trémie ne l'encombraient sur une certaine longueur.

Le Spéléo Secours Isère (SSS Isère présidé par Thierry Larribe) serait d'accord pour organiser régulièrement des séances de dynamitages qui entreraient dans les exercices normaux d'entraînement des équipes d'artificiers secouristes. Il s'agirait de casser les gros blocs (dynamitage) et de sortir les gravats de la grotte. Ainsi, les pertes de charge opposées au passage de l'eau diminueraient. Pour un même débit, la mise en charge dans les Enfers serait plus faible. La difficulté de ces travaux réside dans l'obligation de souffler de l'air en amont des tirs afin de pousser les gaz vers l'entrée. Mais la mise au point de cette technique, de même que la maîtrise d'une atmosphère respirable en cas de secours, intéressent la SSSI. Ces travaux devront être précédés par les mesures hydrologiques si on veut en mesurer l'efficacité.

La décision se ferait à l'issue d'une mesure soignée des dénivellations et d'une visite des lieux. Cette aménagement ne remplacerait pas du tout une "alarme à crue" dans le bout du réseau touristique, mais diminuerait les risques au niveau des Enfers.

4- Préconisations provisoires

De toutes ces réflexions, on peut tirer les préconisations matérielles suivantes :

- installation d'un téléphone à la salle Saint Bruno (Commune de Sassenage),
- installation d'un limnigraphe à la sortie de l'eau (DDAF, Diren),
- mesures par capteurs-enregistreurs de pression (spéléo et Conseil Général),
- agrandissement par la SSSI des conduits en aval des Enfers.

L'installation d'un pluviographe à Sornin serait précieuse mais sans doute trop difficile à mettre en œuvre. Elle ne s'imposera que si les autres méthodes sont insuffisantes.

L'étude de synthèse pourrait être faite par la commission scientifique du CDS Isère (B. Lismonde) ou par celle de la Fédération de Spéléo et soumise pour avis à la DDAF Isère et d'autres organismes.

Remerciements à la DDAF (MM. Gauthier, Duraffour, J. Biju-Duval) pour les données sur le Germe, au guide Sérafin et à Thierry Larribe pour leurs renseignements.

Texte communiqué :
à Monsieur le Maire de Sassenage (Christian Coignet),
à la DDAF Isère (Jérôme Biju-Duval),
au président du Spéléo-Secours de l'isère (Thierry Larribe),
au président de la commission scientifique de la Fédération de Spéléo (Stéphane Jaillet)
au président du CDS Isère (Bernard Cruat)

3- Texte de la convention

La convention passée entre la commune et le CDS Isère (commission scientifique)

Les crues dans la partie touristique
Des Cuves de Sassenage

Convention

Entre le Comité Départemental de Spéléologie de l'Isère (CDS) représenté par son président M. Bernard CRUAT,

Et

La commune de Sassenage, représentée par son maire, M. Christian COIGNÉ, agissant en vertu de la délibération du 23 septembre 2002.

Il est convenu ce qui suit :

Préambule :

À la réunion de la commission de sécurité en vue de la réouverture de la grotte touristique (vendredi 21 juin à la mairie de Sassenage) il a été décidé, compte tenu de la présence d'eau dans la grotte :

- d'une part, de réouvrir la grotte avec des conditions très restrictives d'ouverture,
- d'autre part, d'entreprendre une étude hydrologique afin de mettre au point, à moyen terme, un protocole plus précis et un peu moins restrictif des conditions de visite.

La réalisation d'une étude hydrologique résulte de différentes discussions et concertations entre la DDAF de l'Isère, la commission scientifique du CDS Isère et les personnes connaissant le réseau.

Article 1 – Objectifs de l'étude :

L'étude a deux objectifs :

- mesurer les mises en charge du réseau touristique en fonction du débit du Germe,
- déterminer les temps de parcours des fronts de crue entre la « salle à Manger » et « les Enfers ».

Le premier objectif est surtout concerné par les aspects permanents de l'écoulement du Germe. Pour un débit du Germe constant durant un certain temps (une heure par exemple), on comprend bien que le niveau de l'eau dans les différentes parties du réseau touristique est d'autant plus haut que le débit est plus grand.

En un point donné, on peut donc établir la relation entre la hauteur de l'eau et débit (permanent) du Germe. La hauteur de l'eau, à chaque instant, est mesurée par un capteur-enregistreur de pression (la hauteur d'eau est proportionnelle à la pression). Le débit du

Germe est mesuré aussi par un capteur de pression en utilisant une courbe d'étalonnage donnant la relation débit-hauteur d'eau.

Le second objectif correspond à l'étude des transitoires. Une augmentation rapide du débit de l'eau au débouché du « siphon Bonnevalle » à la « salle à Manger » (au delà du réseau touristique) s'accompagne d'une montée du torrent et des lacs qui émaillent le parcours. Cela représente un certain volume d'eau qui est retiré du torrent et retarde l'arrivée du front de crue.
Il est facile de comprendre que le retard dépend du débit initial et de la vitesse d'augmentation du débit. Il faut donc mesurer ce retard pour un certain nombre de crues de différents types et en tirer un modèle réaliste, c'est-à-dire avec des capacités et des résistances bien dimensionnées pouvant servir à des prévisions.

L'ensemble de toutes les mesures permettra de caler un modèle mathématique (à résolution numérique sur tableur), qui servira de modèle de référence pour la gestion de l'ouverture des Cuves.

En particulier, l'étude des transitoires fournira les détails, éventuellement exploitables pour l'évacuation des touristes, entre l'arrivée de la crue au « siphon Bonnevalle » et le début de la montée de l'eau « aux Enfers ».

L'étude hydrologique des crues dans la partie touristique des Cuves de Sassenage est une nécessité pour la sécurisation des visites. Mais elle ne donnera que des éléments d'une appréciation des risques attachés aux mises en charge du réseau.
Ces éléments devraient néanmoins permettre au gestionnaire de la grotte, en accord avec la commission de sécurité, de choisir les règles de décision d'ouverture de la grotte et les dispositifs à placer dans le réseau touristique.

Article II – Les moyens :

Les appareils et leur mise en place

II-1- Les cinq capteurs-enregistreurs de pression :

Pour déterminer la hauteur d'eau à l'extérieur ou dans les galeries de la grotte, on utilise des capteurs-enregistreurs de pression qui se présentent sous la forme d'appareils complètement autonomes et étanches, de quelques kilogrammes, que l'on fixe solidement à la roche dans un endroit un peu abrité du courant. On propose d'utiliser le modèle dit « Luirographe » (constructeur L. Morel à Lyon) qui est remarquable de robustesse.

Le premier capteur servira à mesurer les débits du Germe. Pour transformer l'indication hauteur d'eau en débit, on fait plusieurs mesures de débits que l'on rapproche des hauteurs d'eau mesurées par le capteur. Ces différents points de mesure constituent la courbe d'étalonnage du capteur.
En installant le capteur au même endroit que le limnigraphe de 1968, c'est-à-dire à une trentaine de mètres en aval de la Passerelle, on pourra se servir de la courbe d'étalonnage construite à l'époque (sous réserve de vérifier qu'elle est encore valide) en la calant par deux ou trois mesures de débits. La DDAF Isère est d'accord pour fournir cette courbe d'étalonnage.

Le second capteur sera placé à côté de l'échelle limnimétrique destinée à rester à demeure à l'entrée de la grotte. Il servira à étalonner l'échelle en question.

Le troisième sera installé au niveau des « Enfers » (partie touristique) dans le conduit de descente juste en aval de la grille et qui constitue l'arrivée de l'eau en crue.

Le quatrième capteur sera disposé dans la galerie située à l'aplomb de la « salle Saint Bruno », terminus des visites touristiques.

Le cinquième capteur sera placé au débouché du siphon « de Bonnevalle » (dans la partie non touristique), c'est-à-dire au débouché de l'eau venant du gouffre Berger.

II-2 : Les deux échelles :

Il faut mettre en place deux échelles limnigraphiques (mires limnimétriques) qui sont des règles graduées fixées sur la roche. L'une devra être placée à côté du premier capteur de pression, elle servira de référence pour ce dernier, tout le temps que ce capteur sera en place. L'autre devra être placée à l'entrée de la grotte, visible depuis la Passerelle. Elle sera de qualité supérieure (lave émaillée) et restera en place après l'étude. Elle servira à connaître le débit du germe d'un seul coup d'œil, une fois que la courbe donnant la relation hauteur-débit aura été construite.

Article III- Les financements :

III-1 : Matériel à commander :

Le matériel, sauf la règle placée à l'entrée de la grotte et qui restera en place, deviendra à la fin de l'étude propriété du CDS Isère, et constitue donc le profit réel de la commission scientifique.
Les coûts d'achats sont les suivants :

5 capteurs-enregistreurs de pression : 600 € HT chacun, soit 3588 € TTC.
2 échelles limnimétriques graduées en cm (OTT) :
une en acier émaillé, 41 €HT, soit 49 € TTC.
l'autre en deux tronçons en lave émaillée (définitive) : 454 €HT, soit 543 € TTC.

La pose des 5 capteurs sera assurée par la commission scientifique, de même que l'échelle limnimétrique située à côté du capteur le plus en aval.

En revanche, la pose de l'échelle qui restera en place et sera visible de la Passerelle sera assurée par la commune de Sassenage sur les indications de la commission du CDS isère, car il peut y avoir des raisons esthétiques à la placer d'une manière ou d'une autre.

III-2 : Rapport de synthèse final : gratuit

Ce rapport de synthèse final sera fait par B. Lismonde. Il reprendra les principaux résultats expérimentaux. Il comprendra un plan détaillé et refait des Cuves de Sassenage depuis l'entrée jusqu'à la « salle à Manger » avec une attention particulière pour les altitudes des différents points de la coupe en long.

Des croquis interprétatifs montreront le processus de progression des crues dans le réseau. Un modèle mathématique du fonctionnement du réseau touristique sera fourni et quelques exemples donnés sous forme de simulations.

En reprenant les résultats du cetegref de Grenoble sur l'estimation des crues décennales et centennales, il fournira les éléments pour calculer la probabilité de débits donnés et de vitesse de montéee dans le réseau touristique.

Cette étude n'aura aucun caractère de confidentialité puisqu'elle servira de base pour des articles scientifiques. Une copie des articles sur le sujet, parus dans des revues spécialisées sera jointe ultérieurement au rapport.

