

Études et mesures scientifiques dans l'embut de la Pinée

par Gilbert FERNANDES

Département: Alpes-Maritimes (commune de Cipières)
Numéro de fichier: 41-F2 · **Localisation:** col de la Sine, entre Audibergue et Calern · **Coordonnées Lambert 3:** X = 963,727
Y = 3 173,822 - Z = 1 077 · **Spéléométrie**
Dénivellation: -208 m · **Développement:** 1 740 m
Découverte: J.-L. Aubert (propriétaire de la ferme de la Pinée) en 1970 · **Géologie:** Séquanien
Contacts: EmbutDeLaPinée@speleo.fr
Gilbert Fernandes: 06 65 18 33 11
Éric Madelaine: 06 87 47 99 80

Afin de garantir le libre accès de la cavité à tous les spéléologues, les propriétaires nous ont demandé de gérer les demandes de visite (et de les prévenir). De plus, cette cavité est toujours en exploration et certaines actions (désobstruction) peuvent être incompatibles avec une visite. Avant toute visite, nous vous demandons de nous contacter afin que nous puissions vous faire part des dernières recommandations (météorologie, équipement, divers...), mais également prévenir le propriétaire. Nous pourrions également vous conseiller en fonction du nombre de spéléologues visitant le réseau (et vous éviter d'être obligés d'attendre dans les méandres où il peut être difficile de se croiser).



Entrée de la Pinée avec la ferme du même nom.
Cliché B. Hof.

Cet article établit une synthèse des études scientifiques réalisées au cours des années précédentes dans l'embut de la Pinée. Pour obtenir le détail des études réalisées, et consulter un plus grand nombre de graphiques, nous vous renvoyons vers la publication du bulletin SPST n°6, juin 2012. Toutes les données brutes des mesures réalisées sont disponibles et accessibles à tout spéléologue souhaitant poursuivre et compléter ces études.

Présentation rapide

L'extérieur

L'entrée de la cavité est située dans une cuvette, à la jonction de deux axes de vallées (l'axe nord-sud du col de Sine et l'axe est-ouest du vallon de Haute-Combe), la cavité collecte les eaux ruisselant en surface sur quelques kilomètres de rayon. La cavité fonctionne alors comme un embut lors des fortes précipitations.

De plus, les versants montagneux environnants, essentiellement orientés au nord, ainsi que sa position au bas

d'une cuvette, font du secteur d'entrée un piège à froid naturel, ce qui impacte le fonctionnement aérologique de la cavité (la température hivernale à l'entrée peut être de dix degrés inférieure à celle des sommets environnants).

La cavité

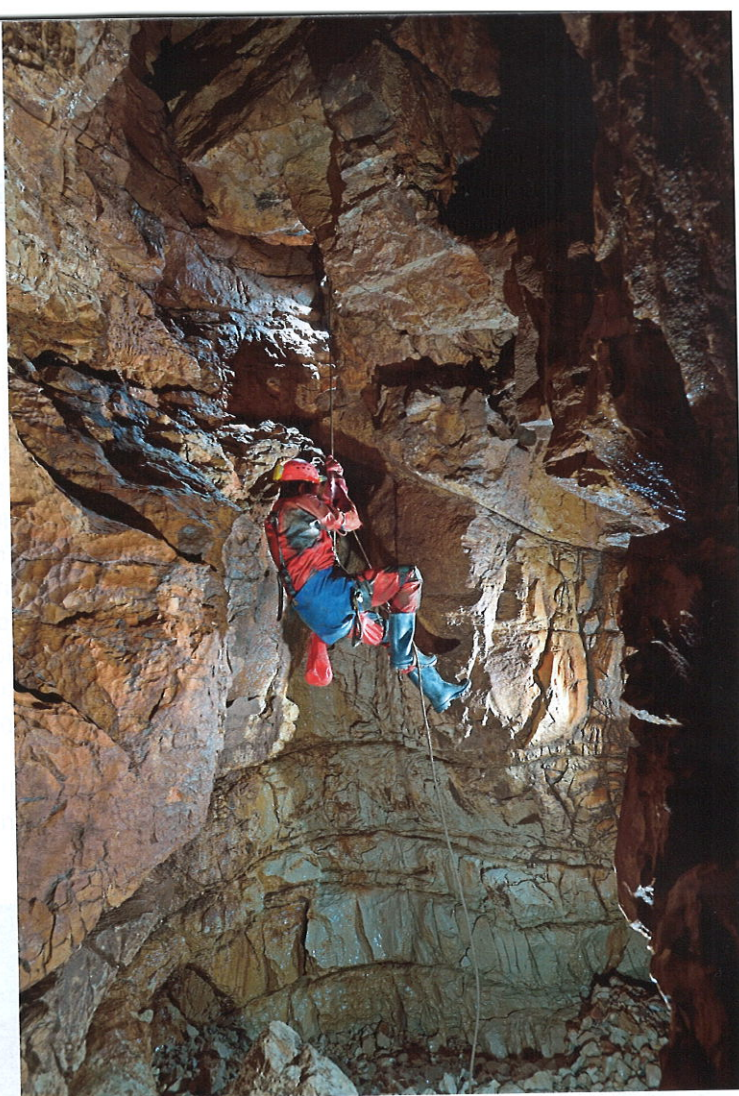
La cavité débute par un enchaînement de petits puits (< 8 m) entrecoupés de méandres. Des galeries superposées ou parallèles sont présentes, mais elles

deviennent rapidement impénétrables. Deux grands puits remontants (à -90 et -110) sont les témoins d'arrivées d'actifs fossiles dans le réseau. Les galeries se développent vers le nord, suivant le pendage des strates. Un méandre étroit creusé au profit d'une longue fracture amène au P12 (-130) qui est le point de jonction de deux autres réseaux parallèles (méandres Est et galerie du Petit Pierre, qui remontent tous deux jusqu'à -88 et -70, butant sur des étroitures).

Une dernière fracture, la galerie du Grand Black, amène à un premier petit siphon (-155) terminant le cheminement vers le nord du réseau. Mais cette galerie, juste avant le siphon, recoupe en plafond une autre galerie plus vaste orientée vers l'ouest. Cette galerie qui oblique légèrement vers l'ouest - nord-ouest montre sur son second tronçon la présence d'un anticlinal, ainsi qu'une galerie superposée: la galerie des Gavés. Cette dernière suit la direction et le pendage de la galerie inférieure, puis tourne soudainement à l'est pour prendre une pente globalement remontante, et finir sur un siphon dans un inter-strate étroit et boueux. Ce plan d'eau, hors période de crue, est une arrivée d'eau (réseau amont).

Hors crue, nous trouvons une faible circulation d'eau, provenant essentiellement du réseau Petit Pierre, du siphon des Gavés et du bas du Toboggan (situé à -160). Les pertes finales sont les siphons du Grand Black et le siphon terminal de -208. À l'étiage, les alimentations sont presque entièrement à sec.

En crue, l'entrée de la cavité est une arrivée d'eau très importante, et la cavité se met en charge sur des hauteurs significatives (70 m environ chaque année).



Remontée du P5 des Météorites. Cliché B. Hof.

Mesures des températures

Pourquoi mesurer la température ?

Dès le début de nos explorations du réseau, dans les années 2004-2005, nous nous sommes interrogés sur l'orientation à donner à nos explorations (en gros : où creuser), quelles étaient les branches les plus prometteuses pour l'exploration. Entourés par des massifs importants au sud de l'embut, nous avons été un temps déroutés de ne cheminer que vers le nord.

