

Essai d'analyse dimensionnelle d'hydrodynamisme générant une cavitation désagréant la roche sous forme de cupules et de chenaux de voutes dans le paléokarst de la grotte de la chauve-souris (Vaucelles, Belgique)

Hydrodynamic dimensional analysis test generating a cavitation disintegrating the rock in the form of cups and vault channels in the paleokarst of the bat cave (Vaucelles, Belgium)

Texte : Luc FRANCOIS.

Photos : Thomas FRACZEK, Bertrand GOSSELIN, Bastien LHERBIER.



Fédération
Française de
spéléologie

Janvier 2023

Version 2-1

Résumé

Au Sud de Givet dans la Calestienne ardennaise, le paléokarst de la grotte de la chauve-souris au Nord de Vaucelles montre des vague d'érosion (coup de gouges) et des chenaux de voutes. Sur le postulat d'une ancienne galerie noyée fonctionnant en résurgence et sur la base d'analyses dimensionnelles faites sur un venturi de dimensions similaires aux sections de galeries, les résultats montrent que la dépression pourrait théoriquement descendre sous la pression de vapeur saturante de l'eau (phase latente de vaporisation).

Ainsi, en implorant les bulles pourraient emettre une onde de choc dont l'impact produirait une zone de désagrégation de la paroi sous forme de cupules ou de chenaux de voûtes en produisant des spots de coalescence selon la vitesse d'écoulement.

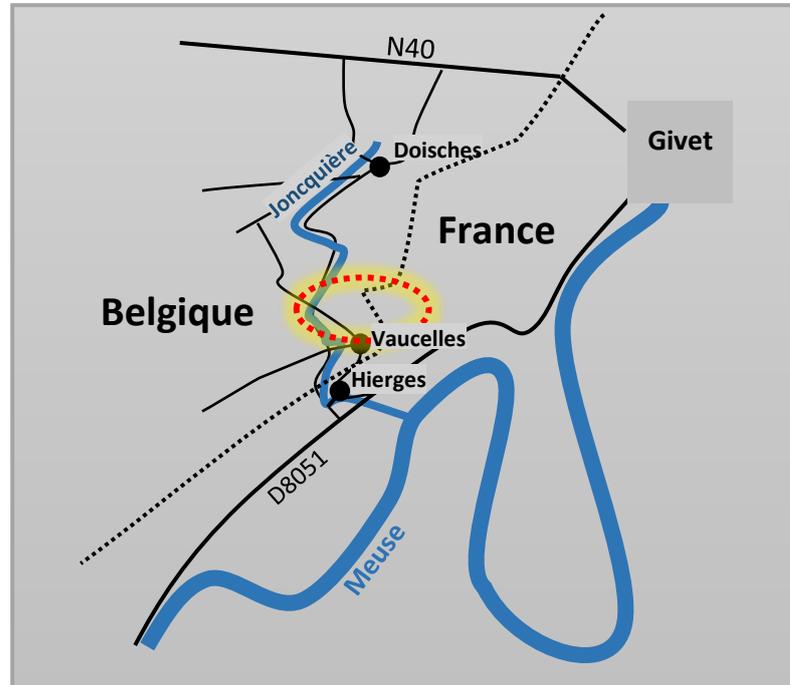
South of Givet in the Calestienne Ardennes, the paleokarst of the cave of the bat north of Vaucelles shows waves of erosion (gouge blow) and vault channels. On the postulate of an old flooded roadway operating in resurgence and on the basis of dimensional analyses made on a venturi of similar dimensions to the roadway sections, the results show that the depression could theoretically drop below the saturated vapour pressure of water (latent vaporization phase). Thus, by imploding the bubbles could emit a shock wave whose impact would produce a zone of disintegration of the wall in the form of cups or arch channels by producing coalescence spots according to the flow velocity.



Une image capturée à partir d'une vidéo illustrant la libération d'énergie lors de l'effondrement de la cavitation. Image du Laboratoire des sciences et de l'ingénierie computationnelle de l'EPFL (Suisse).

Localisation de la zone concernée

La zone concernée est située au Nord de Vaucelles (Belgique). Elle borde la rive gauche de la jonquièrre et couvre le bois de Cense Lahaye, les parcelles labourées de la Cense Lahaye ainsi que les carrières du flanc Sud de la colline. La ville de Vaucelles est située à environ 6km au Sud Est de Givet (France). La zone est frontalière entre la province de Namur en Belgique et la pointe de Givet du département des Ardennes en France.



La colline karstique de Vaucelles appartient au secteur géologique de la Caléstienne qui est composée essentiellement de séries calaires du Givétien (JulesGOSSELET, Thèse 1860). Elle forme une bande étroite en arc de cercle de 2 à 10 km de large et de 130 km de long. Elle débute au Nord, aux environs de Louveigné au Vallon des Chantoirs en Belgique et s'étend vers le Sud-Ouest en passant par Barvaux-sur-Ourthe, Durbuy, Hotton, Marche-en-Famenne, Rochefort et Han sur Lesse puis à l'Ouest, elle passe en France par la pointe de Givet, se poursuit en Belgique par Couvin et Chimay pour se terminer dans le secteur de Fourmies et Wallers-en-Fagne.

