

LE KARST FRANC-COMTOIS

Catherine BERTRAND et Jacques MUDRY
 UMR Chrono-environnement, 16 route de Gray, Université de Franche-Comté
 25030 Besançon cedex

Résumé

Le Jura a donné son nom au système jurassique (-200 à -45 millions d'années). Il est caractérisé par la puissance de ses calcaires, séparés par des séries marneuses. La dissolution des roches calcaires fracturées produit un relief particulier : le karst. Dans ces fractures, l'eau d'infiltration alimente des nappes drainées par des conduits karstiques aboutissant à de grandes sources. La circulation rapide depuis la surface implique une recharge facile, mais aussi une grande vulnérabilité de ces ressources. De nombreuses agglomérations utilisent cette ressource en eau destinée à la consommation humaine avec un mode de protection adapté à cette vulnérabilité. Si l'exploitation et la protection des eaux karstiques sont soumises à des conditions propres à ce milieu, les travaux d'infrastructure et d'aménagement sont également dépendants de l'hétérogénéité du karst.

1- Karst et lithologie

Le petit Larousse définit le karst comme l' « ensemble des formes superficielles et souterraines engendrées par la dissolution de certaines roches, en particulier les roches calcaires ». Cette définition requiert des conditions géochimiques particulières : eaux agressives (eaux chargées de gaz carbonique capables de dissoudre des calcaires) et roches solubles (carbonates). Ainsi la Franche-Comté, se prête à merveille au développement de la karstification :

- la grande extension des affleurements calcaires, particulièrement les couches du Dogger et du Malm, séries-type ayant permis la définition du système jurassique,
- sa végétation, son abondante pluviosité ont permis le développement de sols producteurs de gaz carbonique (CO₂), dont l'hydratation et l'ionisation produisent l'acide carbonique (H₂CO₃), principal moteur du processus de dissolution des roches carbonatées.

Quelques autres formations carbonatées peuvent constituer localement de petits systèmes karstiques telles que la Dolomie Moellon, les calcaires du Muschelkalk et du Sinémurien, intercalées dans les argiles triasiques ou les marnes liasiques, les calcaires du Berriasien, du Valanginien, de l'Hauterivien et du Barrémien dans la base du Crétacé (Fig. 1).

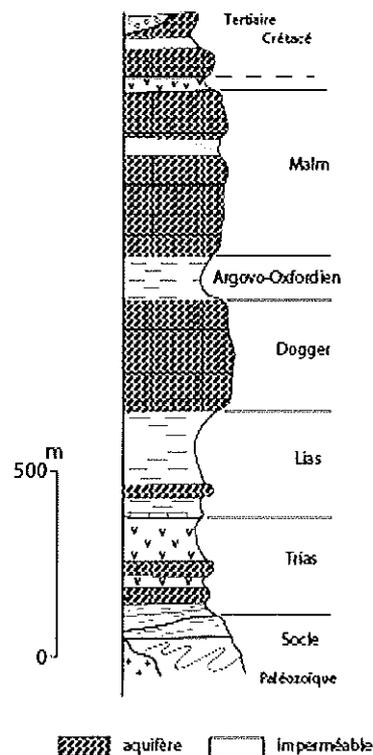


Figure 1 : lithologie et aquifères karstiques

2- Karst et géomorphologie

Dans la morphologie karstique, on distingue l'exokarst ou formes visibles en surface, et l'endokarst, formes

souterraines (Fig. 2 et Rosenthal, 1985). Dans le massif jurassien, quelques sites touristiques remarquables sont liés au développement du karst (Fig. 3) :

- les gorges et les reculées, « vallées closes », interprétées comme une forme d'érosion régressive des amonts de vallées en zone tabulaire. Les sources karstiques qui naissent sont généralement au contact d'une série calcaire (Dogger ou Malm) avec la série marneuse sous-jacente (Lias ou Oxfordo-Argovien, respectivement).