Le courant d'air (CA) aspirant l'hiver et inexistant l'été nous a également surpris (nous pensions être sur une « entrée basse de massif »).

Du coup nous nous sommes orientés vers l'étude aérologique de la cavité pour essayer de vérifier si nous n'étions pas passés à côté d'une « belle galerie » partant au sud.

Matériel utilisé

Nous avons utilisé un jeu de « ibuttons data logger », petits capteurs de température de chez Maxim's (<http://www.maxim-ic.com>) qui permettent de mesurer la température périodiquement, et de l'enregistrer, avant de la restituer sous forme d'un fichier sur un ordinateur. Il existe différents capteurs, avec des plages de mesures et des précisions différentes. Nous avons pu récupérer une vingtaine de capteurs que nous avons répartis dans la cavité.

Capteur de température ibutton de la société Maxim's, avec sa « chaussette » en chambre à air. Cliché G. Fernandes.

Contrôler les erreurs de mesures: la calibration

Avant de comparer les résultats des différentes mesures, nous devons prendre en compte le degré de précision des différents appareils et leurs éventuelles erreurs de mesures.

Ainsi, même si les capteurs les plus précis (DS1922L) ont un pas de mesure de 1/16 de degré (soit 0,065°C), la mesure de température fournie n'est précise qu'à +/- 0,5°C. Pour certains capteurs, une fonction de correction, prédéfinie en usine, permet d'améliorer leur précision. Pour ces capteurs, sur la plage de température qui nous intéresse, nous observons que ces corrections proposées sont inférieures à 0,1°C. Nous pouvons donc espérer (mais seulement espérer) une mesure en absolu précise à 0,1°C. Cependant, la documentation technique n'indique au mieux qu'une précision à +/- 0,5°C même après cette correction.

Il devient alors difficile d'envisager étudier et comparer les mesures fournies par les différents capteurs si ces derniers donnent des résultats variant, d'un capteur



à l'autre, de + ou - 0,5 °C pour une même valeur physique. Nous avons donc fait un test pour nous assurer que ces capteurs donnaient bien un résultat sensiblement identique lorsqu'ils étaient placés dans les mêmes conditions (c'est-à-dire à même température).

Les capteurs ont été placés ensemble durant 24 h dans une cave afin de réaliser une mesure moyenne de la température par tous les capteurs en même temps. Pour réduire les effets de micro-variation de la température (variations de l'ordre du 1/10 de degré), ceux-ci ont été placés dans une glacière (vide).

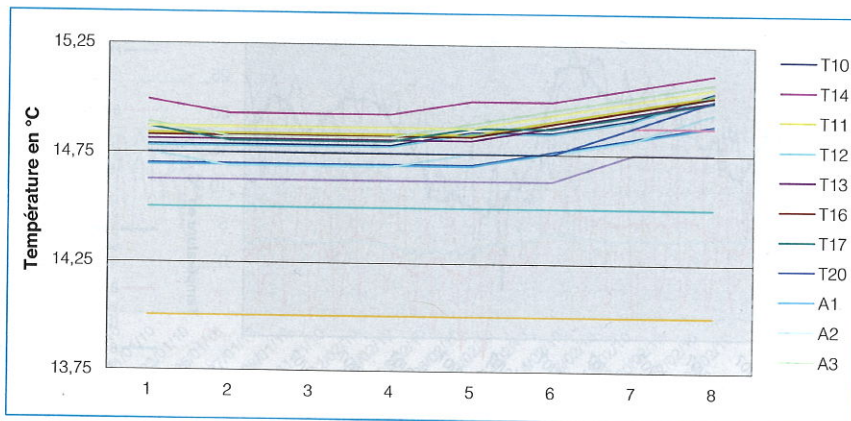
Nous avons remarqué un écart maxi de 1 °C entre deux capteurs (graphique 1), ce qui est cohérent avec le cahier du constructeur qui donne une précision de +/- 0,5 °C. En moyenne, l'écart reste très inférieur (de l'ordre de 0,4 °C) et seuls deux capteurs sortent de la norme. Nous avons alors appliqué une fonction linéaire très simple $f(x) = x + b$ pour corriger chaque capteur et ramener sa mesure à une valeur plus proche de la moyenne de l'ensemble. La valeur « b » étant différente pour chaque capteur. Après correction par les courbes de calibration du constructeur (pour ceux possédant cette fonction) et recalage linéaire des plus gros écarts, l'écart maxi entre deux capteurs n'était plus que de 0,25 degré (contre 1 °C avant correction). Enfin, les correctifs apportés par notre recalage restaient de l'ordre du pas de mesure du capteur.

Nous avons refait un test identique après la campagne de mesure (qui a duré 14 mois). Ce test a montré qu'il n'y avait pas eu de dérive du capteur dans le temps.

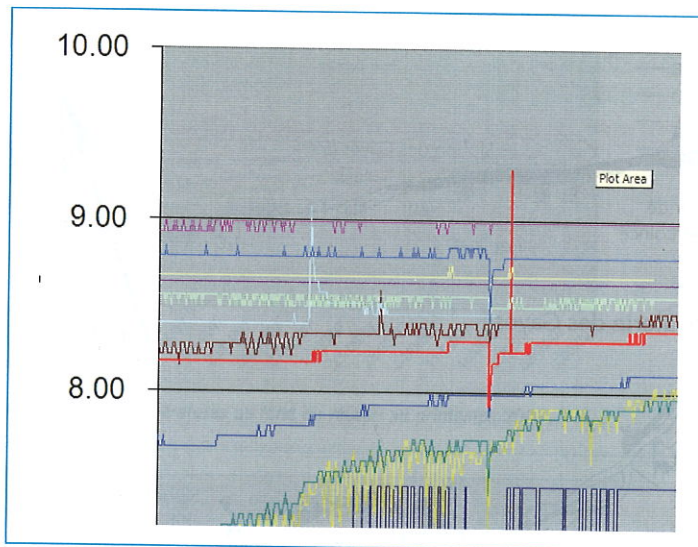
Nous avons estimé que cette correction des mesures, calculée de manière empirique, nous a permis de réduire l'erreur relative des capteurs de température entre eux; et donc d'envisager des comparaisons entre les mesures de deux capteurs pourvu que l'écart entre ces deux mesures soit bien supérieur à 0,25°. Sinon nous risquons de disserter sur des écarts de mesure, et non sur des écarts de température entre deux galeries de la cavité.

Détecter les anomalies de mesure

Un autre cas d'erreur plus rare, et difficile à détecter, est l'erreur de donnée enregistrée. Nous ne sommes pas à l'abri d'une défaillance de composant entraînant une erreur sur certains bits ou octets en mémoire du capteur, voire lors de la transmission des valeurs sur l'ordinateur.



Graphique 1 : test de calibration avant correction.



Graphique 2 : erreur mesure du 6 mai 2007.

C'est ce qui semble s'être passé sur l'un des capteurs (courbe rouge du graphique 2). Alors que sur cette période aucun capteur ne dénote une variation particulière (quelques heures avant ou après). Un unique capteur a fait un bond de 1° exactement sur une unique mesure. Il semble donc que la valeur de température de 8 degrés (0000 1000 en binaire) ait été parasitée à un moment ou un autre pour devenir 9 (0000 1001 en binaire). Ce type d'erreur reste identifiable sur de grandes valeurs numériques, mais cela devient presque indétectable pour les parties décimales.

À noter que sur la deuxième campagne de mesures (deuxième semestre 2007), ce même capteur a présenté une erreur identique (+ 1 degré) sur un unique point de mesure. Cela semble confirmer une défaillance d'un élément mémoire pour ce capteur.