Forme des structures

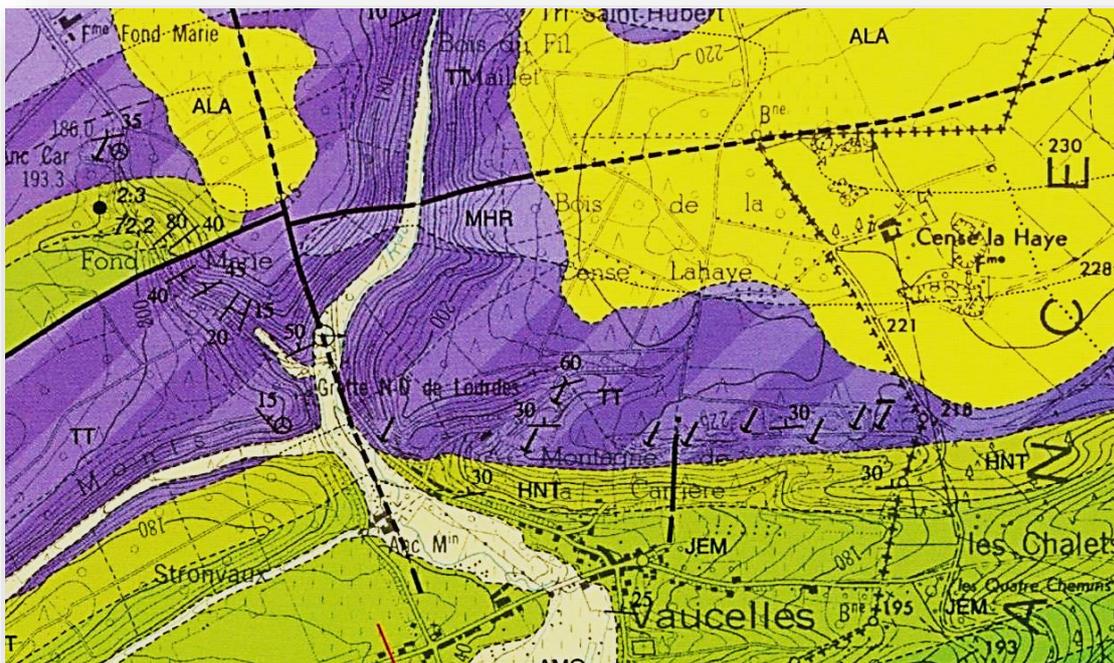
Les séries Dévono-carbonifères se sont décollées du socle sous-jacent et se sont déplacées sur la rampe du chevauchement basal de grandes distances (faille du midi). On parle dans notre cas de l'allochtones Ardennais par opposition aux terrains autochtones qui sont restés en place.

En réalité, nous n'avons pas affaire à un terrain autochtone sous-jacent mais au parautochtone Ardennais sous-jacent qui désigne un terrain d'allure autochtone apparaissant sous l'allochtone mais sans doute déplacé par un mouvement tectonique depuis sa formation.

De part et d'autre de la zone de Givet, deux virgations ont marqué des changements brusques de direction et qui affectent les séries de l'allochtones Ardennais en prenant des changements de directions en forme d'une virgule.

Echelle stratigraphique et Stratotypes des premiers étages du Dévonien moyen

Dévonien moyen	Givétien		FRO	Formation calcaire de Fromelennes.
			MHR	Formation calcaire de Mont d'Haur.
		TT	THR	Formation calcaire de Terre d'Haur.
			TRF	Formation de Trois Fontaines
	Eifélien		HNT	Formation d'Hanonet
			JEM	Formation calcaire de Jemelle
		CVN	Formation calcaire de Couvin	



Extrait de la carte géologique de Wallonie, 58/1-2 Sautour - Surice

La transition Eifélien, Givétien

Les séries stratigraphiques de l'Eifélien Ardennais sont caractérisées par une sédimentation mixte avec des dépôts clastiques provenant de la désagrégation d'une roche continentale préexistante en alternance avec des roches sédimentaires carbonatées. La formation d'Hanonet (Eifélien) fait la transition entre les roches clastiques de la formation de Jemelle (Eifélien) et les soubassements carbonatés du Givétien (formation de Trois-Fontaines).

De ce fait, la plateforme carbonatée avec ou sans barrière a produit dans une eau peu profonde une sédimentation plus ou moins calcaire où l'on retrouve des alternances de couches décimétriques composées, tour à tour de bancs, de restes fossilisés, d'organismes sédentaires (biostrome), des calcaires purs, des calcaires argileux ainsi que des shales clastiques. Ces plateformes carbonatées sont particulièrement répandues le long des plateaux continentaux peu profonds qui précèdent la rupture de pente vers des fonds plus profonds. Les plates-formes peuvent être exposées à des tempêtes associées à des dépôts tempestites.

Les dépôts du quaternaire dans la zone du karst d'introduction

ALA (Cf. Extrait carte géologique ci-dessus) : le dépôt alluvial sableux miocène de Doische à la Cense Lahaye où elle a fait l'objet d'une extraction intensive au siècle passé. Au Bois de Fir, trois unités sont préservées sous des dépôts de pente quaternaires incorporant des gélifracsts, avec de la base au sommet:

- 1) un sablon résiduel, rose à violacé avec nodules plinthitiques et figures de battement de nappe phréatique (hématite) ainsi que des fantômes de diaclases,
- 2) un sable blanc à rosé, très fin, dérivé des altérites sur grès et quartzites, avec quelques galets désilicifiés et voilages argileux de type tidal ou estuarien,
- 3) un sable ocre à galets superficiellement rubéfiés, la nature des galets est très diversifiée, on trouve notamment des galets de calcaire oolitique silicifiés d'âge jurassique (Voisin, 1981).

Dans les dépôts, Il n'est pas signalé de traces importantes d'espèces minérales salines résultant d'une lagune s'étant formé durant les périodes de transgression, régression marines.

Dolomitisation rencontrée

On trouve des strates de dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ dépendant d'un niveau de dépôts de reste fossiles d'organismes dont le rapport Mg/Ca a contrôlé la réaction. La dolomitisation est élevée lorsque la charge en matière organique est importante. En effet, celle-ci produit certaines bactéries qui développent la sulfato-réduction. Ces micro-organismes ont une respiration anaérobie utilisant le sulfate comme accepteur d'électrons et en les réduisant en sulfure d'hydrogène (H_2S).

Par contre les fractures karstifiées transverses au pendage ne révèlent pas de dolomitisation résultant des effets de compression secondaire. De plus, nous n'avons pas rencontré de trace de transformation secondaire par infiltration d'eau sursalée en prévenance des retentions lagunaires anciennes de la zone d'introduction.



La Carrière du sanglier, niveau de biostromes inséré entre des roches dures probablement métamorphosées

Organisation des bassins hydrographiques de la région Mosane

La Meuse n'a pas toujours traversé l'Ardenne, la preuve directe en est donnée par le dépôt alluvial sableux miocène de Doische situé en surface du plateau ardennais. Il s'agit de sables polygéniques issus du remaniement d'abord marin (à l'Oligocène), puis fluvatile (au Miocène) des altérites sableuses éocènes qui couvraient ce secteur de l'Ardenne (et dont on retrouve un dernier témoin en place à Regniowez ; Pierre, 1999). Ces alluvions sont en outre totalement dépourvues d'éléments issus du Bassin parisien (kieseloolithes), et a fortiori, provenant des Vosges via la Moselle. Les sables de Doische et la Traînée mosane, bien qu'à des altitudes très voisines, sont donc mis en place par

deux réseaux hydrographiques distincts. Par conséquent, il est fondé de dire que la Meuse lorraine opte pour une traversée de l'Ardenne dans le laps de temps compris entre la mise en place de ces deux dépôts, c'est-à-dire entre le début du Miocène et le Miocène moyen.