- Les cavités souterraines, grottes et gouffres, sont nombreuses en Franche-Comté. Les plus nombreuses, accessibles aux seuls spéléologues, peuvent attirer des amateurs parfois de loin. Ainsi le karst du Verneau, entre Déservillers et Nans-sous-Sainte-Anne, constitue-t-il un karst renommé pour la longueur de son réseau (32 km, 387m de dénivelée, Chorvot, 1985) et par son niveau de difficulté d'exploration (voûtes mouillantes, siphons). Quelques grottes aménagées pour le tourisme mettent en valeur le patrimoine karstique du massif jurassien. Ainsi la grotte des Moidons, sur le plateau de Lons-le-Saunier. Les grottes actives des Planches près d'Arbois, de Baume-les-Messieurs, d'Osselle permettent d'observer des rivières souterraines. L'immense salle du gouffre de Poudrey près d'Étalans (2 millions de m³) permet l'observation de l'eau qui s'infiltré sous le plateau de Verceil.

- Une curiosité du karst de la vallée de la Loue : le Puits de la Brême. En contrebas du CD 67, entre Tarcenay et Ornans, un chenal naturel relie le ruisseau de la Brême avec le Puits de la Brême, gouffre noyé. En période de basses eaux, une partie du ruisseau se perd dans le gouffre. En période de hautes eaux, le Puits de la Brême devient émissif, et le chenal alimente le ruisseau. Un tel phénomène de cheminée d'équilibre sur les circulations souterraines du karst est appelé « inversac » ou « estavelle ». Le Puits de la Brême a fait l'objet d'un traçage en basses eaux, qui démontre son appartenance au système sourcier Maine-Ecoutot-Moulin des Isles, qui est l'exutoire majeur du plateau de Verceil et de la bordure de la Haute-Chaîne (Passonfontaine, Valdahon, Epenoy...). La source du Maine, exutoire principal de l'ensemble, apparaît sur la rive droite de la Loue, dans le parc du château de Cléron.

- Les sources karstiques, généralement appelées abusivement « résurgences ». La définition d'une résurgence repose sur le fait que l'eau qui y sourd ait déjà ruisselé en surface avant de se perdre dans les calcaires. Ainsi, la Loue, résurgence mythique des pertes du Doubs entre Pontarlier et Maisons-du-Bois, ou le Lison, résurgence des pertes du Lemuy et du Lison du Haut. Mais dans le bilan de la Loue, seulement 15 % du débit provient des pertes du Doubs, alors que le reste provient de l'infiltration diffuse sur le plateau de Levier et la bordure de la Haute-Chaîne. Dans le cas du Lison, 25 % du débit seulement provient des pertes de ruisseaux (Lemuy, Lison-du-Haut).

A l'inverse, les « exurgences » sont définies comme des

sources exclusivement alimentées par l'infiltration diffuse des précipitations. Il existe donc d'authentiques exurgences, comme la source du Doubs à Mouthe, la source Bleue à Montperreux ou la source de la Mouillère à Besançon. Les plus beaux sites sourciers de Franche-Comté se rencontrent surtout dans les départements du Jura et du Doubs. Dans le Jura, la source de l'Ain émerge dans un endroit champêtre, les sources du Dard à Baume-les-Messieurs déposent du tuf dans une cascade.

La source de l'Enragé sort dans la cour d'une usine de Molinges, mais le manque de romantisme du lieu ne doit pas faire oublier qu'ici émerge le plus long trajet mis en évidence par traçage en Franche-Comté. On savait que l'Enragé drainait la perte du lac de l'Abbaye, mais un traçage datant de 1965 a démontré que cette source drainait le Grandvaux depuis le nord de la RN5 à Saint-Laurent, sur environ 30 km (DREAL, site internet).

Dans le Doubs, les sources des reculées de la Reverotte et du Dessoubre donnent de jolis dépôts de tufs, les sources Bleue et Noire du Cusancin attirent elles-aussi des visiteurs. La source du Doubs est l'un des exutoires principaux du massif du Risoux, la partie nord-orientale (Mont d'Or) étant drainée par les sources apparues lors du creusement du tunnel ferroviaire (1910).

- Les sites karstiques les plus impressionnants sont les sources de la Loue et l'ensemble sourcier du Lison.