Conclusion de cette phase

Tout appareil de mesure donne des résultats plus ou moins précis, car écarté de la vérité (scientifique absolue) de quelques pourcents voire dixièmes de pourcent. C'est pourquoi il est nécessaire

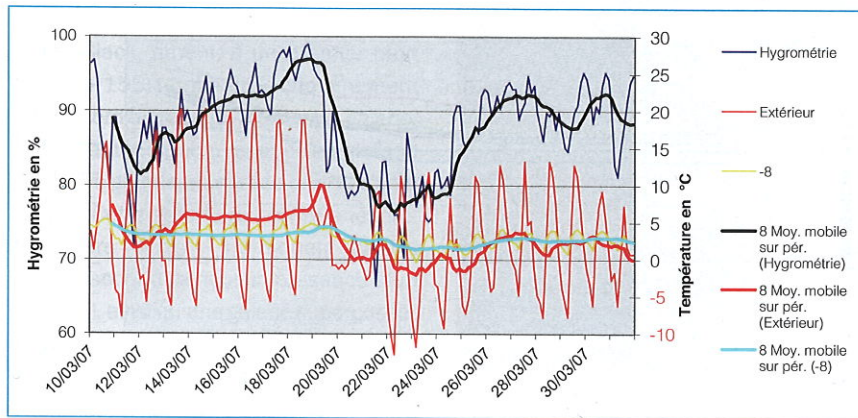
de « revérifier » régulièrement ces outils de mesure à partir de références plus précises (c'est le rôle du service des « poids et mesures » de l'État). C'est aussi ce que nous avons essayé de réaliser.

Cette campagne de calibration nous a permis de vérifier le degré de précision de nos capteurs, et même, d'une certaine façon, de l'améliorer.

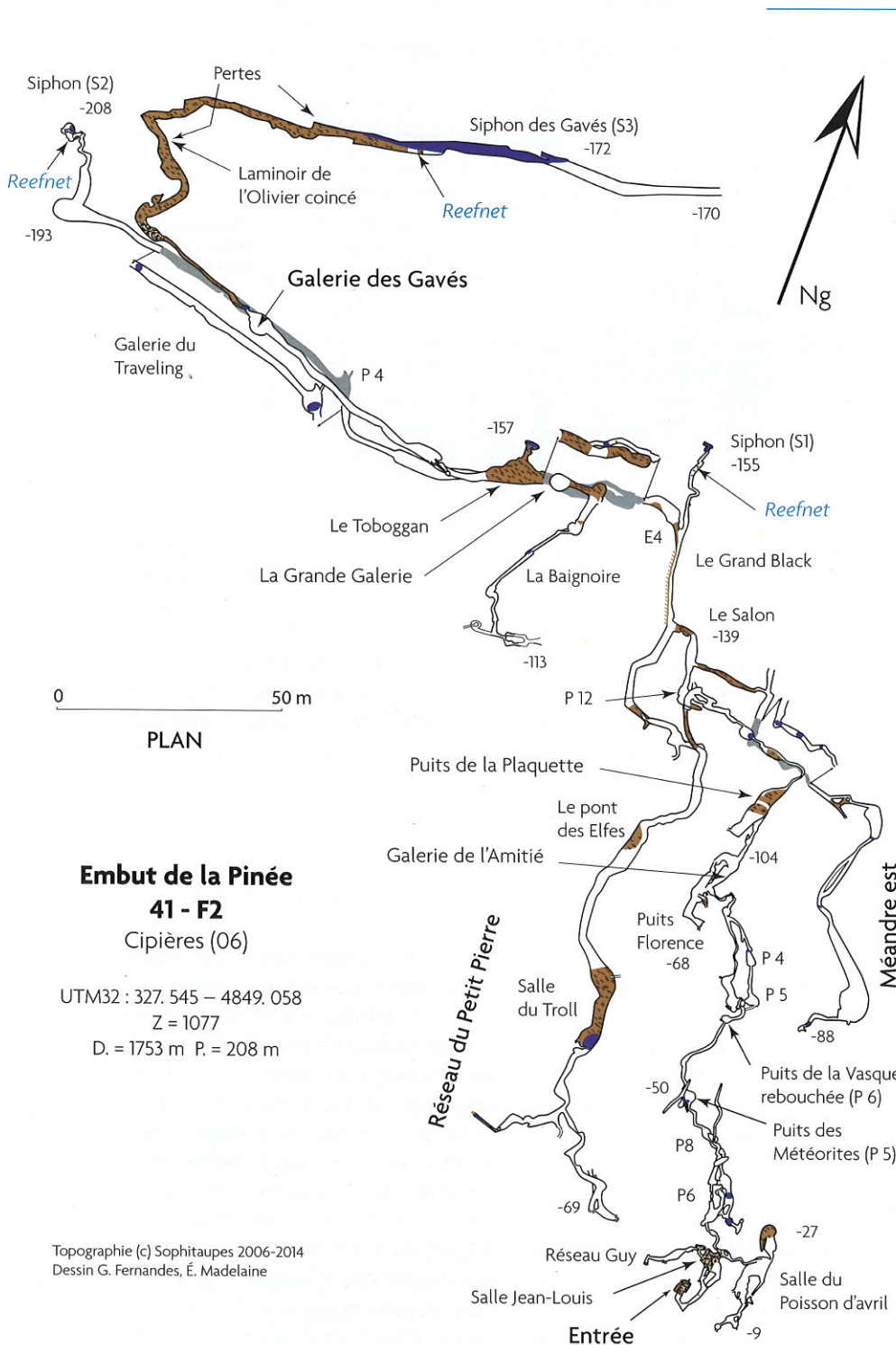
Résultats obtenus

Hygrométrie de l'entrée et sens du courant d'air

Au cours de nos explorations, nous avons observé que la cavité aspirait fortement durant l'hiver, sans pour autant avoir de courant d'air soufflant l'été (ou alors CA presque imperceptible). Nous avons supposé que les mesures d'hygrométrie nous donneraient précisément les périodes où le trou aspire (hygrométrie sèche) et celles où il souffle (hygrométrie saturée à 100 %). Mais ces mesures ont été perturbées par l'humidité relative du lieu d'installation du capteur. En effet, nous soupçonnons une couche de terre proche du capteur hygrométrique (installé dans l'entrée de la cavité) d'avoir créé



Graphique 3: hygrométrie et CA durant le printemps 2007.



Embut de la Pinée
41 - F2
Cipières (06)

UTM32 : 327.545 – 4849.058
Z = 1077
D. = 1753 m P. = 208 m

Topographie (c) Sophitaupes 2006-2014
Dessin G. Fernandes, É. Madelaine

une inertie hygrométrique, saturant l'air d'humidité après chaque période pluvieuse. L'air extérieur absorbé, lui-même régulièrement saturé en humidité (rosée nocturne, brouillard ou pluie), a également compliqué nos observations.

Néanmoins, nous avons observé des phénomènes hygrométriques intéressants

- l'assèchement des parois durant la nuit (chute de l'hygrométrie) : il serait provoqué par l'aspiration d'air extérieur froid durant l'hiver, qui au contact des parois de la grotte, plus chaude, absorberait les calories de la roche en asséchant les parois de la grotte, et en faisant chuter l'hygrométrie de l'air dans l'entrée de la cavité (première moitié du graphique 3). Durant la journée, l'air extérieur étant plus chaud, il assècherait moins les parois car les parois sont plus froides que l'air aspiré (ce sont donc les parois qui vont refroidir l'air, donc augmenter son taux d'humidité relative, tout en provoquant une condensation sur ces parois froides) ;
- l'inertie jour/nuit dans l'assèchement des parois : sur d'autres périodes (seconde moitié du graphique 3), alors que la cavité aspire durant toute la journée (observations sur site), nous avons constaté que la chute de l'hygrométrie est plus forte durant les heures chaudes de la journée, alors que l'air extérieur est plus chaud que les parois de la grotte. Cela peut paraître en contradiction avec notre observation précédente.