III-3 : Frais divers :

Ils correspondent principalement à des frais d'achat de matériel de nivellement, aux déplacements (une trentaine de visites) et à la maintenance des appareils (renvois chez le constructeur) : 1200 € TTC.

III-4 : Coût total :

Le financement de cette étude, soit 5380 € TTC sera pris en charge par la commune qui versera une subvention au CDS isère du montant équivalent.

III-5 : Versement de la subvention :

Le versement de cette subvention interviendra de la manière suivante :
versement des 1200 € dès le vote de la subvention,
versement des 4180 € sur la présentation des factures d'achat des matériels.

III-6 : Il a été confié à B. LISMONDE sous le couvert du CDS une clé des grottes qui lui permettrait un accès parmanent aux Cuves. Cette clé lui est fournie sous réserve du respect des règles de sécurité.

Article IV- Échéancier :

La société spéléo-secours Isère a prévu de procéder, à l'occasion de différents exercices d'entraînements de ses artificiers, à l'amélioration du passage de l'eau de crue dans la perte « des Enfers ».
Il faudrait que l'étude hydrologique démarre le plus tôt possible afin de tester l'efficacité de cet élargissement.
Pour que l'étude permette de faire un modèle de crues, on laissera les appareils suffisamment longtemps afin que des crues de différentes ampleurs surviennent et soient enregistrées. Cela peut prendre selon les aléas météorologiques de 1 à 3 ans. C'est au bout de ce délai que la commission scientifique rendra son rapport final.
Des notes sur l'état d'avancement de l'étude seront envoyées à la mairie.
Un rapport intermédiaire sera remis dès le printemps après l'acceptation de l'étude.

Article V- Résiliation :

En cas d'inexécution de ses obligations par l'une ou l'autre des parties, la présente convention sera résiliée de plein droit, 15 jours après une mise en demeure restée sans effets, sans préjudice de tous les dommages et intérêts qui pourraient être réclamés à la partie défaillante.

Fait à Sassenage le

Le Maire
C. COIGNÉ

Le Président du CDS Isère
B. CRUAT

Cette convention a été visée le 25 septembre 2002 par la préfecture, signée début décembre 2002 par B. Cruat et envoyée à la Mairie de Sassenage.

La facture des Luirographes (par l'entreprise Recherche Et Profondeurs) a été envoyée le 23 janvier 2003 à Sassenage.

Commentaires en décembre 2004

Réalisation et modification des objectifs précisés dans la convention

La convention signée entre la commune de Sassenage et la commission scientifique du CDS Isère se termine avec ce présent rapport. Indiquons à grand trait ce qui a été réalisé et ce qui a été modifié par rapport à la convention.

Article 1

« L'étude a deux objectifs :

- mesurer les mises en charge du réseau touristique en fonction du débit du Germe,
- déterminer les temps de parcours des fronts de crue entre la « salle à Manger » et « les Enfers ». »

Les objectifs ont été étendus à toute la partie des Cuves située entre l'entrée et les siphons de la galerie Ouest, c'est-à-dire que le champ de l'étude a été plus que doublé. Ce changement a été commandé par la constatation qu'il n'y avait pas de réservoir entre l'entrée et la salle à manger (ce que laissait supposer l'ancienne topographie).

Article 2

Les cinq Luirographes ont été installés mais pas toujours aux endroits précisés dans la convention. Trois endroits nouveaux ont été instrumentés : le bas de la galerie Ouest, le premier siphon de la galerie Ouest et le deuxième siphon de cette galerie (grâce à l'aide des plongeurs spéléos). Un des Luirographe a été monopolisé par la mesure de la pression atmosphérique. La faiblesse des montées d'eau à certains endroits (salle à Manger) nous a, en effet, obligé à prendre en compte les variations de la pression atmophérique.

Les nombreuses pannes des Luirographes liées à une mauvaise qualités d'une nappe de fils de liaison ajoutées aux deux grandes sècheresses subies dans le Vercors ont allongé l'étude qui s'est étirée de décembre 2002 à octobre 2004.

La courbe d'étalonnage de la DDAF Isère construite sur le Germe s'est avérée inexploitable et nous avons préféré prendre comme repère de hauteur, d'une part, le barrage près de l'entrée et, d'autre part, la règle de la salle à Manger qui nous fournissent un tarage beaucoup plus sensible.

Les deux échelles limnimétriques n'ont pas été achetées.

La topographie a été refaite bien au-delà de la salle à Manger. C'est finalement près de 9 km de levés qui ont été réalisés par les spéléos de l'Isère et d'ailleurs (Paris, Lyon…).

Le versement des subventions et le paiement des 5 Luirographes a été effectif en mai 2003.

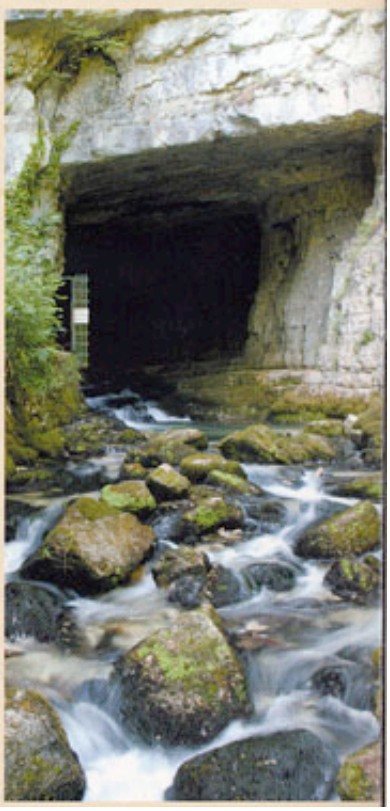
Article 4

Dans l'échéancier, il avait été indiqué que l'étude pouvait prendre de un à trois ans en fonction des aléas météo. Les deux années et demi restent donc dans la fourchette.

Etude hydrologique aux Cuves

■ Depuis les crues du 23 mai 2002, les grottes sont fermées en cas de pluie. La ville souhaite mettre en place un protocole moins restrictif, tout en assurant une sécurité optimale aux visiteurs.

A l'issue d'une concertation avec la préfecture de l'Isère, la direction départementale de l'agriculture et de la forêt, la commission scientifique du comité départemental de spéléologie et des experts, la municipalité a donc choisi de lancer une étude hydrologique. Cette dernière a deux objectifs : mesurer l'impact du débit du Germe sur le réseau touristique et déterminer le temps de parcours des fronts de crues entre «La Salle à manger» et «Les enfers», plus en aval du réseau. Elle devrait permettre au gestionnaire des Cuves de mieux comprendre la progression des crues dans le réseau pour déterminer, en accord avec la commission de sécurité, les règles d'ouverture de la grotte et les dispositifs d'alarme à placer dans le réseau touristique.
L'étude a été confiée au comité départemental de spéléologie. Pour la mener à bien, une subvention de 5 380 € a été allouée à cette association par le conseil municipal. Elle sera employée à l'achat des appareils de mesure nécessaires à l'étude, à régler les frais de déplacement des spéléologues qui interviendront bénévolement sur le site, et à la maintenance des appareils. Sassenage en Pages se fera l'écho des conclusions du rapport de synthèse, très attendu.
(unanimité)



Extrait de la revue de la commune de Sassenage (n° 66, octobre 2002)

Les 5 rapports d'avancement envoyés à la commune

1er rapport, le 24 décembre 2002

L'étude hydrologique de la partie touristique des Cuves de Sassenage progresse. J'ai reçu, du constructeur L. Morel, les cinq capteurs-enregistreurs de pression et je les ai installés comme prévu : deux à l'extérieur, et trois à l'intérieur.

Les données collectées par les capteurs seront récupérées début février. S'il y a eu des crues d'ici là, je pourrai vous envoyer un premier rapport courant mars.

Vous allez recevoir la facture du constructeur, qui se montera à 3 588 euros TTC. Soit, la commune le paye directement, soit vous versez le montant au CDS Isère et le CDS règlera le constructeur. Je ne me souviens plus ce qui avait été décidé.

J'ai proposé à un groupe de 6 de mes étudiants (IUT Génie Thermique de Grenoble) la modélisation hydraulique de la sortie des Cuves comme projet de fin d'étude. Ils termineront ce travail (qui intervient dans le cours normal de leur scolarité) début mars, et le présenteront au cours d'un exposé d'une heure auquel vous serez invité.

J'ai repris avec quelques spéléos du SGCAF la topographie de la grotte. Le levé de la polygonale jusqu'au siphon du Berger est terminé. Il reste les diverticules à topographier.

La société de Secours Isère (Thierry Larribe) attend les premières mesures pour éliminer les blocs qui gênent l'eau au niveau de la perte des Enfers. Il faut en effet disposer de mesures avant les travaux pour en mesurer les effets. Ces travaux rendront plus rare l'ennoiement des Enfers, mais la galerie restera inaccessible à cause du courant. Pas de miracle à attendre de ces travaux.

Plus intéressant : l'examen du boyau au-dessus des Enfers (qui avait été vu au cours de l'incident du mois de mai dernier) m'a montré qu'il était possible de progresser. La lacune entre le parloir des Fées (le lieu d'attente des enfants) et la salle des Rataplanades du côté de la sortie, n'est pas très grande, 30 m environ. Déjà des deux côtés, une progression a été réussie qui ramène la distance à environ 20 mètres (SGCAF et Spéléo Secours Isère). Mais aucun passage n'est encore praticable. Le guide Sérafin est bien sûr au courant de tout cela.

2e rapport, le 11 mai 2003

Suite à la lettre que je vous ai envoyée fin décembre 2002, et par laquelle je vous informais de l'avancement de l'étude, je vous fournis par cette deuxième lettre les nouveaux éléments de l'étude en cours sur les Cuves de Sassenage. Je vais les passer en revue les uns après les autres sans souci de cohérence générale.

1- Les capteurs ont été relevés au mois de février 2003. Mais l'étude des enregistrements a montré qu'il n'y avait eu aucune crue significative. Je les ai donc replacés pour une deuxième campagne de mesure (fin février-mars-avril) et je les ai récupérés le 1er mai. L'examen des enregistrements n'est pas sans intérêt, mais là encore aucune crue significative. J'ai donc reinstallé 4 appareils aujourd'hui 11 mai pour une troisième campagne (le 5e est en cours de modification pour être placé à la galerie

Ouest). Elle se terminera début juillet. Si d'ici là, il y a eu des crues intéressantes, j'installerai pour la quatrième campagne (juillet-septembre) les capteurs à un autre endroit.