Les sources de la Loue comprennent trois sorties principales, l'une qui forme la vasque, les deux autres étant situées dans les canaux passant sous le pont. L'ensemble sourcier du Lison comprend la source principale (vasque), son trop-plein la Sarrasine, émergeant au pied d'une falaise en coupole, en contrebas de la grotte éponyme, ainsi que le Creux Billard, un regard sur une des circulations aboutissant au Lison.

- Il existe des sources intermittentes qui sont visibles ailleurs dans le massif jurassien : Syam, Noirecombe (commune de Cinquétral), vallée de l'Abîme (commune de Saint-Claude)

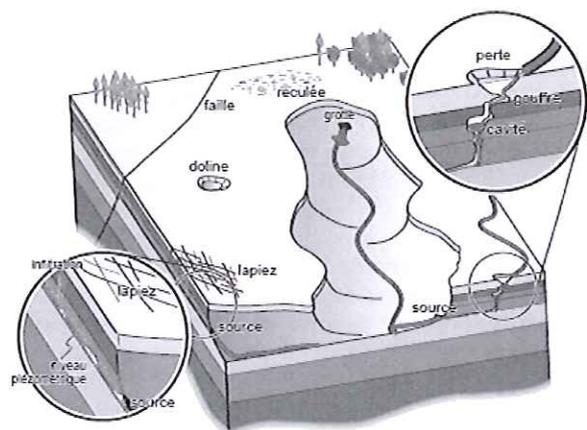


Figure 2 : Modelé karstique

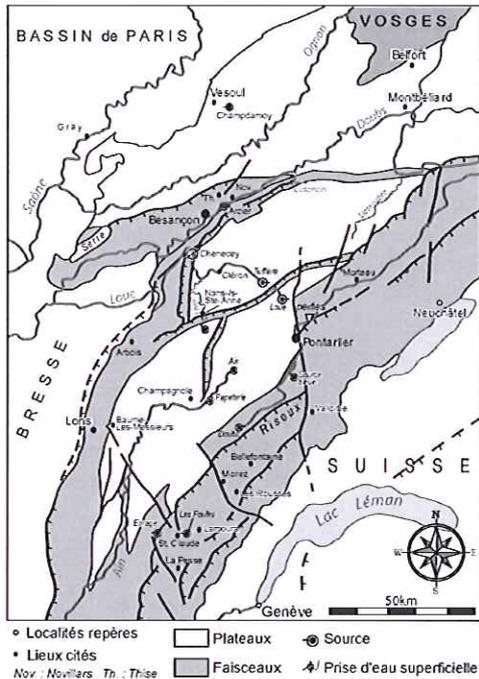


Figure 3 : Localisation des sites karstiques franc-comtois

3- Karst et aquifères

Les karsts francs-comtois, grâce à la lame d'eau importante reçue chaque année hydrologique, qui varie d'environ un m en plaine à plus de 2 m dans le Haut-Jura, sont abondamment alimentés.

Cependant, leur comportement hydraulique et leur valeur comme aquifère n'est pas identique. Dans la Haute-chaîne, entièrement plissée, le rayon de courbure des « pièges » hydrogéologiques est serré, les pentes sont fortes, et c'est ici que les précipitations sont les plus abondantes. L'eau qui rentre dans la nappe karstique en sort donc très rapidement, et les eaux des réserves, qui s'écoulent seules en basses eaux, n'ont en moyenne pas plus d'un ou deux ans. Tel est le cas de la source Bleue (Montperreux), de la source du Doubs ou de l'Enragé. A l'opposé, les sources des plateaux drainent des aquifères à grand rayon de courbure, aux pentes faibles (hormis sur les flancs de vallées), et ces zones sont en moyenne moins arrosées. Les eaux d'étiage ont en moyenne séjourné de 5 à 10 ans dans les réserves de systèmes tels que la Glantine (reculée de Poligny), le Dard (reculée de Baume-les-Messieurs) ou Arcier. Bien sûr, lors des crues, des eaux de pluie peuvent parvenir à ces sources en quelques heures seulement.