Nous avons alors émis deux hypothèses :

- l'inertie du phénomène d'assèchement : il pourrait s'agir d'un temps de retard entre l'assèchement des parois (qui prendrait plusieurs heures avant d'être complet et donc d'être mesuré par le capteur). Nous aurions donc un décalage entre la mesure et le déroulement du phénomène. Ce décalage, de l'ordre d'une douzaine d'heures, entraînerait cette inversion de l'observation ;
- l'air extérieur étant plus sec durant la journée, il assècherait plus la cavité durant cette période (l'air nocturne étant plus humide, voire presque saturé en humidité). Nous avons en effet observé que lorsque les creux hygrométriques sont synchronisés avec les pics de chaleur journaliers (durant l'hiver), la température moyenne sur la journée de l'air extérieur est inférieure à la température moyenne de la cavité. Ce qui signifie que la cavité est plus chaude (en moyenne sur toute la journée) et qu'elle va donc être (refroidie et donc) asséchée.

en continu. Or comme l'air extérieur est généralement plus sec le jour que la nuit (fraîcheur et rosée nocturne), il est logique que la chute de l'hygrométrie soit plus forte le jour que la nuit, car l'air aspiré est plus sec le jour que la nuit.

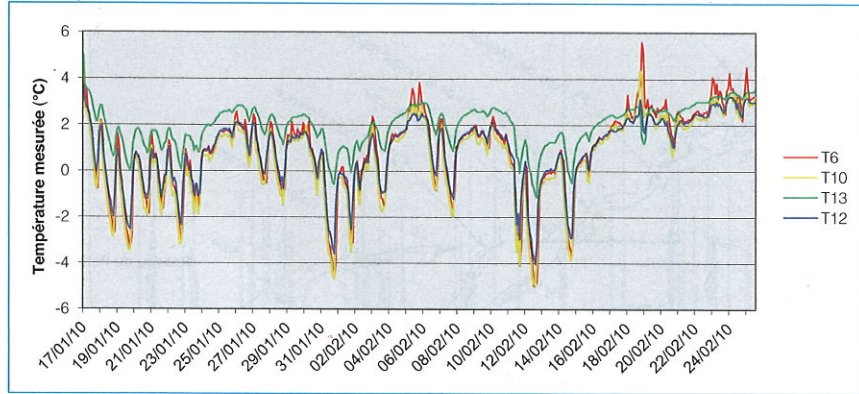
Pour départager ces deux hypothèses, nous aurions besoin d'une nouvelle campagne avec un capteur hygrométrique à l'extérieur, et un autre à l'intérieur de la cavité.

Nous nous sommes également demandé si la cavité ne pouvait pas être un simple piège à air froid (aspiration de l'air froid au sol, l'air chaud ressortant au plafond de la cavité). Certaines mesures semblant confirmer cette hypothèse, nous avons refait une série de mesures spécifiques en janvier 2010 (graphique 4) qui a montré qu'il n'y avait pas de trace de retour d'air chaud au plafond. C'est pourquoi, j'opterais pour un modèle aérologique où l'air froid circulerait fortement au sol et un peu plus faiblement au plafond. Le décalage de température sur certaines mesures, entre deux capteurs (sol/plafond) sur la première campagne, s'expliquerait par une mauvaise installation des capteurs (trop proche de la paroi). Je dirais que la cavité est uniquement aspirante l'hiver, et donc cette entrée pourrait être une entrée intermédiaire dans un réseau complexe ayant d'autres entrées (ou failles) plus haut et plus bas en altitude.

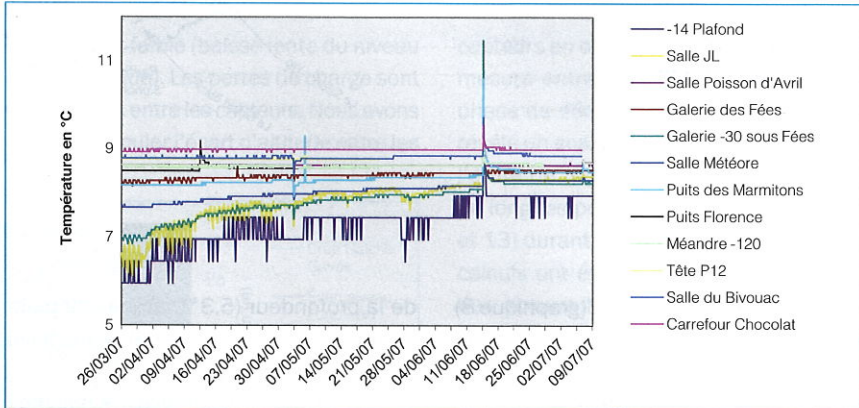
Influence de la pluviométrie

Nous avons observé que les précipitations pluvieuses entraînent une forte influence thermique dans la cavité (graphiques 5 et 6), y compris dans les galeries non actives. La température peut faire un bond de plusieurs degrés à l'occasion d'une circulation d'eau dans les galeries (lors des crues). Après la crue, la température diminue progressivement jusqu'à revenir à son niveau initial, non sans avoir conservé généralement quelques dixièmes de degré de température en plus ou en moins (suivant les pluies d'été ou d'hiver) par rapport à la température initiale de la galerie.

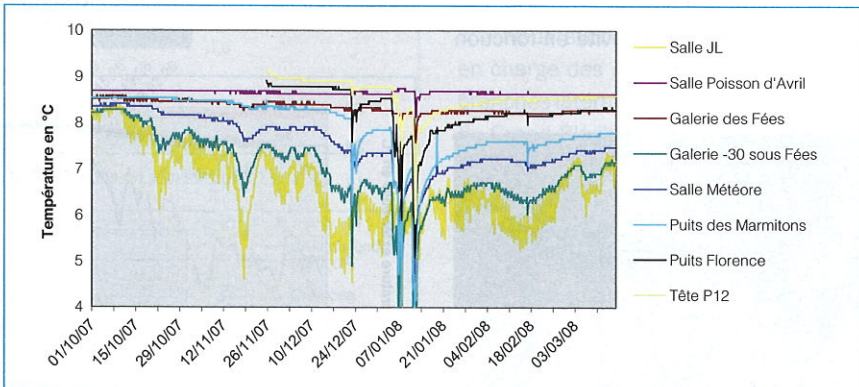
Les mesures de température de l'eau circulant dans les réseaux profonds (puits de la Plaquette, galerie Chocolat, siphon des Gavés), nous ont montré qu'en début de crue, même en hiver, avec des précipitations froides, la première vague d'eau circulant dans les galeries était plus chaude que la température moyenne de la roche (graphique 7). Ce phénomène curieux de « vague d'eau chaude » en



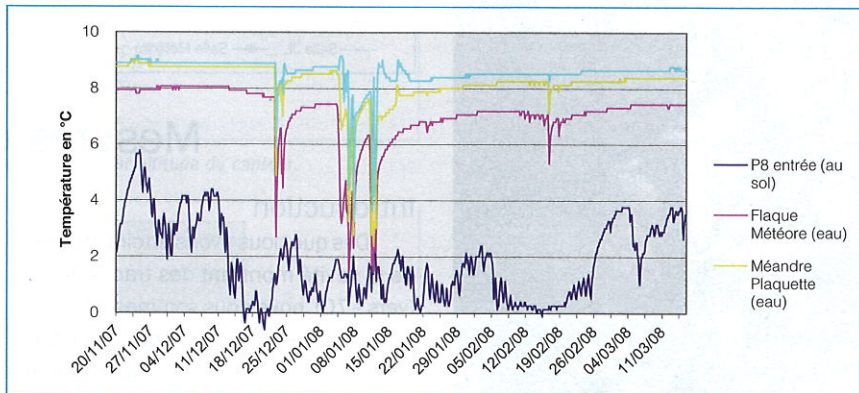
Graphique 4: températures dans le Tunnel à -14 en janvier 2010 (échelle de capteurs).