2- Le plan initial du projet de sécurisation des touristes était d'installer un détecteur près du siphon de la salle à Manger afin de bénéficier d'un délai pour l'évacuation des touristes. Sans préjuger des résultats qu'amèneront les prochaines crues, je pense néanmoins maintenant que cette idée ne marchera pas pour la raison suivante : l'altitude du siphon de la salle à Manger avait été mal mesurée (sur l'ancienne topographie qui datait il est vrai de 1950). Elle était annoncée pour 20 m au-dessus du porche inférieur alors qu'elle est 32 m au-dessus de l'entrée des touristes (la porte). Cette erreur fait que le torrent souterrain, au moment des mises en charge, n'a pas à remplir des grands réservoirs comme on pouvait le penser au vu des dénivellations, mais se contente de couler en torrent. Il n'y a donc pas de délai important à escompter entre la salle à Manger et les Enfers (on verra ce que donneront les enregistrements à ce sujet).

Tout n'est pas perdu. J'ai poursuivi la topographie de la grotte (4,5 km levés cet hiver et printemps) jusqu'au siphon de la galerie Ouest, nettement plus loin que le siphon de la salle à Manger. Et dans ce coin, j'ai des indices de mises en charge (et donc de décalages temporels à prévoir pour l'onde de crue). C'est pour cette raison qu'à la quatrième campagne (juillet-septembre) et s'il y a eu des crues pour connaître le comportement de la galerie touristique, je mettrai deux capteurs-enregistreurs dans la galerie Ouest. S'il n'y a pas eu de crues, je remettrai les capteurs-enregistreurs au même endroit que maintenant. Et je repousserai de deux mois l'étude de la galerie Ouest.

3- Le CDS Isère a enfin reçu la somme attribuée par la commune de Sassenage, soit deux chèques, l'un de 3588 euros pour le constructeur Morel de Villeurbanne qui est donc payé, l'autre de 1200 euros pour le CDS Isère (qui servira à payer le lasermètre déjà acheté qui a été utilisé pour la topographie).

4- Comme vous le savez, j'ai encadré 6 étudiants de l'IUT dans lequel j'enseigne, sur un projet lié au problème des crues de Sassenage. Le sujet les a beaucoup intéressés et même passionnés pour certains d'entre eux, mais il était un peu trop difficile pour qu'ils puissent le mener à terme. Hervé Sérafin a assisté à la présentation. Il doit posséder leur rapport, mais il est inutile de le lire car il est trop incomplet.

5- J'ai pu observer au moment de la fonte des neiges que les travaux faits cet hiver par la société spéléo secours de l'Isère dans la perte des Enfers ont été efficaces. J'ai même pu emprunter la perte avec 50 l/s d'eau dans les Enfers (pour ressortir à la salle des Trois Cascades). Mais il ne faut pas se faire d'illusion. La montée de l'eau sera moins grande. Il y aura moins souvent un siphon au bas de l'escalier des Enfers, mais le passage sera impossible à cause de la violence du courant. Il faudrait penser à installer une grille pour protéger la perte (mais il faut qu'elle soit amovible, s'ouvrant comme une trappe par exemple, pour assurer le passage éventuel des spéléos ou du service d'entretien).

La topographie soignée des boyaux au-dessus des Enfers m'a montré qu'ils n'étaient pas en face, c'est-à-dire que le boyau côté sortie n'est pas dans le prolongement du boyau qui part au-dessus du Boudoir des Fées (là où étaient les enfants). On ne pourra donc pas retomber sur l'un en creusant l'autre. Pas d'espoir de ce côté de pouvoir shunter le passage des Enfers. De même, j'ai atteint avec l'aide d'un grimpeur le porche 30 m au-dessus de l'entrée des touristes. Ce n'est qu'une simple baume sans intérêt.

6- Je vous avais parlé d'une maquette possible pour simuler les crues dans les Cuves. J'ai fait le calcul en similitude physique (pour que les phénomènes observés sur la maquette soient ceux observables

dans la grotte elle-même). Mon projet est donc au point. Vous ne m'avez pas dit si la commune était intéressée par la réalisation de la maquette (je ne suis pas assez bon bricoleur pour cela). Comme je suis au comité directeur de l'association des amis du Musée de l'Eau de Pont-en-Royans, j'essayerai de voir si cela pourrait se faire là-bas. Qu'est ce que vous en pensez ?

7- La modélisation des Cuves est terminée (sur tableur Excel), mais il me faut encore quelques mesures en crue pour caler le modèle, c'est-à-dire calculer les paramètres inconnus (les rétrécissements dans les endroits inaccessibles aux spéléos).

Vous n'avez pas à vous inquiéter d'une certaine lassitude de ma part. Je prends en effet beaucoup d'intérêt à cette étude. J'ai publié un article dans la revue du CDS Isère que je communiquerai à Hervé Sérafin, s'il ne l'a pas déjà. Je dois faire une communication au congrès de la fédération de spéléo à Pentecote, et je publierai probablement dans un an ou deux un petit ouvrage sur les Cuves. Les plongeurs (à force que je leur parle de la grotte) vont reprendre prochainement une campagne de plongée à la galerie Ouest. De même, les spéléos vont poursuivre sur mes indications l'exploration de quelques secteurs intéressants.

Voilà donc les derniers développements de l'étude. Je ne pourrai pas vous remettre l'étude pour le début de l'été. Si les crues sont au rendez-vous ce printemps et cet été, je vous remettrai le rapport de synthèse à l'automne. Sinon, il faudra encore s'armer de patience.

3e rapport. 15 décembre 2003

Je ne vous ai pas adressé de courrier cet été car la sècheresse ne m'a apporté aucun enseignement sur le fonctionnement hydrologique des Cuves en crue.

1- Observations. La cinquième campagne de mesures s'est achevée la semaine dernière. J'avais placé un capteur au siphon de la galerie Ouest, c'est-à-dire à 1,3 km de l'entrée.

Lors de la précédente lettre (et à la conférence d'octobre) je vous avais indiqué que la salle à Manger à 600 m environ de l'entrée ne pouvait être d'aucune utilité pour obtenir un délai significatif à l'arrivée d'une crue (du fait de l'absence de mise en charge). Pour cette raison, j'avais installé un capteur au fond de la galerie Ouest. Cette galerie est pourtant sèche, mais sa morphologie traduit l'existence, présente ou passée, de gros débits.

Les derniers enregistrements ont montré que les crues d'automne on fait monter plusieurs fois le niveau d'eau du siphon de la galerie Ouest de 15 m. Cette grande hauteur de mise en charge correspond à la dénivellation entre le siphon et le col qui sert alors de déversoir. On en conclut que la galerie Ouest en aval de ce déversoir se met à couler avec de gros débits en période de crue. Je pourrai estimer ces débits grâce à la hauteur de mise en charge après un examen soigné du voisinage du déversoir. La mise en charge à chaque fois a été assez rapide (15 m en une heure). Une visite dans ce secteur juste avant une grande mise en charge m'a montré que la crue elle-même est précédée d'un bruit sourd caractéristique (que j'ai écouté pendant plus d'une heure sans pouvoir en détecter la cause, sans doute une cascade de l'autre côté du siphon). Nous tenons là un endroit particulièrement adapté pour installer un capteur à demeure.

Malheureusement, je n'ai pas pu déterminer exactement le délai qu'on peut obtenir, car le capteur placé aux Enfers est tombé en panne. D'après le temps de montée de l'eau, ce délai semble d'une

heure, suffisant pour la sécurisation de la partie touristique. Mais cela reste, bien entendu, à valider pour différentes sortes de crues.

Mon idée (présentée à ma conférence d'octobre) est que l'écoulement d'étiage provenant des collecteurs du gouffre Berger passe par de petits conduits et que les gros débits empruntent obligatoirement la galerie Ouest (de grand gabarit) en passant par le col. Par exemple, la crue de mai 2002 a dû tout d'abord faire déborder le déversoir de la galerie Ouest avant de déferler dans le réseau touristique. Le volume d'eau concerné pour cette mise en charge est significatif. Il comprend celui qu'on peut voir en aval du siphon (environ 1200 m3) mais aussi celui qui est en amont du siphon d'après les observations des plongeurs (la topographie a été levée en novembre 2003) et dont le volume est du même ordre.

J'ai renvoyé tous les Luirographes au constructeur pour qu'il les vérifie car la panne constatée est due à un problème de connexion qui pourrait affecter les autres appareils. Je les récupérerai bientôt.

La sixième campagne qui débutera à la fin de l'année sera consacrée entièrement à la détermination du délai qu'on peut obtenir entre le début de la crue à la galerie Ouest et l'arrivée de la crue aux Enfers.

2- Maquette en similitude physique. L'association des Amis du Musée de l'eau a discuté de l'opportunité de la réalisation d'une maquette des Cuves de Sassenage pour l'étude de son comportement en crue. Mais Gilbert Mantovani (l'ancien gérant des grottes de Choranche et qui est au comité directeur) a soulevé une objection qui a fait repousser le projet (je n'étais malheureusement pas présent pour le défendre). Il a pensé que cette maquette ferait peur aux touristes, qui ne visiteraient donc plus les grottes touristiques.

3- Sortie possible de la grotte autre que l'entrée des touristes. Avec des spéléos du SGCAF, j'ai poursuivi l'investigation de la trémie qui domine la salle de l'Éboulis dans la partie touristique. Nous avons espoir de franchir cet obstacle. J'ai par ailleurs prospecté les falaises un peu en amont des grottes. Mais pour l'instant, rien de significatif.

4- Modélisation mathématique. Pas de progrès non plus, car pas de corrélation entre la galerie Ouest et les Enfers. Les paramètres laissés libres restent à caler.

5- Ouvrage sur les Cuves. Une équipe assez nombreuse (dont des Parisiens et des Lyonnais) s'est constituée autour de ce projet que je pilote. Une première réunion a eu lieu. Je tiens le guide Hervé Sérafin au courant des réunions. L'éditeur est trouvé : ce sera le Comité départemental de spéléo (un vote a eu lieu à ce sujet dans cette association). L'ouvrage comportera deux versions. L'une pour un public de naturalistes, de régionalistes ou de spéléos (160 pages), l'autre beaucoup plus mince (48 pages) mais bien illustrée pour le public des touristes de la grotte. La sortie de l'ouvrage pourrait intervenir en 2005.