A partir du Miocène, Miocène moyen, les différents niveaux des terrasses fluviales montrent que le bassin hydrographique Mosan ainsi que son affluent de la joncquière ont creusé la surface de pénéplaine de telle sorte que le niveau du Karst noyé s'est enfoncé d'une centaine de mètres et que l'exutoire de la grotte de la chauve-souris s'est désamorcé.

Le Karst d'introduction de la zone concernée

Le karst d'introduction s'établi à partir vaste dépression désigné localement d'Abannets. La Formation des Abannets, d'après Quinif et al. (1991) : « ces phénomènes karstiques ont existé au cours du Tertiaire. Ainsi à l'Oligocène, il y a environ 30 millions d'années, la mer a envahi notre zone sur son socle primaire marqué de vastes surfaces d'aplanissement, sur lequel elle y dépose des sables. Ensuite, après son retrait, un climat tropical humide provoque le développement d'une végétation luxuriante. Les infiltrations abondantes lessivent les sables et karstifient puissamment le calcaire en y formant des dépressions sous couverture. Puis l'évolution continentale se poursuit, les dépressions sous couverture s'approfondissent et le creux des dépressions est parfois occupé par des marécages ».

Le climat change fortement durant le Quaternaire, il devient plus froid, plus contrasté, il provoque l'érosion de la couverture sableuse mais celle-ci reste piégée dans les dépressions karstiques (abannet). L'homme a exploité les Abannets pour en extraire sable.



Extrait de carte Géoportail- Position des Abannets numérotés

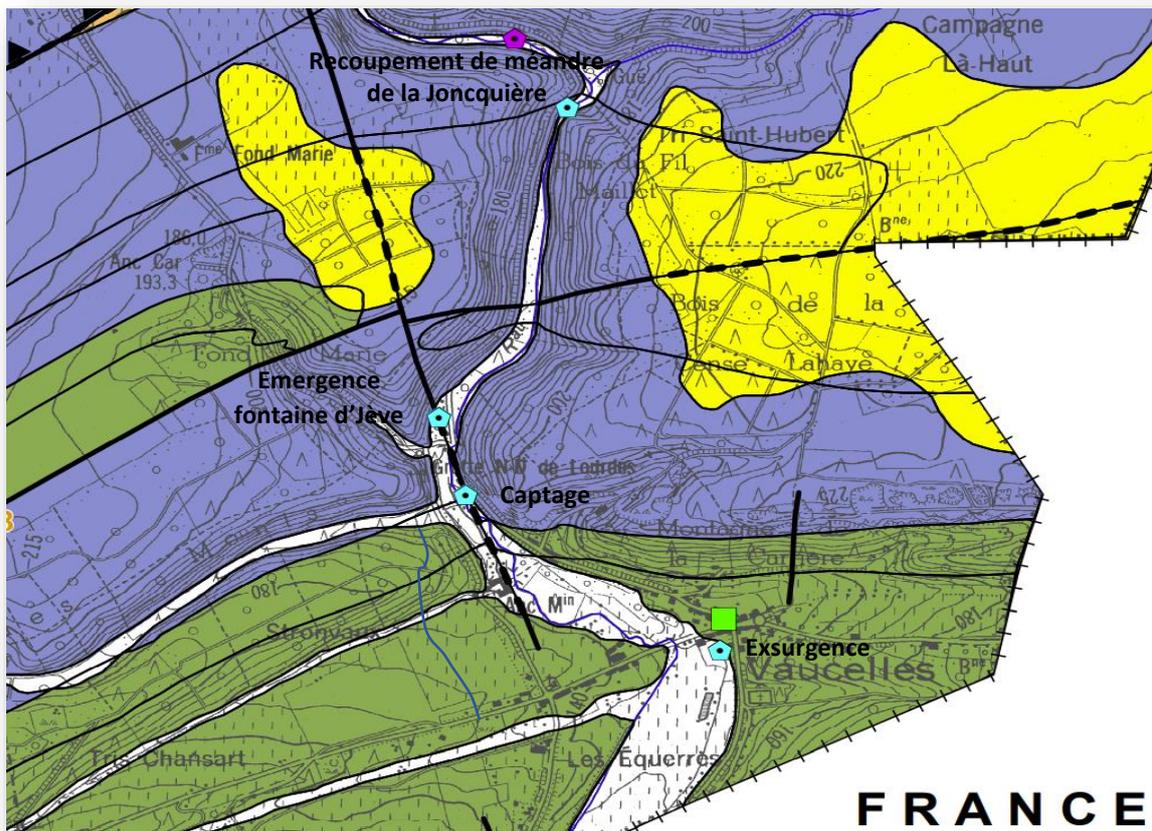
Actuellement, en période de crues, les Abannets sont remplis d'une rétention d'eau provenant des ravinements ruisselant des zones des labours mais aucun talweg ne converge vers la rétention.



L'Abannet 1 en période pluvieuse

La zone de restitution du vallon de la Joncquièrre

Dans les calcaires Givétien, le lit de la Joncquièrre forme un vallon profond ($\pm 80\text{m}$), aux flancs escarpés. Puis à l'approche des formations de l'Eifélien le fond du vallon s'élargit.



Extrait de la carte hydrogéologique de Wallonie, 58/1-2 Sautour - Surice

L'émergence de la fontaine d'Jève et l'exsurgence en contre bas de Vaucelles génèrent des bras de rivière qui serpentent collatéralement au chenal principal de la Joncquièrre. Le chenal annexe de la rive droite, le plus en amont, est alimenté par l'émergence de la fontaine d'Jève, l'autre chenal annexe de la rive gauche en contre bas de Vaucelles est alimenté par une exsurgence provenant

de l'aquiclude de l'Eifélien (siltite et bancs de grès). Le lit a donc un aspect anastomosé avec trois chenaux en pente faible, se rejoignant en aval après un parcours sinueux s'exhaussant lentement par l'effet de la charge en suspension.

Sur la carte hydrogéologique ci-dessus :

- en bleu, l'aquifère sont des formations géologiques poreuses, fissurée ou karstifiées contenant une nappe d'eau souterraine ou étant suffisamment perméable pour que l'eau puisse y circuler,
- en vert, l'aquitard représentant les formations géologiques plus ou moins perméables qui participent à l'infiltration verticale des eaux. Son imperméabilité, peut s'intercaler entre des formations aquifères, ou aquicludes.