4- Karst et vulnérabilité

Le karst est, de par sa nature d'aquifère hiérarchisé, intrinsèquement vulnérable (Fig. 4) :

- les affleurements calcaires sont peu protégés des aléas de surface du fait de la faible épaisseur des sols sur

calcaire, tant le sol organique (le sol des agronomes) que le sol minéral (le sol des géotechniciens) ;

- les karsts ont des modes d'alimentation différenciés (voir partie résurgence, exurgence). Si l'alimentation diffuse ne fait craindre que les effets de la pollution diffuse (engrais chimiques ou sous-produits résiduels de l'élevage), l'alimentation par engouffrement de cours d'eau rend très vulnérable le drain qui relie cette perte à la source. En outre, l'existence d'un cours d'eau de surface qui se perd signifie souvent, dans le massif jurassien, un ruissellement sur des marnes (glaciaires, oxfordiennes, liasico-triasiques). L'aquifère karstique est donc sujet à une importante turbidité pendant les crues. Cette turbidité est en général un vecteur des polluants les plus variés : minéraux (métaux lourds), organiques (solvants, hydrocarbures, pesticides, dioxines...), microbiologiques (protistes, bactéries, virus) ;

- l'existence de vitesses de circulation des eaux, de plusieurs dizaines ou centaines de mètres par jour, démontrées par les résultats des traçages d'essais, démontre une vulnérabilité interne de ce type d'aquifère, inhérente aux conduits préférentiels qui drainent le massif à la manière d'un réseau hydrographique tridimensionnel. Là où il faudrait un an à de l'eau pour parcourir 1 km de nappe alluviale, il lui faut un jour pour parcourir la même distance dans un massif karstique ;

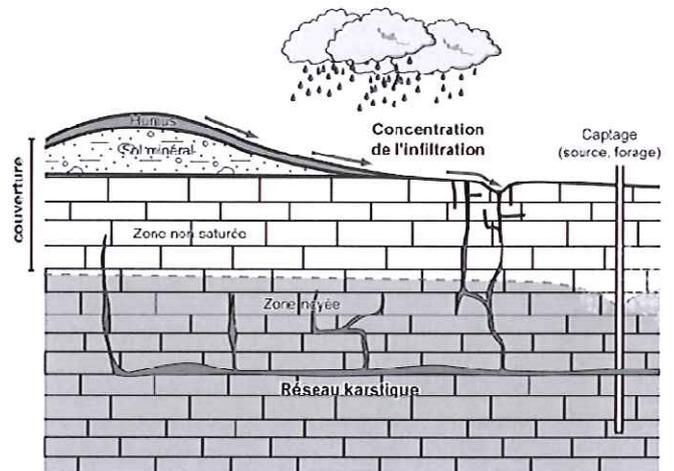


Figure 4 : facteurs de vulnérabilité des aquifères karstiques

5- Karst et alimentation en eau, destinée à la consommation humaine

Haute-Saône

La Font de Champdamoy à Quincey alimente la ville de Vesoul depuis 1967 et distribue son eau à près de 30 000 personnes. C'est donc une ressource stratégique pour l'ensemble du territoire avec un débit de 8000 m³/j. La Font de Champdamoy est une source de type karstique. Son bassin d'alimentation se caractérise par une quasi-absence de cours d'eau de surface et un réseau souterrain complexe qui draine les eaux jusqu'à la source située sur la commune

de Quincey (Nicod, 2010). Cette source a un bassin d'alimentation pour moitié forestier, pour moitié agricole ce qui fragilise cette ressource.

Doubs

De nombreuses communes sont alimentées par le captage de petites sources épikarstiques. Sourdant généralement au pied de reliefs boisés, ces exutoires sont naturellement protégés, bien que très vulnérables (Chauve, 2006). Le problème de ces petits captages est leur faible débit d'étiage, ce qui a obligé les collectivités consommatrices à mettre en place des alimentations de secours à partir des communes ou des syndicats voisins.