Voilà l'état d'avancement des projets. Je pense que la sécurisation de la grotte touristique est entrée dans une phase positive.

4e rapport. 8 avril 2004

Je vous informe par la présente lettre des résultats de la 6e campagne de mesure aux Cuves de Sassenage. Les cinq appareils ont parfaitement fonctionné et cette campagne est donc un plein succès. Les crues ont été de faibles amplitudes. Aucune n'a atteint le niveau de celle de 2002.

1- Résultats

On savait déjà que le siphon 1 de la galerie Ouest est alimenté (avec un certain retard) grâce à un col situé entre les deux siphons. La campagne a montré que l'origine des montées soudaines de l'eau dans la partie touristique (les Enfers) réside bien dans le phénomène de déversement par-dessus un deuxième col situé en aval du siphon 1. Ce débordement est arrivé 6 fois cet hiver et à chaque fois, on peut voir sur les enregistrements de l'appareil placé aux Enfers une montée brutale du niveau d'eau. L'étude soignée des phénomènes fait apparaître un délai compris entre 22 mn et 30 mn entre le déversement et l'arrivée de la vague de crue aux Enfers. Ce délai est suffisant pour une évacuation des touristes. On peut ajouter à ce délai, le temps mis par l'eau pour monter jusqu'au déversoir, temps compris entre 40 mn et deux heures.

2- Deux solutions envisageables pour la sécurisation

Le siphon 1 de la galerie Ouest subit les crues avec un retard. L'examen des courbes montre qu'au moment où l'eau commence à arriver au siphon 1, le sentier du circuit touristique est déjà sous 2 cm d'eau. On ne peut donc pas utiliser un capteur à cet endroit pour savoir s'il y a trop d'eau ou non. C'est uniquement en plaçant un capteur de l'autre côté du siphon, c'est-à-dire à l'aval du siphon 2 que l'on pourrait être informé de la crue à son début. Seulement, la pose, l'entretien et la maintenance d'un système de sécurité placé derrière un siphon de 90 m de longueur est difficile. C'est pour cette raison, que je propose deux solutions.

A- Solution coûteuse mais la plus rigoureuse

On installe un appareil de mesure derrière le siphon de la galerie Ouest relié par fil à la salle Saint Bruno. Et on applique une règle dont le principe est simple : si l'une ou l'autre des deux conditions suivantes n'est pas respectée, la visite est interdite ou les touristes présents dans la grotte sont évacués.

condition 1 : le niveau doit être inférieur à une certaine valeur à définir (par exemple 5 m).

condition 2 : la vitesse de montée de l'eau doit être inférieure à une valeur limite à définir (par exemple 5 m/h).

Bien sûr, c'est uniquement à l'issue de la 7e campagne que l'on pourra déterminer les deux valeurs-limites pour la visite.

B- Solution simple mais moins rigoureuse

Elle est basée sur le fait que les vagues de crue dangereuses ont pour origine le débordement en aval du siphon 1 de la galerie Ouest. Là encore, on applique deux critères

condition 1 : le niveau de l'eau au barrage des Quatre Vents (dans la partie touristique) doit être inférieur à une valeur qui assure que le sentier des touristes n'est pas inondé. C'est le critère qu'appliquait le guide avant l'incident de 2002.

condition 2 : le niveau de l'eau en aval du siphon 1 de la galerie Ouest est plus bas qu'une valeur déterminée (par exemple 2 m) et la vitesse de montée de l'eau est inférieure à une vitesse donnée (par exemple 5 m/h).

On voit que le capteur n'assure pas à lui seul la sécurité des touristes. Il faut que le guide veille au grain afin qu'ils ne se mouillent pas les pieds. Le capteur n'est là que pour prévenir de l'arrivée possible d'une vague de crue, mais le vrai danger est bien là. Le guide sait parfaitement surveiller une montée lente de l'eau.

3- Septième campagne de mesures

Dans 10 jours, je vais remettre les appareils en place dans la grotte et cela pour une durée de 6 mois. Je vais demander à des plongeurs (Pascal Clec'h de Sassenage) d'installer un appareil derrière le siphon de la galerie Ouest. Cette campagne s'achèvera donc en octobre. Le rallongement de cette 7e campagne (qui a nécessité de changer quelques composants électroniques) a pour raison la difficulté de trouver un plongeur capable d'aller derrière le siphon. J'espère que six mois suffiront pour obtenir des crues intéressantes.

L'étude s'achèvera en principe à ce moment et je fournirai alors la synthèse de l'étude hydrologique (qui est d'ailleurs bien avancée). Et il sera alors temps de réunir la commission de sécurité pour examiner la ou les solutions retenues.

Mais on pourrait déjà prévoir ce printemps une réunion technique à la mairie pour discuter des deux solutions. Il faudrait inviter J. Biju-Duval de la DDAF.

P.S. La coloration qui a été faite en février a été un succès. Elle a permis de mettre en évidence un phénomène intéressant de diffluence (future capture) d'un des affluents du Germe. Mais cela n'a rien à voir avec l'opération de sécurisation.

5e rapport. 06 octobre 2004

Je suis heureux de vous informer que la 7e campagne de mesures aux Cuves de Sassenage s'est terminée samedi 2 octobre 2004. Elle nous a montré deux crues dont l'une, celle du 20 août dernier, a été très violente et a dépassé nettement celle de mai 2002. Elle correspond à une crue de rareté annuelle.

Les mesures derrière le siphon de la galerie Ouest suffisent pour que je puisse caler un modèle mathématique prévisionnel de la montée de l'eau dans le circuit touristique. Je continuerai quelques temps à faire des mesures pour affiner et contrôler le modèle. Ce modèle servira d'outil à l'élaboration d'un protocole simple destiné à assurer la sécurité des touristes.

Je vous en rappelle les grandes lignes. Les grandes crues des Cuves proviennent du réseau Berger-Fromagère. La petite galerie située entre le siphon 1 et le siphon 2 de la galerie Ouest est l'endroit des Cuves qui voit arriver le premier les crues du gouffre Berger. Un capteur placé à cet endroit et relié par fil à un ordinateur (placé à la salle Saint Bruno ou ailleurs) permet de détecter avec une nette avance l'arrivée de la crue. Les délais qu'on peut escompter sont variables en fonction de la crue, mais seront suffisants pour assurer la sécurité des touristes. Il reviendra à la commission de sécurité de fixer ces délais.

Je fournirai deux critères quantitatifs. Le premier reposera sur la hauteur d'eau, le deuxième sur la vitesse de montée de cette hauteur. Il y aura deux niveaux d'alerte. Le premier sera une pré-alerte informant le guide que le niveau monte. Cela lui permettra d'annuler par exemple une visite prévue.

Le deuxième correspondra à un ordre d'évacuation immédiate. Bien entendu, le guide disposera sur son écran de contrôle des valeurs réelles des mesures.

Laurent Morel, qui a assuré la construction des cinq « Luirographes », m'a dit qu'il connaissait une petite société qui pourrait réaliser le capteur à installer définitivement derrière le siphon de la galerie Ouest. Pour ma part, mon travail sera terminé et ne connaissant rien à l'électronique, je ne pourrai plus participer à cette phase du travail si ce n'est proposer un cheminement pour le fil et vérifier que tout marche bien.

Je présenterai le mercredi 3 novembre à 20 h 30 (à la salle de la maison du tourisme à Grenoble) les résultats de l'étude hydraulique sous forme d'une conférence. Le rapport de synthèse final vous sera remis peu après (pour pouvoir bénéficier des discussions éventuelles). Bien entendu, je serai à votre disposition pour une réunion technique à Sassenage, et une autre avec la commission de sécurité.

Annexe 2

Les sept campagnes des Luirographes, Observations et mesures de débits

Dans cette annexe, nous présentons les 7 campagnes de mesures de hauteurs d'eau à l'aide des Luirographes, et les résultats bruts d'observations réalisées dans les Cuves de Sassenage en 2003 et 2004. Ces observations servent de base de donnée pour l'élaboration au chapitre suivant des tarages du cours d'eau souterrain en différents points du réseau (chapitre 1).

Elles comprennent des mesures de hauteurs d'eau en différents points (barrage des Quatre Vents, galerie des Enfers, règle de la salle à Manger, siphon de la salle à Manger, siphon de la galerie Ouest). Elles mentionnent la présence ou non d'eau en certains points clés comme le sentier des touristes de la partie visitée. Elles rapportent enfin les mesures de débits réalisées par la méthode de dilution d'une petite quantité de sel, et mesure de la conductivité de l'eau en aval (dite aussi méthode chimique).

1- Les sept campagnes de mesures avec les 5 Luirographes

Nous décrivons en détail les 7 campagnes qui ont été nécessaires pour obtenir des crues satisfaisantes.

1-**2- Première campagne : décembre 2002 - janvier 2003**

Chronologie des opérations

Tous les enregistrements sont à l'heure d'hiver.

B1, alu : 0-20m, placé au siphon de la salle à Manger le dimanche 22 décembre 2002 vers 14 h, récupéré le vendredi 31 janvier 2003 vers 15 h.

B2, alu : 0-20m, placé aux Enfers le dimanche 22 décembre 2002 vers 11 h, récupéré le vendredi 31 janvier 2003 vers 15 h.

B3 jaune, acier (capot marqué Pyrénées 2) : 0-3 m, placé au porche d'entrée le samedi 21 décembre 2002 vers 16 h, récupéré le vendredi 31 janvier 2003 vers 15 h.

B4 rouge, acier (capot jaune sans marque) : 0-3 m, placé dans le torrent le samedi 21 décembre 2002 vers 15 h, récupéré le vendredi 31 janvier 2003 vers 15 h.

B5, alu : 0-30m : placé sous la salle Saint Bruno le dimanche 22 décembre 2002 vers 12 h, récupéré le vendredi 31 janvier 2003 vers 15 h.

Le nombre d'échantillons pour un Luirographe est de 87 383 soit, à raison d'un échantillon par minute, une durée de fonctionnement de 60,40 jours.