L'aquiclude pour sa part, regroupe les formations capables d'absorber l'eau à un rythme lent et ne transmettant pas l'eau suffisamment vite pour approvisionner un puits ou une source, La formation peut être par exemple composée de strates d'argile. Comparé à un aquitard, un aquiclude n'est pas transmissif.

Sur l'extrait de carte hydrogéologique la zone bleu représente l'aquifère des formations carbonatés du Givétien. La zone en vert, l'aquitard de l'Eifélien (base formation Hanonet et Jemelle)



Galerie de la grotte de la carrière de l'œuf. Elle est creusée au contact d'une formation calcaire récifal à organismes constructeurs (stromatopores et tabulés lamellaires) sous-jacentes à des calcaires à bancs décimétriques séparés par de l'argile.

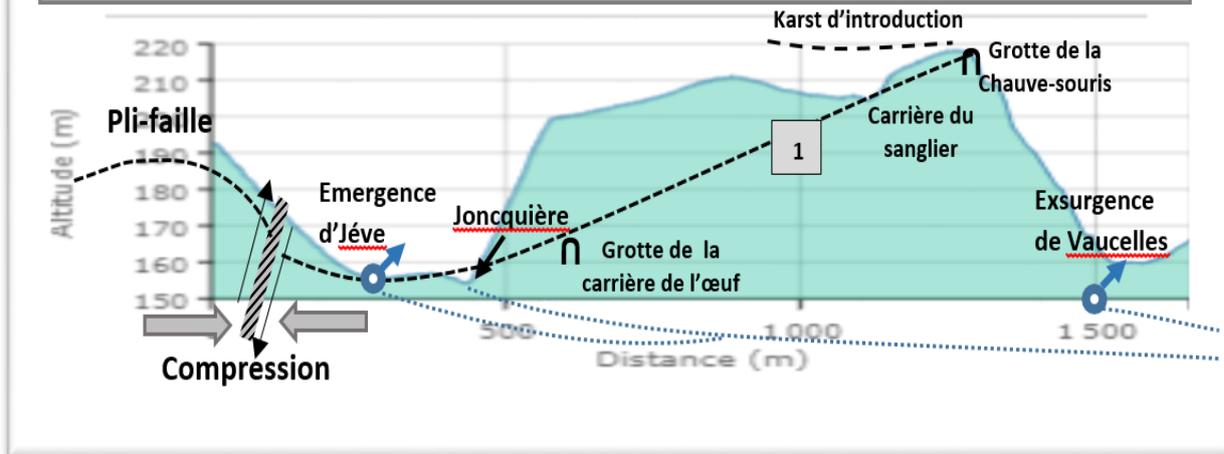


Les eaux de La fontaine d'Jéve remontent au travers d'un cailloutis accumulé au fond d'une cuvette noyée. En période de cru la remontée d'eau donne un aspect d'eau bouillonnante.

Emergence de la fontaine d'jéve et forme des structures

La fontaine d'Jéve est l'exutoire d'un puits noyé par lequel déborde le niveau d'eau du karst noyé. Les eaux de débordement rejoignent la rivière après un écoulement collatéral à la rivière de la Jonquière.

Karst de restitution au niveau du crochon du pli-faille Coupe Nord/Est - Sud/Ouest



1-Forme des structures selon le pendage observé à la grotte de la chauve-souris, à la carrière du sanglier et de l'œuf.

Description de la grotte de chauve-souris

La grotte se développe (Nord, Sud) à partir d'un long couloir dont la hauteur s'élève jusqu'à une vingtaine de mètres. La galerie d'accès est légèrement pentue et au sol, l'enchevêtrement de blocs rocheux devient de plus glaiseux au fur et à mesure de la descente. La galerie d'accès communique avec la grande salle d'allure haute et étroite dont le sol est recouvert de blocs non argileux qui semble avoir été nettoyés par une phase de remonté d'eau inférieure. On peut descendre quelques mètres entre ces blocs qui ne sont pas colmatés par l'argile.



Banquettes s'écroulant suite à l'évidement des argiles inter-stratifiées

Grande salle d'allure haute et étroite dont le sol est cou

Certaines parois développent des formations de banquettes plus ou moins effondrées et provenant vraisemblablement d'évidement d'argile des formations calcaire à bancs décimétriques séparés par de l'argile. En poursuivant dans la galerie principale, la pente remonte sur un éboulis de blocs en direction d'un pont de pierre et de banquettes de parois plus ou moins stable qui laisse présumer

de l'origine des blocs jonchant le sol. La galerie principale se termine par une galerie qui s'amenuise au contact du chenal de voute et de la glaise. Après quelques mètres de reptation, la galerie est obstruée par de la glaise.



Pont de pierre joignant les deux parois



Extrémité de la galerie principale. Le colmatage argileux se rapproche du chenal de voute

Les concrétions moutonnées (chou-fleur)

Les parois de la galerie de la chauve-souris sont couvertes de concrétions moutonnées (chou-fleur). Ce spéléothème particulier pourrait être le témoin d'une galerie durablement immergée. Ce voile concrétionné empêche de voir s'il y a une présence de polissage mécanique ou de stries, de rayures, de cannelures caractérisant une faille. Par contre, on aperçoit un niveau de biostromes inséré entre des roches dures probablement métamorphosées comme à la carrière du Sanglier.



Concrétions moutonnées tapissant les parois de la grotte de la chauve-souris

Chenal de voute et vagues d'érosion aux rétrécissements de galerie

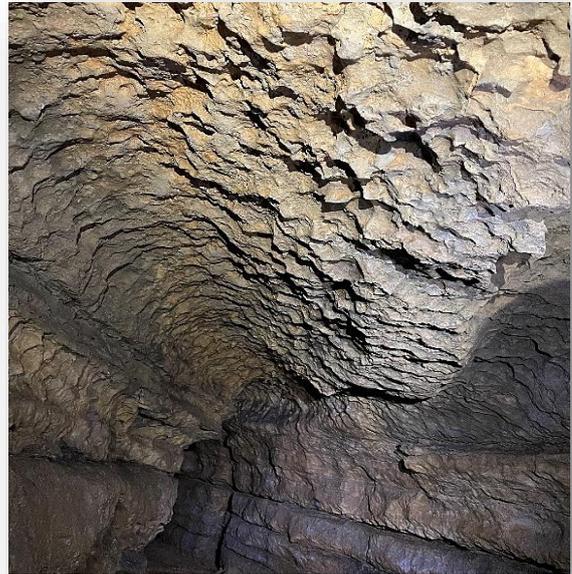
Dans les voutes de la galerie principale, on note un surcreusement de la galerie sous forme soit

- de chenal de voute à tracé serpentine,
- de vagues en cupules; coups de gouge.