La ville de Besançon est un cas d'école d'alimentation diversifiée, avec un rôle central du karst. Depuis le deuxième siècle après Jésus Christ, sous le règne de Marc Aurèle, Vesontio dérive les eaux de la source karstique d'Arcier (Mettetal, 1985). La maçonnerie de l'aqueduc est encore visible entre la source et la porte Rivotte, et le castellum divisorium (répartiteur de débit) peut être visité dans les vestiges archéologiques du square Castan. En France, c'est le seul encore existant avec celui de Nîmes. L'aqueduc romain, fuyard, a été refait au XIX^e siècle, et alimente toujours la vieille ville. La croissance de Besançon au XX^e siècle a imposé dans un premier temps le captage des eaux alluviales (Prés-de-Vaux, Thise), abandonné rapidement à cause de la médiocre qualité de l'eau captée, puis deux projets plus durables :

- le captage de la Loue au fil de l'eau à Chenecey-Buillon (1969), dont le débit et la qualité dépendent en grande partie des eaux karstiques dans le bassin versant,

- la réalisation de champs captants sur l'aquifère karstique de la forêt de Chailluz (Thise, Chailluz). L'intérêt de cette ressource est d'une part, son indépendance par rapport à l'aquifère d'Arcier, très utile en cas de pollution de ce dernier, d'autre part par le fait qu'il n'y a pas d'habitant sur l'impluvium de Chailluz. Le seul aléa du bassin d'alimentation de Chailluz est l'autoroute A36 qui le traverse.

La ville de Besançon mettra en exploitation une nouvelle ressource des calcaires du Jurassique moyen au nouveau forage de Novillars en 2012 ce qui diversifiera encore plus les ressources de la ville. Ces forages de 80 m de profondeur ont un débit d'exhaure de plus de 15 000 m³/jour d'une eau sans aucune trace de contamination qu'elle soit bactériologique ou physico-chimique. Par ailleurs, cette ressource en eau, exceptionnelle tant en quantité qu'en qualité, est déjà exploitée depuis le début du siècle par les Papeteries de Novillars et plus récemment par les syndicats de Thise et de Clerval.

Jura

La ville de Lons-le-Saunier est en partie alimentée par les sources des reculées situées sur les communes de Conliège

(Sources de la Culée, Chevrault et de la Diane) et de Revigny (sources de la Doye et de la Cheille). Ces sources ont respectivement des débits moyens de 4 600 m³ et de 14 000 m³/j. La source de la Papeterie à Sirod est captée par le Syndicat du Centre-Est, qui dessert 61 communes des plateaux, dont la ville de Champagnole. Cette source est l'exutoire permanent de l'aquifère dont la source de l'Ain est le trop-plein, qui tarit en période d'étiage. Les volumes distribués moyens sont de 4 500 m³/jour, avec des pointes à 7 500 m³/jour.

Saint-Claude est alimentée par les sources des Foules (débit : 1 400 m³/jour) et de Montbrilland (débit prélevé : 2 800 m³/jour), exutoires d'un vaste secteur qui s'étend des Jouvencelles (commune de Prémamanon) à Septmoncel, et qui inclut le secteur de la Combe du Lac de Lamoura

Afin de parer à une défection des sources des Foules et de Montbrilland, qui en cas de pollution seraient atteintes ensemble, la ville de Saint-Claude dispose d'une alimentation de secours au fil de l'eau sur la rivière Flumen, mais qui risque aussi d'être atteinte dans le cas d'une pollution sur les Foules et Montbrilland. Une étude récente a évalué la faisabilité d'un captage de la source karstique du Bief Noir, qui écoule les eaux infiltrées dans le karst de la région des Moussières, qui est donc indépendante du système Foules-Montbrilland.

6- Karst et protection de la ressource en eau

La source d'Arcier est un exemple d'exutoire difficile à protéger. Dans le passé, des épidémies de typhoïde ont frappé la population de Besançon : en 1832 et suivantes, 1886 (épidémie grave), 1893-1894, 1901, 1903.