1-3- Deuxième campagne : mars - avril 2003

Chronologie des opérations

Le Luiro B5 a été renvoyé à Laurent Morel pour qu'il vérifie le gain et qu'il l'adapte pour le TQS

Tous les enregistrements sont en heure d'hiver. Le passage de l'heure d'hiver à l'heure d'été a eu lieu le dimanche 30 mars à 2 h (heure d'hiver = heure d'été - 1 heure).

B1 (alu) . Il a été placé au siphon de la salle à Manger le dimanche 9 mars 2003 vers 13 h . Un système de cornières a permis de descendre le Luiro dans l'eau, même à l'étiage. Le décalage par rapport à la première campagne est de 16,5 cm vers le bas. Il a été renforcé le 12 mars à 11 h (serrage des écrous). Le Luirographe a été récupéré le jeudi 1er mai 2003 vers 13 h 30. Il était sous une épaisseur de 50 cm d'eau.

B2 (alu) . Il a été placé aux Enfers le 2 mars vers 11 h, au même endroit qu'à la première campagne, avec une modification du site (dynamitage des blocs voisins par la 3SI). Le Luirographe a été récupéré le 1er mai 2003 vers 16 h 00. Lui aussi était sous l'eau (30 cm environ). Le débit des Enfers a été mesuré, soit 460 l/s. Il a été arrêté le 5/5/3 à 9 h 0 mn 47 s.

B3 (acier jaune avec inscription) Il a été placé dans la salle des Géants le 2 mars vers 12 h (fissure au-dessus de la marque topo 7). Il servira de référence pour la pression atmosphérique. Le Luirographe a été récupéré le jeudi 1er mai vers 15 h 30.

B4 (acier rouge, et capot jaune sans inscription). Il a été placé dans le torrent au même endroit qu'à la première campagne, le dimanche 2 mars 2003 à 10 h. Il a été récupéré le jeudi 1er mai vers 16 h 30.

Le B5 a été renvoyé par Laurent Morel le 11 mars 2003.

Durant cette période, il n'y a eu aucune crue importante.

1-4- Troisième campagne : mai - juin 2003

Tous les enregistrements sont en heure d'été.

B1 (alu) . Il a été placé au siphon de la salle à Manger le dimanche 11 mai 2003 vers 11 h 30. Il a été récupéré le mercredi 9 juillet 2003 vers 10 h 45 h.

B2 (alu) . Il a été placé aux Enfers le 11 mai 2003 vers 10 h 30, au même endroit qu'à la première campagne. Il a été récupéré le 9 juillet 2003 vers 11 h.

B3 (acier jaune avec inscription). Il a été placé dans la salle des Géants le 11 mai 2003 vers 11 h (fissure au-dessus de la marque topo 7). Il servira de référence pour la pression atmosphérique. Il a été récupéré le 9 juillet vers 10 h 30 mn.

B4 (acier rouge, et capot jaune sans inscription). Il a été placé dans le torrent au même endroit qu'à la première campagne, le 11 mai 2003 à 10 h.

Il aurait fallu les récupérer avant le 8 juillet 2003.
On sera obligé d'attendre une vraie crue avant de pouvoir disposer les Luirographes dans la galerie Ouest.

1-5- Quatrième campagne : juillet - septembre 2003

Tous les enregistrements sont en heures d'été.

B1 (alu). Il a été installé au siphon de la salle à Manger le 18 juillet vers 16 h. Il a été récupéré le dimanche 20 septembre 2003 vers 10 h 30. Les indications sont toutes au voisinage de 4050 et il n'y a pas de variations importantes. Ce Luiro est donc en panne.

B2 (alu). Il a été placé à la perte des Enfers le 18 juillet vers 18 h. Il a été récupéré le 20 septembre vers 13 h. Il a été arrêté le 24 septembre à 9 h 24. L'enregistrement s'est passé assez bien, exceptées quelques valeurs aberrantes.

B3 (acier jaune avec inscription). Il a été placé dans la salle des Géants le 18 juillet vers 15 h 30. Il servira de référence pour la pression atmosphérique. Il a été récupéré le 20 septembre à 13 h . Ce luirographe n'a rien enregistré puisque les valeurs sont restées entre 2 et 36. Ce Luiro est donc lui-aussi en panne.

B4 (acier rouge, et capot jaune sans inscription). Il a été placé dans le torrent du Germe au même endroit qu'à la première campagne, le 20 juillet 2003 vers 19 h. Il a été récupéré hors d'eau le 20 septembre vers 14 h. Les indications de ce luiro semblent correctes.

Conclusions : deux Luirographes à vérifier ou à rendre à Laurent Morel : B1 et B3.

Vu l'étiage de l'été, seules les deux petites crues du 29 août et du 9 septembre présentent un intérêt. Elles ont atteint environ 30 cm sur le Germe. Il est probable qu'il faudra encore plusieurs campagnes de mesures pour espérer obtenir de belles crues.

J'ai reçu le B6 (le Luiro Acier qui était au Trou qui Souffle et qui a été remplacé par le B5) le 29 juillet 2003.

1-6- Cinquième campagne : octobre - décembre 2003

J'ai installé deux Luiro : le B4 et le B6, le B4 sur le Germe et le B6 dans la galerie Ouest.
Le changement heure d'été - heure d'hiver a eu lieu le 26 octobre à 2 h du matin (heure d'hiver = heure d'été - 1 heure). Les enregistrements sont restés en heure d'été.

B4 (acier rouge, et capot jaune sans inscription) . Il a été placé sur le Germe à l'endroit habituel, en aval de la passerelle, le mardi 14 octobre 2003 vers 20 h 30. Il a été récupéré le 7 décembre 2003 vers 13 h. Ce Luirographe semble avoir fonctionné normalement. Il était parfaitement sec à l'ouverture.

B6 (acier jaune) au fond de la galerie Ouest. Il a été placé au siphon de la galerie Ouest le mardi 14 octobre 2003 vers 16 h 30, un mètre sous l'amarrage du fil d'Ariane. Il a été récupéré

le 7 décembre 2003 vers 11 h et sous 40 cm d'eau (sortie B.L. seul). Il a été stoppé le 8 décembre vers 8 h 30. À l'ouverture ce Luirographe présentait des gouttes d'eau sous le capot et le papier de la pile était humide. En revanche, la pile avait une tension normale. les enregistrements présentent une séparation à la fin de la première crue. Mais excepté ce décalage du zéro, les valeurs relatives ont l'air bonnes.

Conclusions à l'issue de la cinqu!ème campagne. Le Luirographe de la galerie Ouest a présenté des écarts erratiques (-5 m). Mais dans l'ensemble, les indications sont très précieuses. On est sûr maintenant que les petites crues (qui ennoient les Enfers) se traduisent au siphon de la galerie Ouest par une forte mise en charge de 15 m ou un peu plus.

1-7- Sixième campagne : janvier - mars 2004

Le 15 décembre, j'ai passé les 5 Luirographes à Laurent Morel pour changer les nappes de fils défectueuses. J'ai demandé aussi à Laurent s'il ne pourrait pas modifier la fréquence d'acquisition pour la ramener à une fois par deux minutes. J'ai récupéré les 5 Luirographes le 12 janvier 2004. Laurent Morel a changé les nappes de fils, mais il n'a pas pu modifier la fréquence d'acquisition.

Tous les enregistrements sont à l'heure d'hiver.

B1 (alu) . Maxi 21 m. Il a été placé en bas du P13, sous le puits Lavigne. Il a été installé le 25 janvier vers 14 h 30. Il est fixé sur la paroi de rive droite au niveau de la montée dans les blocs pour rejoindre la corde du P 13. Il a été récupéré le 24 mars à 15 h 30.

B2 (alu) . Maxi 20 m. Aux Enfers. Il a été installé le 25 janvier 2004 vers 11h 15 mn. Il a été récupéré le 24 mars à 16 h.

B3 (acier jaune-orange avec inscription) . Maxi 8 m. À la salle des Géant. Il a été installé le 25 janvier 2004 vers 11h 30 mn. Il a été récupéré le 24 mars à 16 h.

B4 (acier rouge, et capot jaune sans inscription) . Maxi 9 m. s. À la salle à Manger. Il a été installé à l'emplacement du précédent. Mais j'ai dû planter un spit pour le nouvel écartement. Il s'est arrêté le 24 mars vers 8 h. Il a été récupéré le 24 mars à 16 h.

B6 (acier jaune) . Maxi 32 m. Il a été placé au fond de la galerie Ouest. Il a été mis en place le 25 janvier 2004 vers 15 h. Il s'est arrêté le 24 mars vers 8 h. Il a été récupéré le 29 mars 2004 à 15 h.

1-8- Septième campagne, du 28 avril 2004 au 27 septembre 2004

Laurent Morel a modifié la période d'acquisition des 5 Luirographes. Il l'a passée à 3 mn. L'autonomie des appareils est donc triplée, passant de deux mois à six mois.

L'heure de tous les Luirographes est l'heure d'été. Ils ont tous été démarré au même moment à 25 s près.

À la récupératrion, aucun n'avait pris l'eau. Il y a eu deux grandes crues, l'une le 11 août 2004 et l'autre le 20 août.

B1 (alu). Maxi 21 m. Il a été placé au bas de la galerie Ouest, sous le P13. Il a été installé au bas de la galerie Ouest le 28 avril 2004. Il a été récupéré le 26 septembre 2004 vers 15 h.

B2 (alu). Maxi 20 m. Aux Enfers. Il a été récupéré le 26 septembre 2004 vers 18 h.

B3 (acier jaune-orange avec inscription). Maxi 8 m. À la salle des Géant. Il a été installé le 28 avril 2004 à la salle des Géants. Il a été récupéré le 26 septembre vers 17 h 30.

B4 (acier rouge, et capot jaune sans inscription). Maxi 9 m. À la salle à Manger. Il mesure aussi la température. Il a été installé le 28 avril 2004. Il a été récupéré le 26 septembre vers 17 h 30.

B6 (acier jaune). Maxi 32 m. Il a été placé à l'aval du siphon n° 2 de la galerie Ouest. Il a été mis en place le 5 mai à l'aval du siphon 1 de la galerie Ouest. Puis, le 8 mai Pascal Clech l'a installé entre les deux siphons vers 1 m de hauteur. Il a été récupéré le 2 octobre à 14 h par Laurent Tarazona.

Conclusions : la septième campagne a été la dernière importante. Les résultats obtenus ont permis d'arrêter les campagnes de mesures.