Ces formes de désagrégation de la roche pourraient être similaires à celles générées par l'hydrodynamisme de cavitation.



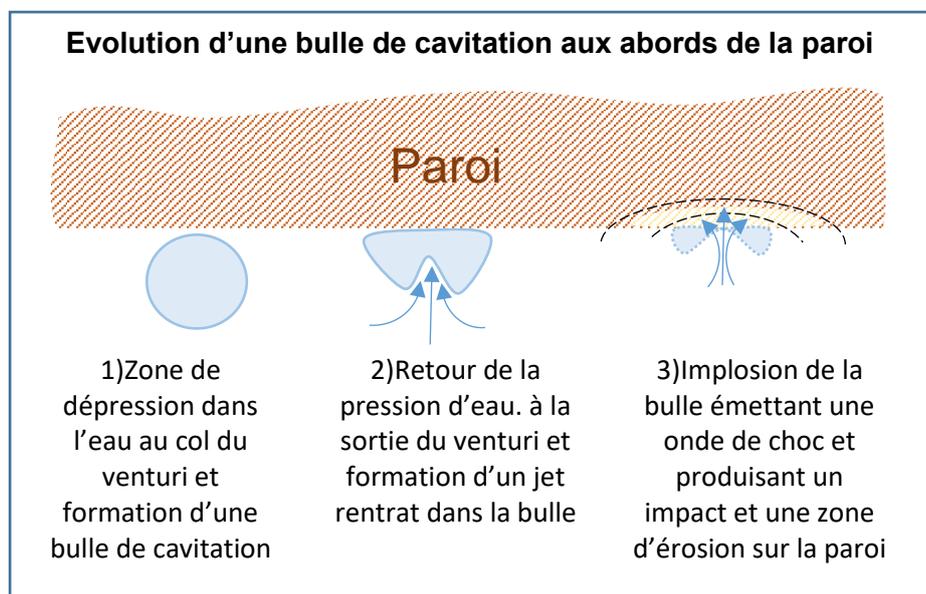
Petit conduit de voute à tracé serpentine ; Chenal de voute



Vagues d'érosion en cupules sur les parois du plafond ; coups de gouge.

Hypothèse de désagrégation de la roche par cavitation sous forme de cupules et de chenaux de voutes

La cavitation se produit à la naissance de bulles de vapeur dans l'eau soumis à une diminution de pression isotherme. Si cette diminution de pression est suffisamment importante, elle peut devenir inférieure à la pression de vapeur saturante (pression à laquelle la phase gazeuse d'une substance est en équilibre avec sa phase liquide). De cette façon une bulle de vapeur est susceptible de se former, souvent de façons transitoires et suivi rapidement d'une implosion de la bulle. Cette implosion peut être si violente que la pression et la température à l'intérieur de la bulle peuvent prendre des valeurs très élevées (plusieurs milliers de bars, plusieurs milliers de kelvins). En implosant, la bulle peut émettre une onde de choc dans le liquide en produisant des altérations de la roche, en érodant leurs surfaces en forme de cupules.

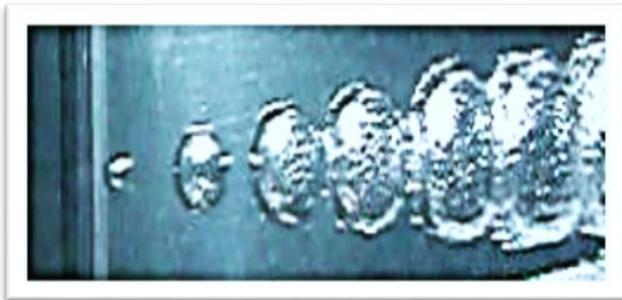


La bulle implose de façon asymétrique, en produisant un microjet. Ce jet de liquide est orienté vers la paroi à des vitesses de plus de 100 mètres par seconde. Les microjets dégagent une grande force de pénétration qui érode les surfaces dures.

Selon A.-P. ALLONDE et al., à partir de visualisations en laboratoire, il est possible de calculer, à un instant donné, la vitesse du jet rentrant. La précision du calcul est estimée à ± 15 m/s. Pour sa part, la pression d'impact du jet rentrant est estimée au moyen de la formule suivante :

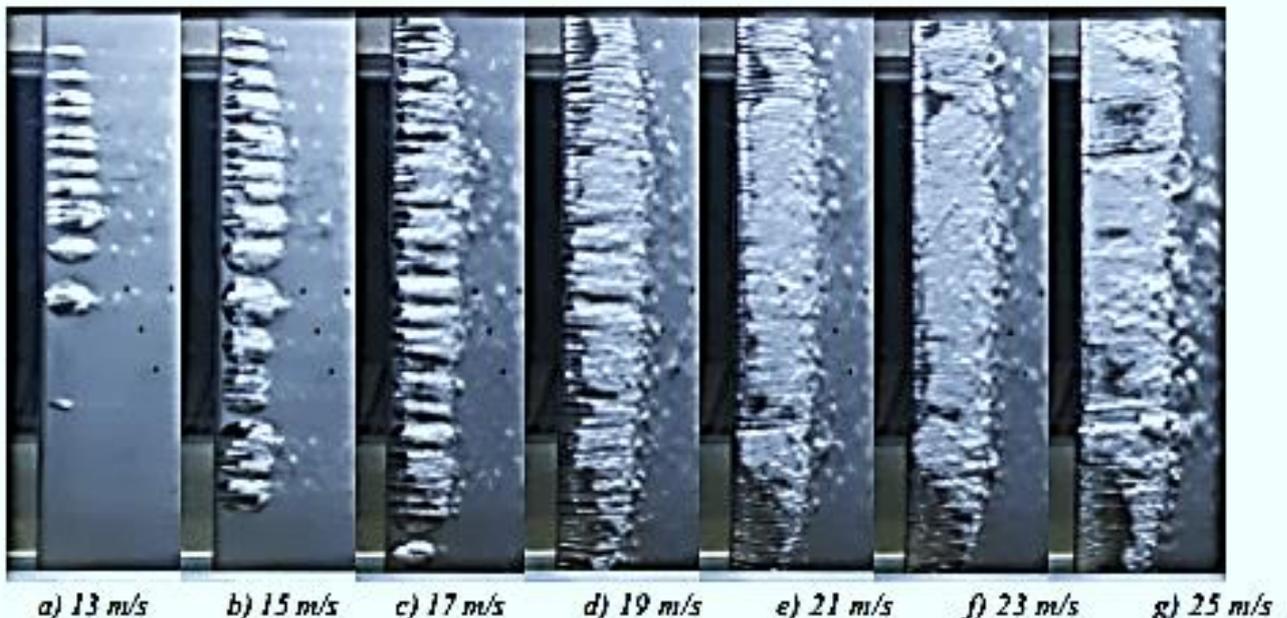
$$P_{\text{jet}} = \frac{1}{2} \rho c v_{\text{jet}}$$