Le 25 juin 1903, le Docteur L. BAUDIN écrit :

Supposé qu'il existe à ce moment, sur le plateau, dans tel ou tel village, comme Nancray, ou Saône, se lavant dans un ruisseau tributaire d'Arcier, un ou plusieurs cas de fièvre typhoïde, et l'on comprendra avec quelle facilité les germes infectieux, contenus dans les selles du ou des malades et déversés sur les fumiers, dans les lavoirs, aux abords des habitations, vont être entraînés aux ruisseaux; de là aux entonnoirs, puis à Arcier et à Besançon : le mécanisme est simple, fatal en quelque sorte. — Aussi, depuis 1886, chaque fois qu'explose sur le réseau d'Arcier une bouffée de cas épidémiques, nous courons au plateau où, inévitablement, nous relevons les cas générateurs de l'épidémie, dans des conditions de date et de topographie absolument probantes : toujours ces cas ont précédé les premiers cas signalés à Besançon de plusieurs semaines, et toujours les premiers cas signalés à Besançon ont été précédés, en outre, d'un trouble de l'eau d'Arcier, avec crue microbienne colibacillaire, antérieur de douze à quinze jours à leur apparition, - précisément l'intervalle de temps nécessaire à l'incubation de la maladie.

Aujourd'hui, l'élimination de la turbidité et la désinfection à la station de traitement de la Malate permet une alimentation sécurisée de la ville à partir de l'eau d'Arcier.

La protection des ressources de Saint-Claude, très vulnérables consiste en l'utilisation de périmètres satellites tracés autour des points les plus sensibles (pertes de cours d'eau, bassins fermés (Fig. 5) Ainsi, au sein d'un grand périmètre éloigné, existent 5 périmètres de protection rapprochée (autour des deux sources ; bassin fermé des Jouvencelles ; bassin fermé de l'Abbaye ; bassin fermé du lac de Lamoura), et 4 périmètres immédiats (autour des deux sources ; autour des pertes Nord et Sud du lac de Lamoura). En effet, les principaux aléas sur le bassin d'alimentation sont les aménagements touristiques : villages de vacances (bassin de l'Abbaye), parkings des remontées mécaniques, parkings du départ des pistes de ski de fond ou de lieux touristiques (bassins des Jouvencelles et de la Combe du Lac), voirie déneigée par salage.

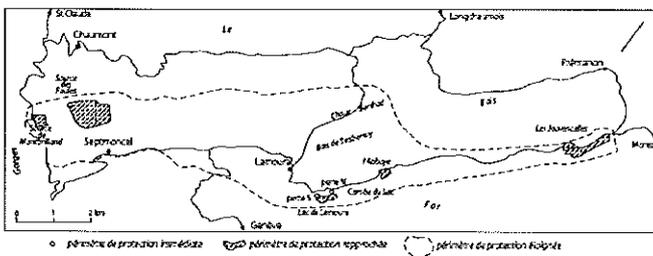


Figure 5 : protection des sources alimentant Saint-Claude (39) par périmètres satellites

7- Karst et travaux

Si le karst franc-comtois est une importante ressource en eau destinée à la consommation humaine, il constitue une « bête noire » pour les aménageurs. En effet, les méthodes de reconnaissance (sondages et prospection géophysique) généralement utilisées pour évaluer les recouvrements

argileux sur le substratum calcaire sont performantes pour étudier des interfaces horizontales ou légèrement inclinées, elles sont inadaptées pour reconnaître des interfaces digitées à variation métrique (Fig. 6). Ainsi la prospection électrique ou électromagnétique prend-elle en compte un volume rocheux (demi ellipsoïde) qui moyenne les propriétés des deux milieux, le pénétromètre dynamique ne permet-il qu'une mesure ponctuelle.

Certaines méthodes plus coûteuses peuvent parfois donner de meilleurs résultats : le géoradar, dans le cas de recouvrements faibles, de quelques mètres au maximum ; la microgravimétrie, dans le cas de cavités de grande taille ; la découverte du substratum par tranchées.

Les exemples de défaut des méthodes classiques abondent sur le plateau de Besançon : ZUP de Planoise dans les années 60, hôpital Jean-Minjoz en 1977. Dans ce dernier cas, le remplissage de dolines de plus de 10 m de profondeur, la présence de cavités ouvertes pénétrable allant jusqu'à 30 m de profondeur ont été manquées par une prospection à maille trop lâche par rapport à l'espacement des anomalies (Gilli et Besson, 2010).