2- Les observations et les mesures de débit à l'occasion des visites

Nous relatons 45 sorties qui ont conduit à des observations. Elles sont rangées simplement par ordre chronologique. Elles ne sont pas à lire dans le fil du rapport. Elles serviront au chapitre 1 pour les courbes de tarages.

1- Hauteur d'eau à la salle à Manger (1er et 2 mars 2003)
Dimanche 2 mars 2003, h = 41 cm à 11 h (10 cm d'eau dans le ruisseau des Enfers).
h = 44 cm à 18 h (15 cm d'eau dans le lit du torrent aux Enfers), mais l'eau ne touche pas le passage des touristes (au moins 10 cm plus haut).

2- Mesures du 9 mars 2003
Mesure de débit du Germe : 394 l/s.
La hauteur de la règle est 35 cm à la salle à Manger et 34 cm au retour.

3- Mesures du 12 mars 2003 (2e campagne)
Il y a 2-3 cm d'eau sur le chemin des touristes en amont du premier escalier.
À la salle à Manger 51-52 cm.

4- Mesures du 12 avril 2003 (2e campagne)
Hauteur d'eau dans le torrent des Enfers : 10 cm. Hauteur à la salle à Manger 35 cm.

5- Mesures du 21 avril 2003 (2e campagne)
Débit 0,878 m^3/s.
Hauteur du siphon de la galerie Ouest : 5 m plus haut que le jour de la topo.
À la salle à Manger, 50 cm d'eau.

6- Mesures du 27 avril 2003 (2e campagne)
L'eau déborde de 5 cm sur le passage des touristes. Débit total du Germe estimé à 950 l/s.

7- Mesures du 1er mai 2003
Niveau à la salle à Manger environ 55 cm. Débit aux Enfers 463 l/s.

8- Mesures du 11 mai 2003
Pas d'eau aux Enfers. Niveau à la salle à Manger 23,5 cm.

9- Mesures du 14 mai 2003 (3e campagne)
Débit du Germe : 223 l/s. Pas d'eau aux Enfers. Niveau à la salle à Manger 20 cm.

10- Mesures le 18 mai 2003 (3e campagne)
Niveau de l'eau très bas. Pas d'eau aux Enfers, niveau à la salle à Manger 16,7 cm.
Luirographe du siphon 10 cm au-dessus de l'eau.
Niveau du siphon de la galerie Ouest 50 cm plus bas que le jour de la topo. Rivière des Benjamins complètement asséchée.

12- Mesures du 29 juin 2003 (3e campagne)
Visite de la galerie des Naïades (aval salle des 3 Cascades) jusqu'au siphon. Le débit à la salle des Trois Cascades est de l'ordre de 50 l/s. Seule la cascade du milieu coule. La Douche plus en aval et près du ressaut de 3 m est importante. Peut-être 40 l/s. On se trempe pour passer comme en période d'eau plus importante.
Le niveau de l'eau à la salle à Manger est 9,1 cm.
Sous la salle Saint Bruno, mesure au topofil du niveau de l'eau : il est 3,5 m sous le bloc coincé en travers de la diaclase.

13- Mesures du 9 juillet 2003
Le Luirographe de la salle à Manger est 30 cm au-dessus du niveau de l'eau.
Le niveau de l'eau à la salle à Manger est de 8,3 cm. Le débit à la salle des Trois Cascades est de 10 à 15 l/s seulement.

14- Mesures du 20 juillet 2003 (4e campagne)
Le niveau de la salle à Manger est encore descendu : 7,5 cm.
A la galerie Ouest. Le niveau a bien baissé : il est trois mètres sous le bloc sur lequel est amarré le fil d'Ariane On peut descendre et on voit un lac d'une dizaine de mètre de longueur qui siphonne au bout.

15- Mesures du 24 août 2003 (4e campagne)
Niveau à la salle à Manger h = 5 cm.

16- Mesures du 21 septembre 2003.
Hauteur d'eau à la salle à Manger 7,9 cm.
Le Luiro de la salle à manger était hors d'eau de 30 cm environ.
Dans la salle des Trois Cascades, la douche est complètement tarie.

17- Mesures du 29 octobre 2003 (5e campagne)
À l'entrée, pas d'eau dans les Enfers. Au retour vers 19 h, l'eau coulait sur le sentier des touristes d'une dizaine de cm dans les Enfers. Au barrage des Quatre Vents, le soir, l'eau

n'était qu'à 30-35 cm du haut du barrage. La perte des Enfers était grosse mais il n'y avait pas encore de siphon.
À la salle à Manger, vers 12 h, le niveau était de 36,5 cm, alors que le soir il atteignait 56-57 cm. On est passé par la vire au retour. Au niveau de l'emplacement du Luirographe, il y avait 60 cm environ de charge.
À la galerie Ouest, l'eau était à peu près 30 cm plus bas que l'amarrage du fil d'Ariane. Le Luirographe était visible sous 60 cm d'eau environ. Au bout d'une petite demi heure, le niveau du siphon avait monté de 30 cm et la montée semblait s'accélérer (le déversoir a déversé moins d'une heure après).

18- Mesures du 1er novembre 2003 (5e campagne)
À 0 h à la Passerelle, du côté amont, on voit encore dans le lit du torrent un bloc contre le mur d'accès au captage sur la gauche à 2 m en amont.
Il y a beaucoup d'eau. La Herse débite 400 l/s. Il y a un peu plus d'eau que pour le secours 2002 quand je suis arrivé. On se mouille pour aller à la grille de sortie et l'eau pousse assez fort.
Le barrage dégueule à ras bord. Une visite par au-dessus me montre que le débit de la douche n'est pas très grand. Mais la galerie des Enfers est pleine et la salle des 3 Cascades siphonne complètement. L'eau arrive à 2 m de la galerie d'entrée, mais se perd tout entière dans le caillebotis.
En bas de la descente aux Enfers, grand bain de mousse. Le niveau de l'eau ne semble pas très haut : juste siphonnant. Mais les aménagements de la SSI laissent penser que le débit aujourd'hui est plus grand. Il semble que c'est la plus forte crue depuis le printemps (ou la deuxième), en tout cas la plus forte mesurée par les Luirographes. Pendant la durée de la visite, le niveau de l'eau a légèrement monté mais peu.

19- Mesures du 9 novembre 2003 (5e campagne)
L'eau coule un peu aux Enfers : 20 l/s. Le niveau à la salle à Manger est de 35 cm. Il est intéressant de comparer avec la sortie au cours de laquelle il n'y avait pas d'eau aux Enfers et un niveau de 36 cm à la salle à Manger. Il est vrai que l'eau montait. Il est possible qu'il y ait eu rapidement de l'eau aux Enfers ce jour-là.

20- Mesures du 16 novembre 2003 (5e campagne)
Niveau de l'eau 35,8 cm à la salle à Manger. Un peu d'eau aux Enfers. Le soir 38,2 cm à la salle à Manger. Le niveau a un peu monté aux Enfers.

21- Mesures du 4 décembre 2003 (5e campagne)
21 h 30 à 24 h. Il y a eu une crue deux jours avant, le mardi 2 décembre, surtout forte dans le Vercors Sud (crevaison de la Luire). C'est la pluie tombant sur la neige qui a démarré la crue. Dans le sud-est de la France, ont eu lieu des crues catastrophiques (Arles). Aux Cuves, les traces de la crue sont bien visibles et des caillous traînent sur le caillebottis qui domine la galerie de la Fenêtre. Dans la descente aux Enfers, on trouve de la mousse de crue environ 3,6 m au-dessus du bas de l'escalier. À la Perte du Shunt on trouve de la mousse aussi à 2,3 mètres de hauteur.
Au moment de la visite, l'eau derrière le barrage près de l'entrée est à 34 cm sous le déversoir. Aux Enfers, l'eau coule partout, mais on arrive à passer sans se mouiller, sauf en amont du 2e escalier où on est obligé de passer en oppo. À la salle à Manger, le niveau de l'eau est environ 13 ou 14 cm au-dessus de la règle, c'est-à-dire environ 64 cm.

22- Mesures du 7 décembre 2003 (5e campagne)

Galerie Ouest : récupération du Luirographe sous 45 cm d'eau vers 11 h 30.
Germe : le Luiro dépassait de l'eau mais de 10 cm pas plus
L'eau au barrage est à 80 cm du haut.
À la salle à Manger, le niveau est 42 cm à l'aller et au retour.
Au bas du P13 (sous le puits Lavigne), la mousse de crue est visible 3,5 m au-dessus du pied de la corde, soit environ 6,5 m au-dessus du point bas. Vingt mètres plus loin dans la galerie, je vois de la mousse accrochée au plafond (qui siphonnait donc) 5,5 m plus haut que le niveau de l'eau. Le déversement de l'eau semblait s'être fait vers la droite (vers les Benjamins).
À la rivière des Benjamins, mousse de crue au plafond à 6 m de hauteur par rapport au niveau de l'eau. Les Benjamins ont donc largement siphonné.

23- Mesures du 25 janvier 2004 (6e campagne)
Niveau de l'eau à la règle de la salle à Manger 31 cm (aller et retour). Environ 2 à 3 l/s coulait aux Enfers. L'eau provenait des petits conduits sous le 2e escalier.

24- Mesures du 7 février 2004 (6e campagne)
Les Enfers coulent mais modérément. Niveau 42 cm à la salle à Manger, stable pendant la journée. Le Luirographe de la salle à Manger est presque immergée (quelques centimètres jusqu'au capteur), de même que le Luiro des Enfers.

25- Mesures du 16 février 2004 (6e campagne)
Il n'y a pas d'eau aux Enfers. Le niveau à la salle à Manger est de 24,3 cm.

26- Mesures du 14 mars 2004 (6e campagne)
Pas d'eau aux Enfers sauf un petit écoulement en dessous du 2e escalier.
Niveau de l'eau à la salle à Manger 26,3 cm à 11 h et 29,4 cm à 17 h.

27- Mesures du 24 mars 2004 (6e campagne)
Au siphon de la galerie Ouest, l'eau est 20 cm au-dessous de la pierre d'amarrage du fil d'Ariane.
Niveau de l'eau 38 cm à la salle à Manger à 15 h et 37,4 cm à 17 h. Il y avait de l'eau aux Enfers, mais elle a diminué pendant la visite.