Graphique 5: températures au fond du réseau au printemps 2007.



Graphique 6: températures du fond à l'automne 2007.



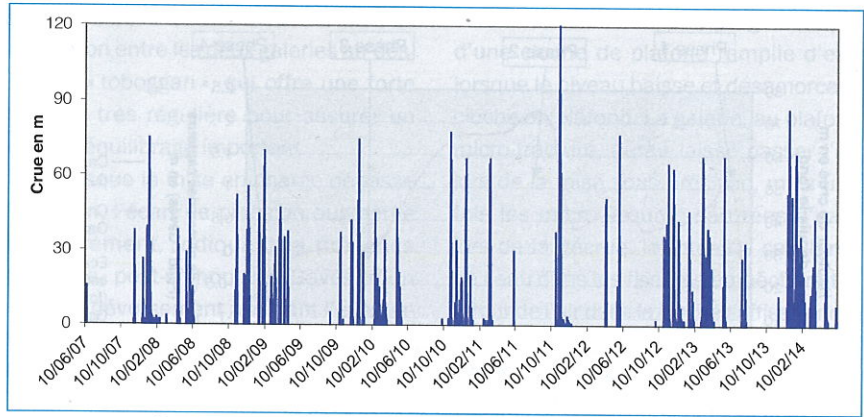
Graphique 7: températures de l'eau pour l'hiver 2007.

début de crue hivernale a également été mesuré au niveau des capteurs de crue. Cela m'incite à penser que les bassins d'alimentation de ces actifs pourraient provenir des massifs environnants, situés

plus profondément dans le karst (en épaisseur de roche calcaire) que le lieu d'installation de nos capteurs de mesure, mais située plus haut en altitude (c'est-à-dire sous les sommets environnants).

Sur sept ans de mesures, nous avons observé près d'une trentaine de crues de plus de 40 m (dont 7 supérieures à 70 m).

Les capteurs ayant été répartis dans différentes branches du réseau, il s'est posé la question de leur altitude relative afin de pouvoir comparer leurs résultats. Ainsi nous pourrions déterminer quel était le niveau d'eau le plus haut (à un même instant dans les différentes galeries), et donc dans quel sens coulait l'eau dans les galeries. La topographie s'est révélée d'une précision insuffisante, compte tenu de la distance entre les capteurs, pour caler leur altitude relative. Nous avons donc dû fixer cette altitude par une observation des mesures de crue des capteurs, et en posant une hypothèse : lors de la (fin de) décrue, la vitesse de circulation entre les



Graphique 9 : historique des crues mesurées de 2007 à 2014 par les capteurs de pression.

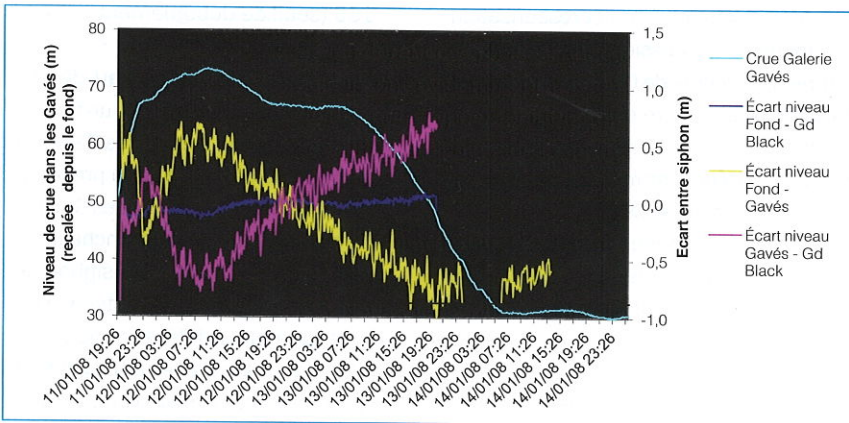
galeries est faible (baisse lente du niveau piézométrique). Les pertes de charge sont donc faibles entre les capteurs. Nous avons alors pu calculer l'écart d'altitude entre les

capteurs en observant l'écart de pression mesuré entre les capteurs durant cette phase de décrue. Les mesures nous ont révélé un écart relativement constant, de l'ordre de quelques centimètres, durant de longues périodes (voir graphiques 10 et 13) durant ces phases. Anecdote : ces calculs ont évidemment mis en lumière des erreurs topographiques en Z entre ces différents points de la cavité.

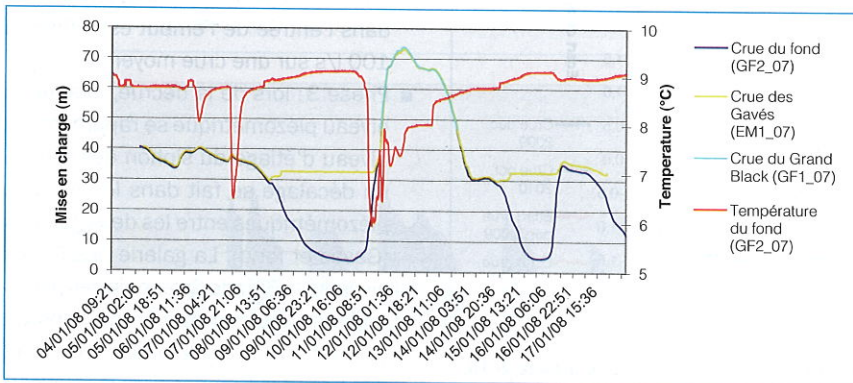
Le phénomène de mise en charge

Nous avons observé que les mises en charge des galeries situées dans les branches latérales du réseau (S1 : siphon du Grand Black, S3 : siphon des Gavés), ne se faisaient qu'à l'occasion d'une mise en charge importante du réseau depuis le fond du réseau à -208 (voir les graphiques 11 et 13). Il ne s'agit donc pas de mises en charge locales, liées à un débit trop important de l'actif qui mettrait en charge la galerie, jusqu'à ce qu'elle déborde par les galeries supérieures. Ce sont des crues qui remontent du fond de la grotte et envoient progressivement les galeries depuis le bas jusqu'en haut. Cela n'exclut pas, bien entendu, des verrouillages ponctuels de passages bas (dans la galerie des Gavés par exemple), mais confirme que la galerie du Grand Black ne se met pas en charge sans une crue de grande ampleur dans la Grande Galerie.