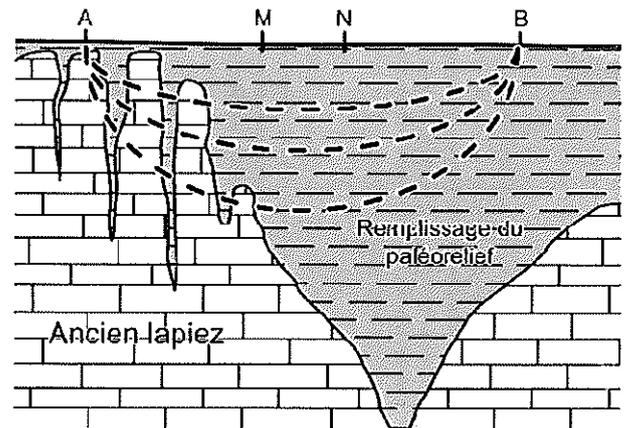


Figure 6 : Hétérogénéité d'un massif karstique et difficultés d'investigation par méthodes électriques.

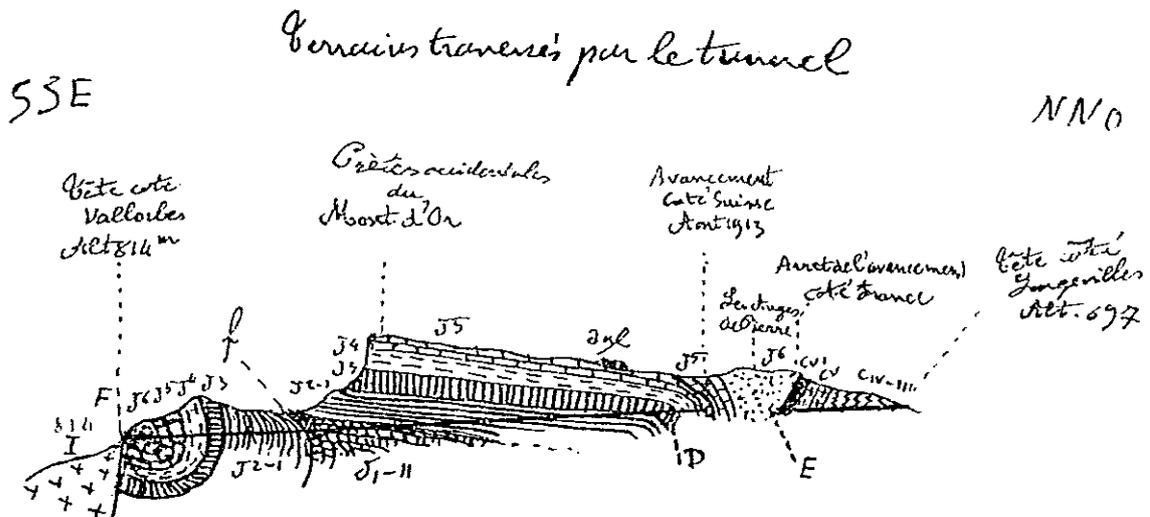


Figure 7 : « coupe historique du percement du tunnel ferroviaire du Mont-d'Or (25) par Fournier (1910)

En 1910, le percement du tunnel du Mont-d'Or (Fig.7) avait occasionné le tarissement des sources du Bief Rouge (Métabief), de la Grande source de Malbuisson et de la curieuse Fontaine-Ronde, source intermittente située au voisinage de la RN 57 entre la Cluse-et-Mijoux et les Hôpitaux-Vieux. Toutes les 7 min, des bulles fourmillent dans la vasque, en faisant augmenter le débit de la source. Ce phénomène est probablement un dégazage naturel de l'air dissous pendant l'infiltration (« air lift »).