Où ρ est la densité du liquide et c la célérité du son dans l'eau. Ainsi, pour une vitesse de 140 m/s la pression d'impact est de 100 MPa (soit ≈ 1020 Kg/cm²). D'autre part, l'étude numérique de Lesser et Field montre que pour un jet de forme conique, cette pression peut être augmentée d'un facteur 3, soit une pression d'impact de 300 MPa .

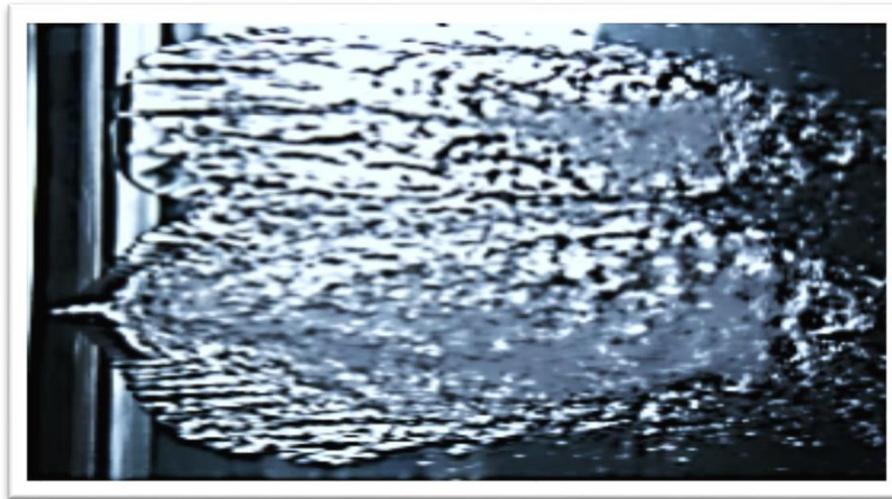


Visualisations de cavitation par bulle sur un profil NACA 65012. (Jean-Yves BILLARD et al. 2003.)

La vitesse de l'eau peut produire une coalescence de bulles (spots) à partir de bords d'attaches lisses ou sur un point d'attache. La cavitation à bulles séparées correspondrait plus à une formation de cupules alors que le chenal de voute coïnciderait avec une poche (spot) de coalescence avec point d'attache plus marqué.



Profil NACA 65012, la vitesse du fluide augmente et génère la coalescence de bulles (spot). (Jean-Yves BILLARD et al. 2003.)



Profil NACA 65012 de coalescences de bulles donnant une poche unique
 En haut : cavitation avec bord d'attache lisse.
 En bas : avec point d'attache. (Jean-Yves BILLARD et al. 2003.)

Probabilité de cavitation à partir d'un effet venturi dans la grotte de la chauve-souris.

Formation de bulles de vapeur sur le diagramme de MOLLIER.

Le diagramme de MOLLIER ci-dessous montre les trois phases : liquide, gazeuse et latente de l'eau. Sur le graphe, lorsque l'isotherme 10°C atteint la cloche rouge pour une pression de 0,0123 bar soit 12,3 hPa, des bulles de vapeur commencent à se former dans l'eau. On constate également qu'à partir 12,3 hPa, la pression ne descend plus et que l'énergie est consacrée à fabriquer des bulles de vapeur dans la phase latente de vaporisation.

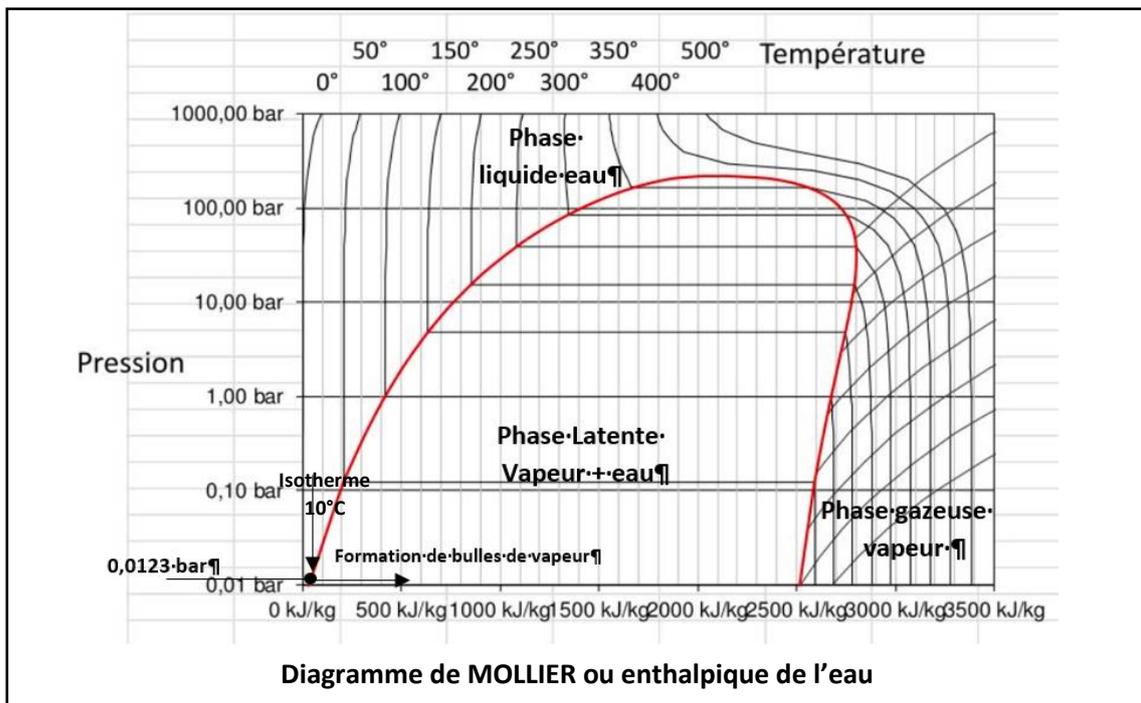


Diagramme de MOLLIER ou enthalpique de l'eau

Théorème de Bernoulli.