28- Mesures 29 mars 2004
Niveau de l'eau 30 cm à la salle à Manger. Pas d'eau aux Enfers sauf un petit écoulement provenant de la fissure en aval du 2e escalier.

29- Mesures du 4 avril 2004
Le matin, l'eau est 60 cm sous le déversoir du barrage. Le Luiro des Enfers tangenterait l'eau (s'il y était). En amont du premier Escalier et en amont du deuxième Escalier l'eau déborde de 2 cm sur le sentier des touristes.
Le soir, le barrage est à H - 54 cm. Aux Enfers, l'eau recouvre le Luiro de 6-7 cm. L'eau recouvre le sentier des touristes de 4 cm (rapide sous la sortie de la cascade Édouard). À la salle à Manger, le niveau est à 50 cm. Au siphon de la salle à Manger, l'eau est 14 cm au-dessus du Luiro placé à la 6e campagne et 30 cm au-dessus du Luiro placé à la 5e campagne. L'eau est 20 cm au-dessus du trait au bas de la dalle inclinée et 18 cm plus bas que le sommet de la dalle. L'eau est 70 cm au-dessus du Luiro placé sous la salle Saint Bruno et le plan d'eau du siphon sous la salle Saint Bruno est 135 cm plus bas que le sommet du bloc coincé entre les deux parois et sur lequel on marche.
Le débit mesuré est de 652 l/s.

30- Mesures du 6 avril 2004
Les Citrons Ficelés ont rencontré un grand bassin juste à la salle Lafforge et n'ont pas osé continuer vers les Benjamins. Ils sont ressortis finalement vers 11 h 30.
Au barrage l'eau était à H – 42 cm. Aux Enfers le niveau de l'eau était à peu près 10 à 15 cm sur le sentier des touristes.
Cela représentait un débit un peu plus grand que dimanche, mais je me suis demandé si les Benjamins avaient vraiment siphonné.

31- Mesures du 15 avril 2004
Le niveau de l'eau est 35 cm à la salle à Manger à 12 h, et 34,5 cm à 16 h.
Le niveau de l'eau au barrage est H - 70 cm à 17 h.
Il y a un peu d'eau aux Enfers (10 l/s ?) et le niveau du Luirographe est -10 cm (c'est-à-dire 10 cm au-dessous du capteur).

32- Mesures du 18 avril 2004
Niveau de l'eau au barrage : H – 52 cm
Luiro des Enfers 5 cm sous l'eau.
4 cm d'eau sur le sentier des touristes aux Enfers (avant la salle du Styx).
Niveau de l'eau à la salle à Manger 50 cm à 10 h.
Niveau de l'eau à la salle à Manger à 20 h ; 48,5 cm.
2 cm d'eau sur le sentier des touristes aux Enfers.
Niveau de l'eau au barrage à 20 h H – 53 cm.

33- Mesures du 24 avril 2004
Il y a eu une crue au petit matin suite à un bon orage bref vers 20 h la veille au soir.
Niveau du barrage H – 13 cm à 11 h 45.
L'eau affleure au bas de la descente aux Enfers. Au niveau du Luiro, il y a 30 cm d'eau .
Au 2e escalier environ 10 l/s.
Sous la salle Saint Bruno, le niveau au bloc est H – 68 cm.
La perte en aval du Canyon est saturée. L'eau part en rive droite et longe la paroi.
Salle à Manger 68 cm.
Siphon de la salle à Manger, eau 3 cm plus haut que la dalle et 40 cm plus haut, que le Luiro.
À la galerie Ouest 20- 30 l/s. Le siphon déverse dans la galerie. C'est la première fois que nous voyons cela. Le col est 30 m du rebord, juste en aval de la salle où il y a les sacs de plongée.
Retour SAM 67 cm à 15 h.
Aux Enfers le 2e escalier ne coule presque plus.
Barrage : niveau H – 20 cm.
En bas de la galerie Ouest on observe de la mousse de crue 40 cm plus haut que le niveau de l'eau. Aux Benjamins, le débit est voisin de 100 l/s. Je vais voir l'arrivée du ruisseau de la galerie Ouest. L'eau est bien là et la mousse de crue est à 50 cm au-dessus.

34- Mesures du 28 avril 2004 (7e campagne)
Niveau au barrage des 4 vents : H – 51 cm à 15 h 15 mn.
Luiro des Enfers environ 5 cm d'eau.
Sentier des touristes environ 3 cm d'eau.
Siphon sous la salle Saint Bruno H – 130 cm.
Salle à Manger 49,5 cm à 16 h.
Salle à Manger 48,5 cm à 17 h.

Barrage H – 53 cm à 17 h 30 mn.

35- Mesures du 5 mai 2004 (7e campagne)
Niveau de l'eau au barrage à 21 h 30 H – 60 cm.
Niveau de l'eau aux Enfers : les touristes ne se mouilleraient nulle part. Le Luiro tangenterait l'eau.
Siphon sous la salle Saint Bruno : H – 166 cm.
À la salle à Manger 43,2 cm à 22 h.
Au siphon, le Luiro est sous 15 cm d'eau environ.
Au retour, SAM 44,5 cm à 0 h.
Barrage H – 57 cm environ.
Le niveau de l'eau à la galerie Ouest est bas. Le Luiro dépasse largement (tout l'appareil est hors de l'eau qui affleure au bas de la grande dalle.

36- Mesures du 8 mai 2004 (7e campagne)
Niveau au barrage à 12 h : H – 60 cm environ.
Aux Enfers, il y a un peu d'eau mais pas sur le sentier des touristes.
À la salle à Manger 42,5 cm à 12 h 30.
Le siphon de la galerie Ouest est encore plus bas que le mercredi. L'eau tangente le bas de la grande dalle.
La salle à Manger 42 cm à 18 h 15.
Au barrage, H – 67 cm à 18 h 45.
Pascal fixe le Luirographe à 1,5 m plus haut que le niveau d'eau du 2e siphon.

37- Mesures du 9 mai 2004 (7e campagne)
Barrage niveau H – 51 cm à 15 h 45 mn.
Luiro Enfers sous 10 cm d'eau.
Chemin des touristes sous 4 cm d'eau.
Salle à Manger 50 cm à 18 h.
Barrage H – 49 cm à 19 h.

38- Mesures du 22 mai 2004 (7e campagne)
Niveau au barrage à 9 h 30 : H – 74 cm
Aux Enfers de 5 à 10 l/s d'eau à 9 h 30, eau 15 cm sous le Luiro.
Niveau SAM à 9 h 50 : 33,4 cm
Niveau à la salle à Manger : 32,5 cm à 17 h 30.
Aux Enfers 1 l/s seulement le soir à 18 h.
Niveau au barrage à 18 h : H – 75 cm.

39- Mesures du 27 juillet 2004. (7e campagne)
Mesure de débit 70 l/s.
Au barrage, la douche ne coule plus, ni le boyau du fond. Je vais en vitesse à la salle à Manger, le niveau de l'eau est de 8 cm.

40- Mesures du 5 août 2004 (7e campagne)
Le niveau de l'eau est très bas, une seule arrivée d'eau au barrage, Enfers secs, salle à Manger à 7,3 cm.
Il n'y a pas d'eau aux Benjamins. À la salle Lafforge, le débit est faible (2 l/s). L'affluent des Trois semble à 0,5 l/s. Au sommet de la cascade de 23 m le siphon donne 1 l/s environ, un petit affluent sort un peu plus loin à 0,5 l/s. Le siphon terminal donne 1 l/s environ.

41- Mesures du 11 août 2004 (7e campagne)
Niveau au barrage à 14 h 50 : H – 39,5 cm
Dans les Enfers, il y avait 6 cm d'eau avant la salle du Styx.
Salle à Manger à 15 h 25 : 53 cm au moins
Salle à Manger à 17 h 30 : 50 cm
Dans les Enfers, il n'y avait plus qu'un centimètre d'eau sur le sentier des touristes.
Barrage à 18 h : H – 52 cm
Il y a eu un gros orage la veille à 19 h sur le Vercors, qui s'est poursuivi par des pluies jusqu'à quatre heure du matin. Cela s'est traduit aux Cuves par une crue. D'après Hervé Serafin, le barrage a débordé le matin, les Enfers ont vu l'eau monter (mais peut-être pas de siphon s'amorcer, pas de mousse de crue visible). À la salle à Manger, de la mousse de crue se trouvait environ 30 cm au–dessus de la règle,(ce qui aurait donné un niveau voisin de 80 cm). Il est à peu près sûr que la galerie Ouest a fonctionné.

42- Mesures du 20 août 2004 (7e campagne)
Entrée à 7 h 20, fin vers 9 h 30.
Il a plu de 19 h hier jusqu'au matin avec des orages en début de nuit, dont le premier bien placé sur Sornin (vu de ma fenêtre). Cela représentait 65 mm dans le pot de confiture du jardin. Je suis allé voir le plus tôt possible les résultats de cette crue aux Cuves. Le Furon dépassait la poutre sur toute la longueur à 7 h 15 mn. D'après Valéry Villars habitant Sassenage, le maximum de la crue a eu lieu vers 2 à 3 h du matin.
Il y a eu une grande crue au cours de la nuit. L'eau de sortie était assez marron. Au maximum de la crue, l'eau est arrivée à 30 cm du sommet de l'escalier des Enfers. Le barrage a coulé tellement fort que l'eau était à la limite de sortir par l'entrée avec grille des touristes. Les pierres avaient été repoussées au-delà du caillebotis (donc près de l'entrée).
Quand je suis arrivé, le barrage coulait assez fort. L'accès à l'escalier vers la galerie des Tombeaux était malaisé. Aux Enfers, l'escalier était plein de mousse et l'eau atteignait le sommet de la première marche du bas de l'escalier. La perte siphonnait. Je n'ai pas essayé d'aller plus loin. L'eau se déversait du chemin des touristes vers le talweg dont le niveau était un peu plus bas.
J'ai pris des photos du barrage, des Enfers, de la Herse par le dessus, puis de nouveau du barrage et des cascades et du torrent depuis la passerelle. Je suis remonté dans les Cuves pour assister à l'assèchement du barrage. Quand je suis parti, l'eau débordait encore un peu du barrage mais on pouvait s'approcher au point de regarder le lac derrière (photos). Il était un peu plus de 10 h. La douche de la salle des Trois cascades n'était pas plus grosse que d'habitude.
Émmanuel Gondras a amené des clients dans les Cuves deux jours après cette crue. En descendant de la salle Saint Bruno vers la galerie, un des clients a remarqué la présence de mousse de crue au plafond de la galerie qu'on rejoint en balcon. Un peu plus loin, au niveau du Shunt, la mousse de crue se remarquait au sommet du gros bloc qui sert à attraper la corde à nœud. Cette observation est précieuse car c'est la première qui confirme la présence d'eau dans ces galeries sèches pour un certain niveau de crue. Elle servira à caler un modèle hydraulique.