8- Conclusion

Le karst franc-comtois a une longue histoire qui est coïncide avec celle de l'émergence des séries calcaires du Jura. Cette histoire commence donc au Crétacé supérieur. Il donne une forte identité aux paysages de notre région, il est responsable des plus beaux sites naturels. Il perturbe l'aménagement du territoire, l'hétérogénéité rencontrée se présentant à une échelle plus fine que celle des méthodes d'investigation classiques, induisant des surcoûts dans la construction, principalement dans les fondations des ouvrages. Le karst franc-comtois est enfin une ressource en eau majeure de la région, alimentant de nombreuses communes rurales, mais aussi les villes de Vesoul, Lons (pro parte), Champagnole, Saint-Claude et les deux tiers de Besançon. Cette ressource abondante est néanmoins vulnérable et nécessite donc une protection adaptée : dans le karst, la distance au captage ne traduit en rien le temps que l'eau met pour y parvenir lors d'un épisode pluvieux. La solution est donc le recours à des périmètres satellites et la conception de plans d'alerte en cas de pollution, comme dans le cas de ces captages de ressource en eau de surface (Carré et *al.*, 2011)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

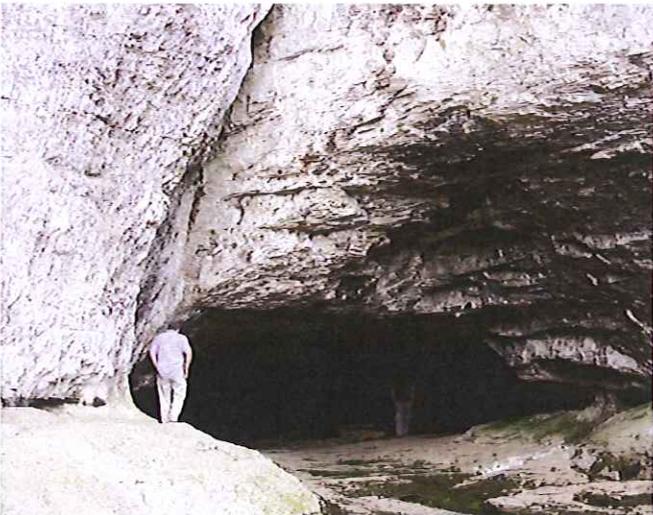
- Carré J., Oller G. et Mudry J. - 2011 - How to protect groundwater catchments used for human consumption in karst areas - Proc. H2Karst, 9th Conference on Limestone Hydrogeology, Besançon (France) 1-3 sept. 2011, p. 87-90.
- Chauve P. - 2006 - Jura *in* Aquifères et eaux souterraines en France, JC Roux éd., tome 2, 561-590, BRGM éditions.
- Chorvot G.-1985 - Le réseau souterrain du Verneau. Univers « Le monde souterrain » p. 63-68.
- Fournier E. - 1913 - Le percement du Mont-d'Or. Ses conséquences hydrographiques et économiques. 15 p., Imp. Rambaud, Besançon.
- Gilli E. et Besson L. - 2010 - Détection et traitement des cavités du sous-sol. *Karstologia Mémoires*, 19, p. 134-136.
- Mettetal J.P. - 1985 - Etudes préalables à la définition des périmètres de protection en milieu karstique. Exemple de la source d'Acier *Hydrogéologie*, 4, p 235-242.
- Nicod J. -2010 - Le Frais - Puits de la font de Champdamoy, source d'eau potable de Vesoul, Haute Saône. *Karstologia Mémoires*, 19, p. 184-186.
- Rosenthal P. - 1985- Grands traits du karst jurassien. Univers – « Le Monde Souterrain » p. 5-25



1 : Puits de la Belle-Louise à Montrond-le-Château : grâce à des ponors, les eaux de surface peuvent alimenter directement et de manière concentrée la nappe karstique. Ce mode d'infiltration très rapide rend cette nappe très vulnérable à la pollution.



2 : Vasque de la source du Lison (4ème source française par son débit). Vers ce porche convergent plusieurs conduits noyés.



3 : Porche de la Grotte Sarrasine à Nans-sous-Saine-Anne. En hautes eaux, cette grotte est le trop-plein de la source du Lison.



4 : Vasque de la source de la Loue à Ouhans : la cascade issue de cette vasque n'est que le trop-plein de la 3ème source française, dont le débit fait tourner l'usine électrique située à l'aval. Le débit est estimé visuellement sur l'échelle et en continu par l'enregistreur contenu dans la buse verticale.