Pour l'écoulement d'un fluide:

- parfait dont la viscosité et les pertes de charge ne sont pas pris en compte,

$$\text{Débit à l'exutoire} = \frac{400\text{mm/mois} \times 15\text{km}^2}{\text{Nb Secondes/mois}} = 23 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vitesse moyenne avec une section de galerie de 16m² :

$$\text{Vitesse moyenne} = \frac{23\text{m}^3/\text{s}}{16\text{m}^2} = 1,45 \text{ m/s}$$

Analyse dimensionnelle et évolution des vitesses selon le principe de continuité

Dans le cas d'un écoulement incompressible et sans changement d'état, signifiant que la masse volumique reste constante, l'équation de conservation du débit D^t se présente :

$$D^{t_1} = D^{t_2} = C^{te} ; S_1V_1 = S_2V_2 = C^{te}$$

Ainsi pour une galerie de :

$$S_1 = 16 \text{ m}^2 (8 \times 2)$$

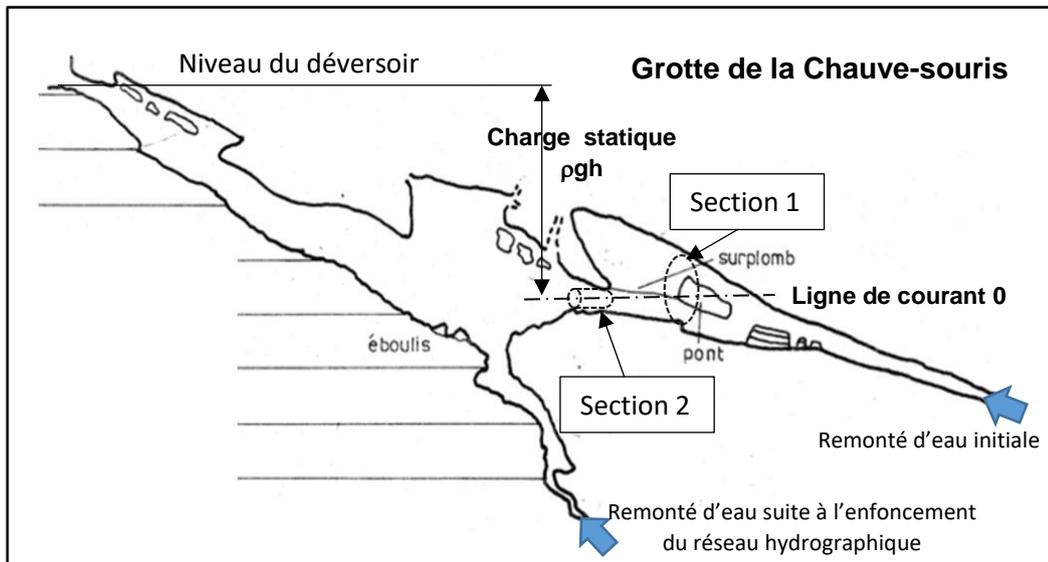
$$V_1 = 1 \text{ m/s}$$

La section réduite S₂ dont on recherche la vitesse :

$$S_2 = 1\text{m}^2$$

$$V_2 = ?$$

$$\text{Soit : } V_2 = \frac{S_1 V_1}{S_2} ; \frac{16\text{m}^2 \times 1\text{m/s}}{1\text{m}^2} = 16 \text{ m/s au col du venturi (section 2)}$$



Analyse dimensionnel, recherche de la différence de pression Δ P

Théorème de Bernoulli sur une ligne d'écoulement horizontale :

$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V_2^2 - \frac{1}{2} \rho V_1^2 ; \Delta P = \frac{1}{2} \rho (V_2^2 - \frac{1}{2} V_1^2)$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times 1000 \text{ Kg/m}^3 \times 256\text{m/s} - \frac{1}{2} \times 1000 \text{ Kg/m}^3 \times 1\text{m/s} ; \Delta P = 127\ 500 \text{ Pa} ; 1\ 275 \text{ hPa (a)}$$

Pressions saturantes en fonction des températures d'eau :

Temp. eau °C	Pression de vapeur saturante hPa
5°	8,72
10°	12,3
15°	17,0
20°	23,4
25°	31,7

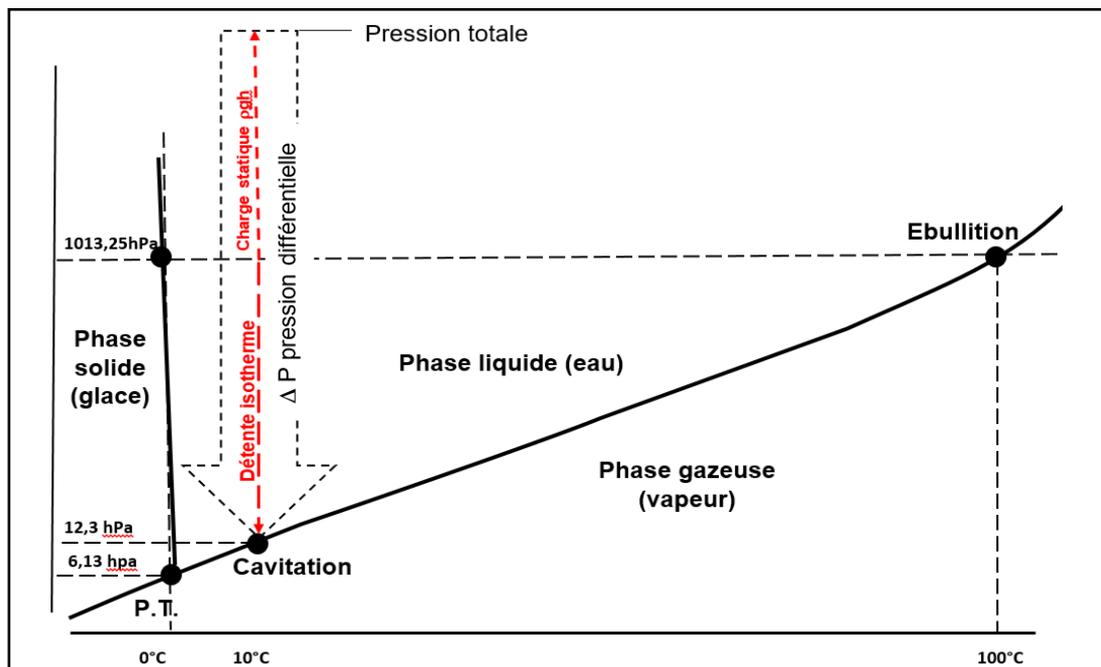
Sur l'isotherme 10°C, pour que le point de pression saturante atteigne 12,3 hPa, il faut que le ΔP soit de :

$$1013,25 \text{ hPa} - 12,3 \text{ hPa} = 1\,000,95 \text{ hPa(b)}$$

Dans notre cas : $\Delta P \text{ 1\,275 hPa(a)} > 1\,000,95 \text{ hPa(b)}$ donc contact avec le point de vapeur latente.