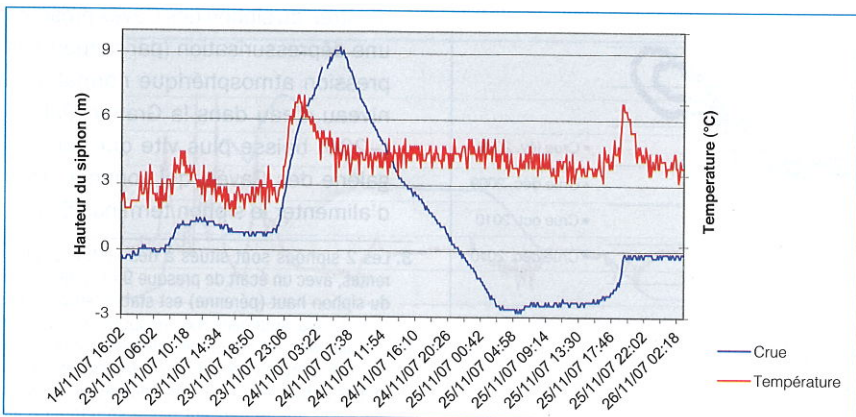
Nous pouvons donc dire que les galeries impénétrables (pour les spéléologues), dans lesquelles circulent les actifs à l'étiage et en début de crue (siphon du Grand Black, pertes de la galerie des Gavés), ont une section suffisante pour absorber le débit de crue, mais qu'un point de blocage se situe en aval du siphon terminal (S2 à -208). Ce point de blocage entraîne une mise en charge généralisée du karst (local) pouvant atteindre et dépasser les 75 m. Il reste à déterminer si ce



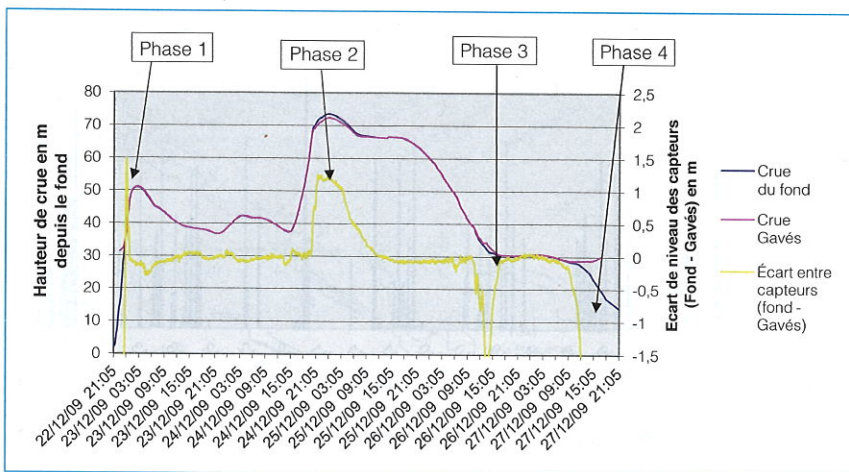
Graphique 10 : différences de niveau de crue entre tous les siphons en janvier 2008.



Graphique 11 : courbes de crue des trois capteurs repositionnées par altitude du capteur.



Graphique 12 : crue de novembre 2007 dans la galerie des Gavés.



Graphique 13: différences de niveau de crue de décembre 2009 entre le fond et les Gavés.

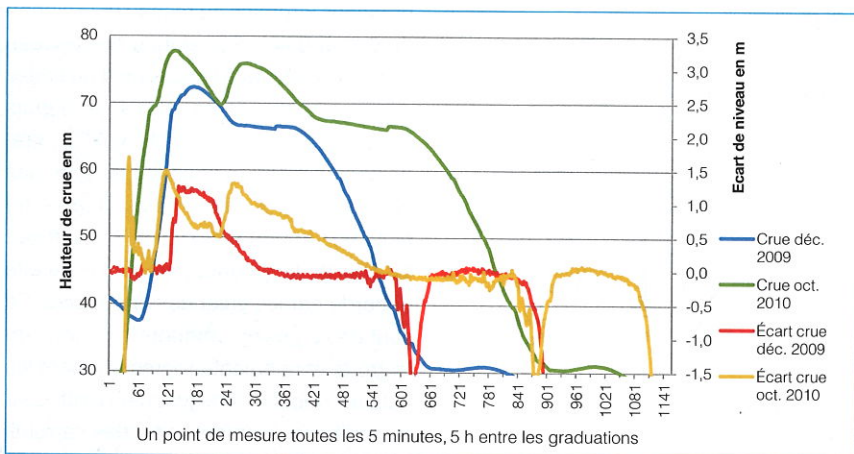
S2 est placé sur le niveau d'une nappe phréatique, ou si ce blocage est lié à une étroiture de galerie, plus loin dans le karst.

La galerie des Gavés

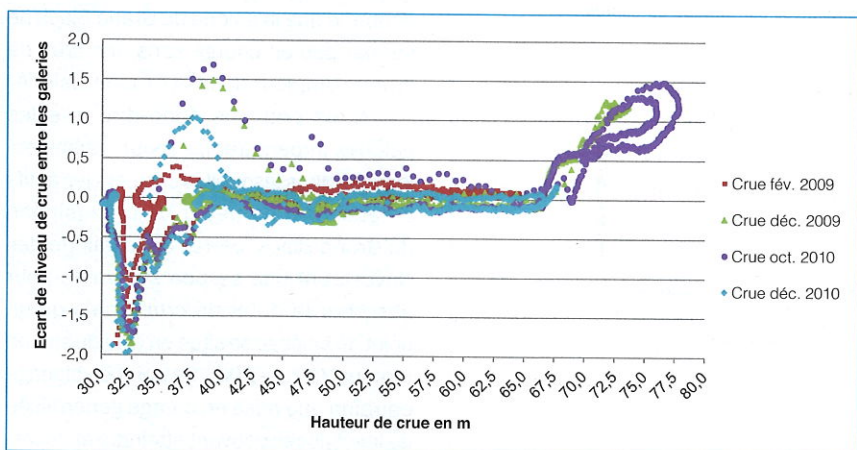
Les mesures dans la galerie des Gavés nous ont révélé la plus grosse surprise de notre étude: un phénomène de dépressurisation après les crues (graphique 11 et 12). Après la décrue, il se crée une chute de pression dans la petite galerie en cloche, suite à la baisse du niveau d'eau dans la galerie (voir la topographie en coupe,

ainsi que le schéma du phénomène dans le bulletin de club SPST n° 6).

La présence de deux siphons dans la galerie³ entraîne une dépressurisation (comparée à la pression atmosphérique extérieure) de près de 0,3 bar durant plus de vingt heures entre ces siphons, avant que le siphon temporaire ne se désamorce et que l'air extérieur ne remplisse à nouveau ce tronçon de galerie. Ce phénomène a été observé après chaque crue. La durée et l'importance de la dépressurisation variant en fonction de l'amplitude de la crue.



Graphique 14: différences de niveau de crue entre le S2 et le S3 en décembre 2009 et octobre 2010.



Graphique 15: écarts de pression par altitude.