43- Mesures du 11 septembre 2004 (7e campagne)
Niveau à la salle à Manger 10 cm
Réseau des Benjamins 0 cm, sec !
Mesures le samedi 12h30 et dimanche 4h00

44- Mesures du 26 septembre 2004 (7e campagne)
Les Trois Cascades coulent mais faiblement. Niveau à la salle à Manger 16 cm (la veille Manu Fouard a noté 17 cm). Le soir vers 17 h 30, c'est redescendu à 15 cm.
Nous admirons la mousse de crue au plafond de la galerie après la galerie du Bénitier. De même, je note de la mousse de crue 1 m au-dessus de l'endroit où on arrive dans le bas du P 13 de la galerie Ouest. Avant le premier plan d'eau de la galerie Ouest, j'observe aussi au plafond de la mousse de crue.

45- Mesures du 2 octobre 2004
Le niveau à la salle à Manger est de 8,8 cm. L'eau est redevenue limpide à la salle à Manger mais reste glauque au siphon de la galerie Ouest (visibilité 1,5 m). Le niveau au siphon est 20 cm sous la dalle.

_____

Annexe 3

code en visual basic

```
'*************************************************************************
'
'   Détermination des vagues de crue dans les Cuves de Sassenage
'
'   On démarre le calcul à l'étiage, puis on fait évoluer le débit
'   amont du siphon 2 de la galerie Ouest au cours du temps.
'   Le code calcule les débits et les hauteurs en différents endroits.
'   Les notations renvoient à la note de calcul attachée à ce code.
'
'   Code écrit en Visual Basic de Microsoft par Baudouin Lismonde le 11/11/04
'
'*************************************************************************
Sub vaguedecrueSassenage()
Dim Q0(300) As Double
Dim Q1(300) As Double
Dim Q2(300) As Double
Dim Q3(300) As Double
Dim Q4(300) As Double
Dim Q5(300) As Double
Dim Q6(300) As Double
Dim Q7(300) As Double
Dim Q8(300) As Double
Dim H1(300) As Double
Dim H2(300) As Double
Dim H3(300) As Double
Dim H4(300) As Double
Dim H5(300) As Double
'
'   Constantes du calcul
'
DT = 30#     ' pas de temps en s
IM = 299     ' nombre de valeurs temporelles
'DELAI1 = 200 ' en s, délai d'arrivée de la vague de crue à la salle à Manger
'DELAI2 = 300 ' en s, délai d'arrivée de la vague de crue aux Enfers
NJ1% = DELAI1 / DT
NJ2% = DELAI2 / DT
S1 = 250#    ' en m2
S2 = 100#    ' en m2
S3 = 400#    ' en m2
k1 = 0.23    ' en m2,5/s
k2 = 1.5     ' en m2,5/s
k3 = 3#      ' en m1,5/s
k4 = 0.15    ' en m2,5/s
k5 = 1.7     ' en m1,5/s
H1MAX = 20#  ' en m
H2MAX = 11#  ' en m
H4MAX = 10#  ' en m
Q1MAX = k1 * Sqr(H1MAX)
Q3MAX = k2 * Sqr(H2MAX)
Q7MAX = k4 * Sqr(H4MAX)
Pi = 3.1415926535
For I = 0 To IM
   Q0(I) = Q1(I) = Q2(I) = Q3(I) = Q4(I) = Q5(I) = Q6(I) = Q7(I) = Q8(I) = 0#
   H1(I) = H2(I) = H3(I) = H4(I) = H5(I) = 0#
```

```
Next I
'
'   Initialisation des débits et des hauteurs
'
Q0(0) = 0.3       ' en m3/s
Q1(0) = Q0(0)     ' en m3/s
Q3(0) = Q0(0)     ' en m3/s
Q5(0) = Q0(0)     ' en m3/s
Q6(0) = Q0(0)     ' en m3/s
Q7(0) = Q0(0)     ' en m3/s
Q2(0) = 0#
Q4(0) = 0#
Q8(0) = 0#
H1(0) = (Q1(0) / k1) * (Q1(0) / k1)
H2(0) = (Q3(0) / k2) * (Q3(0) / k2)
H3(0) = (Q5(0) / k3) ^ (2# / 3#)
H4(0) = (Q7(0) / k4) * (Q7(0) / k4)
H5(0) = 0#
'
'   Donnée de la fonction Q0(t)
'   On se la donne comme une sinusoïde de débit maxi Q0M
'
Q0M = 2#    ' en m3/s
TP = 7200   ' en s
For I = 1 To IM
   Q0(I) = Q0(0) + Q0M / 2# * (1# - Cos(2# * Pi * I * DT / TP))
Next I
'
'   Calcul itératif tout le long des conduits des Cuves
'
For I = 1 To IM - NJ2%
   'Sheets("Feuil1").Select
   'Cells(7, 1).Formula = I
   '
   '   premier nœud (méthode de Runge-Kutta d'ordre 4)
   '
   H11 = H1(I - 1) + DT / 2# / S1 * (Q0(I - 1) - k1 * Sqr(H1(I - 1)))
   H12 = H1(I - 1) + DT / 2# / S1 * ((Q0(I - 1) + Q0(I)) / 2# - k1 * Sqr(H11))
   H13 = H1(I - 1) + DT / S1 * ((Q0(I - 1) + Q0(I)) / 2# - k1 * Sqr(H12))
   H1p = Q0(I - 1) - k1 * Sqr(H1(I - 1)) + 2# * ((Q0(I - 1) + Q0(I)) / 2# - k1 * Sqr(H11))
   H1q = 2# * ((Q0(I - 1) + Q0(I)) / 2# - k1 * Sqr(H12)) + Q0(I) - k1 * Sqr(H13)
   H14 = H1(I - 1) + DT / 6# / S1 * (H1p + H1q)
   Q11 = k1 * Sqr(H14)
   If Q11 < Q1MAX Then
      H1(I) = H14
      Q1(I) = Q11
      Q2(I) = 0#
   End If
   If Q11 >= Q1MAX Then
      H1(I) = H1MAX
      Q1(I) = Q1MAX
      Q2(I) = Q0(I) - Q1MAX
      If Q2(I) < 0# Then Q2(I) = 0#
   End If
   '
   '   deuxième nœud
   '
   H21 = H2(I - 1) + DT / 2# / S2 * (Q1(I - 1) + Q2(I - 1) - k2 * Sqr(H2(I - 1)))
   Qp = (Q1(I - 1) + Q1(I) + Q2(I - 1) + Q2(I)) / 2#
   H22 = H2(I - 1) + DT / 2# / S2 * (Qp - k2 * Sqr(H21))
```

```
    H23 = H2(I - 1) + DT / S2 * (Qp - k2 * Sqr(H22))
    H2p = Q1(I - 1) + Q2(I - 1) - k2 * Sqr(H2(I - 1)) + 2# * (Qp - k2 * Sqr(H21))
    H2q = 2# * (Qp - k2 * Sqr(H22)) + Q1(I) + Q2(I) - k2 * Sqr(H23)
    H24 = H2(I - 1) + DT / 6# / S2 * (H2p + H2q)
    Q31 = k2 * Sqr(H24)
    If Q31 < Q3MAX Then
        H2(I) = H24
        Q3(I) = Q31
        Q4(I) = 0#
    End If
    If Q31 >= Q3MAX Then
        H2(I) = H2MAX
        Q3(I) = Q3MAX
        Q4(I) = Q1(I) + Q2(I) - Q3MAX
        If Q4(I) < 0# Then Q4(I) = 0#
    End If
    Q5(I + NJ1%) = Q3(I) + Q4(I)
    If Q5(NJ1%) < 0# Then Q5(NJ1%) = 1e-05
    '
    '   parcours à surface libre
    '
    H3(I + NJ1%) = (Q5(NJ1%) / k3) ^ (2# / 3#)
    Q6(I + NJ2%) = Q5(I + NJ1%) - S3 / 2# * (H3(I + NJ1%) - H3(I - 1 + NJ1%)) / DT
    '
    '   troisième nœud
    '
    If Q6(I + NJ2%) < k4 * Sqr(H4MAX) Then
        Q7(I + NJ2%) = Q6(I + NJ2%)
        Q8(I + NJ2%) = 0#
        H4(I + NJ2%) = (Q7(I + NJ2%) / k4) * (Q7(I + NJ2%) / k4)
    End If
    If Q6(I + NJ2%) >= k4 * Sqr(H4MAX) Then
        Q7(I + NJ2%) = Q7MAX
        Q8(I + NJ2%) = Q6(I + NJ2%) - Q7(I + NJ2%)
        If Q8(I + NJ2%) < 0# Then Q8(I + NJ2%) = 0#
        H4(I + NJ2%) = H4MAX
    End If
    H5(I + NJ2%) = (Q8(I + NJ2%) / k5) ^ (2# / 3#)
Next I
Sheets("Feuil1").Select
For I = 0 To IM
    Cells(I + 11, 1).Formula = I * DT / 60#
    Cells(I + 11, 2).Formula = Q0(I)
    Cells(I + 11, 3).Formula = Q1(I)
    Cells(I + 11, 4).Formula = Q2(I)
    Cells(I + 11, 5).Formula = Q3(I)
    Cells(I + 11, 6).Formula = Q4(I)
    Cells(I + 11, 7).Formula = Q5(I)
    Cells(I + 11, 8).Formula = Q6(I)
    Cells(I + 11, 9).Formula = Q7(I)
    Cells(I + 11, 10).Formula = Q8(I)
    Cells(I + 11, 11).Formula = H1(I)
    Cells(I + 11, 12).Formula = H2(I)
    Cells(I + 11, 13).Formula = H3(I)
    Cells(I + 11, 14).Formula = H5(I)
Next I
End Sub
```