Un autre point concerne la circulation d'eau en régime noyé dans cette galerie. L'étude de la crue d'octobre 2010 (graphique 14) nous a montré un écart de niveau piézométrique allant de 0,5 à 1,2 m durant la crue entre le capteur situé dans le siphon terminal (S2) à -208, et celui situé au fond de la galerie des Gavés (S3). En décembre 2009, nous avons eu un résultat similaire (graphique 13). Nous avons noté quatre phases durant lesquelles une circulation d'eau est prouvée entre les Grandes Galeries (de -200 à -150) et la galerie des Gavés:

- Phase 1, le début de crue: l'eau monte plus vite dans les Grandes Galeries que dans la galerie des Gavés, c'est donc elle qui va alimenter la galerie des Gavés au moins jusqu'à ce que le niveau de crue atteigne et dépasse la cote de -155 (seuil de débordement entre les deux galeries).
- Phase 2: lorsque le niveau de crue atteint ou dépasse les 66 m, un fort courant a lieu dans la galerie des Gavés qui absorbe une partie de l'eau provenant du Grand Black et des Grandes Galeries. Une surverse dans une branche inconnue du réseau (au-delà du siphon des Gavés) absorberait une partie de l'eau et expliquerait la différence de niveau piézométrique entre les deux capteurs mesurant le même plan d'eau. Le débit estimé (dans les Gavés) est alors d'environ 1 m³/s (à titre d'indication, le débit dans l'entrée de l'embut est estimé à 100 l/s sur une crue moyenne).
- Phase 3: lors de la décrue, lorsque le niveau piézométrique se rapproche du niveau d'étiage du siphon des Gavés, un décalage se fait dans les niveaux piézométriques entre les deux galeries (Gavés et fond). La galerie des Gavés alimente la Grande Galerie via des pertes impénétrables (inversion du sens du courant qui lors de la phase 1 circulait des Grandes Galeries vers les Gavés).
- Phase 4: fin de décrue, lorsque la galerie d'entrée du siphon des Gavés présente une dépressurisation (par rapport à la pression atmosphérique normale), le niveau d'eau dans la Grande Galerie (-200) baisse plus vite que dans la galerie des Gavés, qui continue donc d'alimenter le siphon terminal (S2).

3. Les 2 siphons sont situés à des altitudes différentes, avec un écart de presque 9 m. Si le niveau du siphon haut (pérenne) est stable (surverse en roche), celui situé plus bas (temporaire) a un trou d'évacuation au sol qui le vide par le bas en fin de crue. D'où sa baisse de niveau sur plusieurs mètres entraînant une « chute de pression » dans la galerie qui ne parvient pas à se remplir d'air assez vite pour compenser le retrait de l'eau.

Des traçages involontaires par des matériaux flottants ont confirmé l'hypothèse concernant le fait que la galerie des Gavés fonctionne comme une perte durant une partie de la crue.

Nous avons également noté que le profil caractéristique de la crue avec un plateau à 66 m se reproduit à toutes les grandes crues (dépassant les 70 m), ainsi que les écarts altimétriques des deux siphons (graphique 14).

Une comparaison des écarts de pression entre les galeries en fonction de la hauteur de crue (graphique 15) montre clairement une grande variabilité des pertes de charge entre galeries lorsque la crue est inférieure à 50 m (les connexions entre les deux branches de réseau sont des pertes impénétrables de petit diamètre où le débit d'eau est faible, d'où des retards de mise en charge). Entre 50 et 67 m, l'écart de pression, très constant, est quasi nul (sauf la crue d'octobre 2010).

Cela s'explique facilement par le seuil de connexion entre les deux galeries au-dessus du « toboggan », qui offre une forte section, très régulière pour assurer un débit d'équilibrage important.

Lorsque la mise en charge dépasse les 67 m, l'écart de pression augmente régulièrement, indiquant la présence probable, post-siphon des Gavés, d'un seuil de déversement assurant l'évacuation de l'eau du réseau (dans une galerie inconnue).

La purge d'une cloche de pression

En analysant finement la courbe de décrue, nous avons noté un phénomène intéressant qui se reproduit lors de toutes les grandes crues : un pic de reprise de crue, toujours à la même hauteur (graphique 16).

Ce phénomène qui se reproduit systématiquement sur des crues dépassant les 70 m, et toujours sur la même ampleur,

serait dû, selon moi, à la purge brusque d'une cloche de plafond remplie d'eau lorsque le niveau baisse et désamorce la cloche en plafond. La galerie, au plafond micro-fracturé, aurait laissé passer l'air lors de la mise sous pression, mais une fois les micro-fissures saturées d'eau, lors de la décrue, la force de capillarité de l'eau dans les fissures empêcherait le retour de l'air dans la cloche suffisamment rapidement pour abaisser le niveau d'eau (dans ce « volume pseudo-étanche ») aussi vite que dans le reste de la galerie. D'où la vidange brutale d'un volume d'eau constant qui donnerait une remise en charge partielle et temporaire de même hauteur d'une crue sur l'autre.

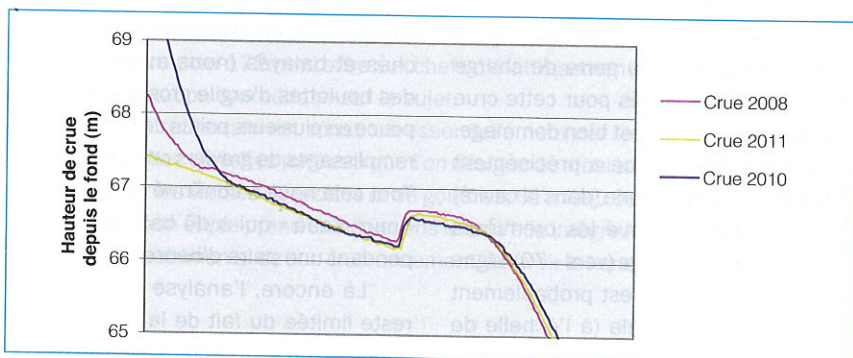
C'est ce même phénomène de porosité variable du plafond qui pourrait expliquer la chute de pression mesurée lors de la décrue dans la galerie des Gavés.

La réactivité aux crues

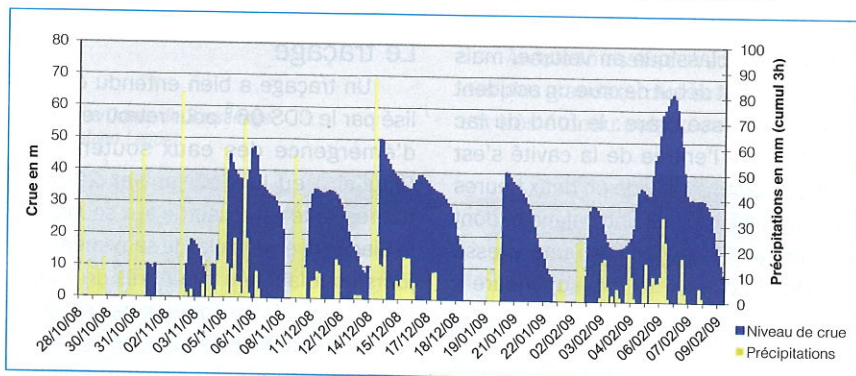
Nous nous sommes intéressés à la vitesse de mise en charge en fonction des précipitations. Mais nous nous heurtons ici à un problème de microclimat relativement délicat dans ce secteur géographique. Nous avons pu voir que les précipitations pluvieuses variaient fortement dans un faible rayon géographique (entre le secteur d'entrée et la station météorologique de Calern, distante de 5 km).

Nous avons pu tout de même rassembler quelques mesures et observations :

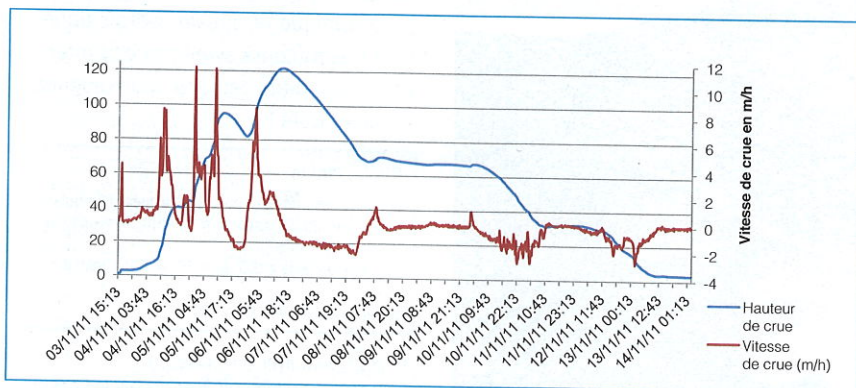
- le temps de réponse des crues (délai entre le maximum pluviométrique et le début de mise en charge) semble s'établir entre 6 et 12 h (graphique 17). Ce délai peut se réduire jusqu'à atteindre 4 à 6 h lors de certains phénomènes particulièrement violents ;
- la vitesse de mise en charge de la cavité est en moyenne (du début au pic de la crue) de 5 m/h avec des variations allant environ de 2 à 3 m/h (pour de petites crues) à 11 m/h (crues rapides). Ponctuellement (sur un quart d'heure) la crue peut atteindre 15 à 25 m/h (pluie sur neige, sol gelé) ;
- la durée des crues est courte, entre 4 à 5 jours du début de la crue, au retour à 0 (ou proche du niveau de base). Quelques épisodes pluvieux particuliers peuvent donner des crues plus longues (reprise des précipitations). La crue est en moyenne deux fois plus rapide que la durée de décrue ;
- bien que la station météorologique de Calern soit trop éloignée du bassin d'alimentation de la Pinée (problème des orages trop localisés), nous avons tout



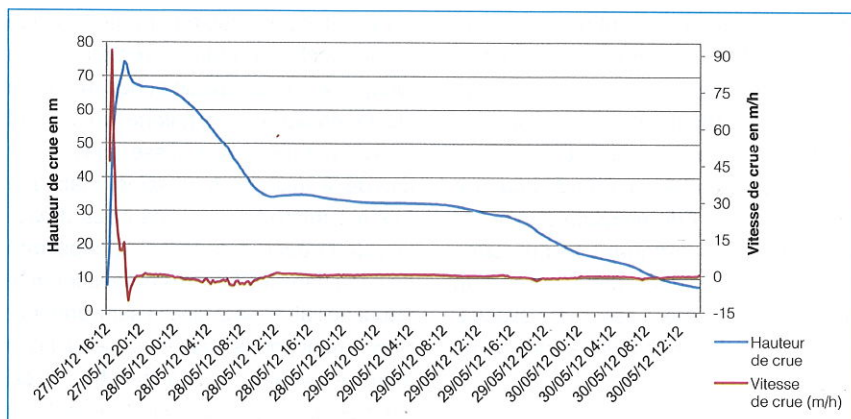
Graphique 16 : comparaison du pic lors de la décrue sur les épisodes de 2008-2010 et 2011.



Graphique 17 : précipitations sur Calern et crue à la Pinée lors de l'hiver 2008-2009.



Graphique 18 : crue à la Pinée en novembre 2011.



Graphique 19: crue à la Pinée en mai 2012.

de même pu établir une corrélation entre le niveau des précipitations mensuelles (sur Calern) et le niveau des mises en charge obtenu (graphique 17). Cette approximation grossière donne un ratio d'environ 20 m de mise en charge pour 100 mm de précipitations cumulées sur le mois. Ce chiffre varie bien sûr en fonction de la saison.

Les crues exceptionnelles

Alors que nous pensions tout connaître de l'hydrologie de cette cavité et de ses crues, et que nous avions réduit le périmètre de nos observations, la saison 2011-2012 nous a apporté deux crues exceptionnelles bouleversant nos certitudes :

- la crue de novembre 2011 montant à plus de 121 m (graphique 18) ;
- la crue de mai 2012 montant en 2 h contre 2 jours, avec un pic de vitesse à 90 m/h (graphique 19).

La crue de novembre 2011 s'inscrit dans un vaste phénomène exceptionnel de pluviométrie ayant entraîné de nombreuses inondations et débordement de cours d'eau autour des villes de Cannes-Grasse. Le site hydro.eaufrance.fr⁴ indique pour cette période des débits (de crête)

cinquantennaux à centennaux pour la Siagne (suivant le point de mesure), cinquantennaux pour le Loup et centennaux pour la Brague. Cela donne une idée de l'amplitude du phénomène pluvieux. L'embut de la Pinée étant situé au cœur de ces bassins versants, nous pouvons estimer que la crue observée serait en gros une crue cinquantennale. N'ayant plus qu'un unique capteur dans la cavité, nous ne pouvons calculer la perte de charge de la galerie des Gavés pour cette crue exceptionnelle, ce qui est bien dommage.

À noter que la crue a précisément atteint le niveau de galerie (dans la cavité) où nous avons observé les premières traces de mise en charge (vers -70), signe que ce phénomène n'est probablement pas aussi rare que cela (à l'échelle de quelques centaines de milliers d'années).

La crue de mai 2012 est toute différente. Le phénomène pluvieux est relativement classique en volume, mais il y a eu en tout début de crue un accident géologique assez rare : le fond du lac de retenue à l'entrée de la cavité s'est percé, et le lac s'est vidé en deux heures dans la cavité comme une baignoire dont on retirerait la bonde ! D'où une vitesse de mise en charge dix fois supérieure à



Trou ouvert dans la prairie en surface lors de la crue de mai 2012. La buse en béton à gauche est l'entrée de la cavité. En très forte crue, l'eau déborde par le haut dans l'embut. Cliché P. Mazoué.

la normale. À l'issue de la crue, un trou vertical d'un mètre de diamètre reliait la prairie à la salle d'entrée (ce trou s'est élargi à chaque nouvelle crue avant son comblement par le propriétaire du champ). Une visite post-crue a montré des traces de mise en charge à chaque étroiture et dans les méandres, parfois sur plus de deux mètres de haut. Des remplissages d'argile sur grande épaisseur ont été arrachés et balayés (nous avons retrouvé des boulettes d'argile grosses comme le pouce en plusieurs points de la cavité), des remplissages de graviers ont été déplacés. Tout cela nous a confirmé la violence du « mur d'eau » qui a dû balayer la cavité pendant une paire d'heures.

Là encore, l'analyse des mesures reste limitée du fait de la pauvreté des données (un seul capteur avec un pas de mesure à quinze minutes).

Le traçage

Un traçage a bien entendu été réalisé par le CDS 06⁵ pour retrouver le lieu d'émergence des eaux souterraines. Celui-ci a eu lieu en janvier 2008, la fluorescéine est ressortie aux sources de la Siagne avec un délai de seulement cinq jours pour la Pinée (pour près de 7 km à vol d'oiseau). À noter que l'embut se trouve sur les versants géographiques du Loup, mais alimente hydrologiquement la Siagne. Ce qui montre bien que bassin versant géographique et bassin hydrologique ne sont pas toujours symétriques en terrain karstique, mais cela les spéléologues le savaient déjà !

Bibliographie

- Six pieds sous terre, n°6 », numéro spécial Embut de la Pinée, juin 2012, disponible ici <http://www.sop.inria.fr/agos/sis/Publis/>
 Spéleo magazine n°85, avril 2014, TGT L'embut de la Pinée.
 Bulletin CDS 06 n°11, mai 2015.

4. <http://www.hydro.eaufrance.fr/>

5. Opération soutenue et financée par le Conseil général des Alpes-Maritimes.

Lac en surface lors de la crue de novembre 2011. Le lac est pratiquement vidé (fin de crue de surface), mais au même moment la crue dans la cavité atteint son maximum (121 m). Cliché B. Hof.