Si ΔP est soustrait à la pression atmosphérique de 1013,25 hPa et que cette pression est en dessous de la pression de vapeur saturante qui est de l'ordre 12,30 hPa pour une eau 10°C, alors dans ce cas-là, il peut y avoir formation de bulles de vapeur.

Mais dans la grotte de la chauvesouris, il faut ajouter la pression statique ρgh à la pression atmosphérique car le déversoir devait être à au moins 20 m plus haut.



Pression de vapeur saturante pour une eau à 10°C et une pression atmosphérique de 1013,25 hPa, la pression de saturation est de l'ordre de 12,30 hPa. A noter que la phase latente n'est pas représentée.

Comme la pression totale en prenant en compte ρgh et la pression atmosphérique est de l'ordre de :

$$\rho g h = 1000 \text{ Kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 20 \text{ m} = 196\,200 \text{ Pa} ; 1\,962 \text{ hPa}$$

Pression totale :

$$1\,962 \text{ hPa} + 1\,013,25 \text{ hPa} = 2\,975,25 \text{ hPa (c)}$$

Ce qui porterait à tripler la valeur de ΔP . Sachant que la seule variable est la vitesse initiale, donc :

$$V_2 = \frac{S_1 V_1}{S_2} ; \frac{16 \text{ m}^2 \sqrt{3} \text{ m/s}}{1 \text{ m}^2} = 27,71 \text{ m/s au col du venturi pour une vitesse initiale de 1,73 m/s}$$

Ce qui donne un ΔP de :

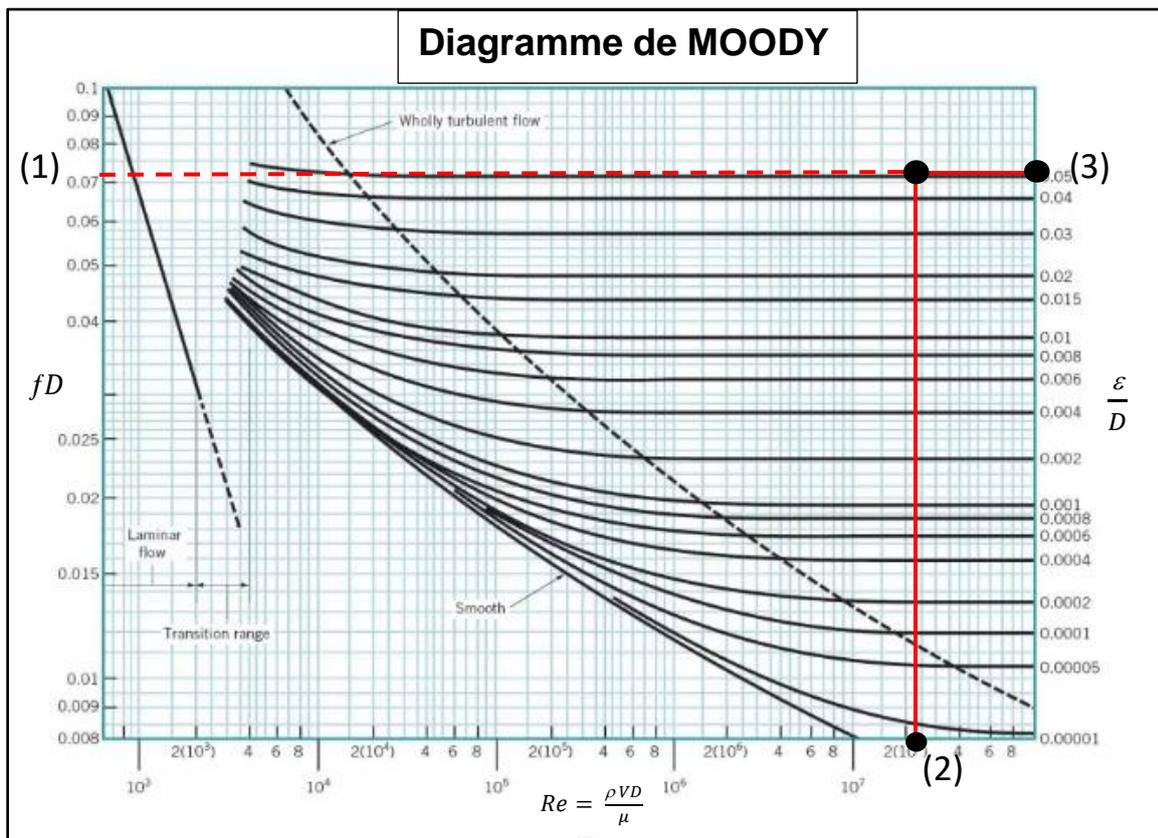
$$V_2 = 500 \text{ kg/m}^3 \times 27,71^2 - 500 \text{ kg/m}^3 \times 1,73^2 = 382\,422 \text{ Pa} , 3\,824,22 \text{ hPa (d)}$$

Dans notre cas : 3 824,22 hPa(d) > 2 975,25 hPa(c) donc contact avec le point de vapeur latente.

On remarque là encore que ΔP (d) est plus important que la pression totale (c), de ce fait ΔP devrait descendre sous la pression saturante de l'eau à 10°C soit 12,3 hPa. En se référant au graphe (Diagramme de MOLLIER), on voit que lorsque ΔP arrive au contact de la cloche de phase latente, la pression ne descend plus et que l'énergie est consacrée à créer des bulles de vapeur dans cette phase latente de vaporisation.

Estimation de la perte de charge au col

Pour un écoulement turbulent dans un tube circulaire ou le nombre de Reynolds est supérieur à 3000 Re , le diagramme de MOODY peut être utilisé pour déterminer le coefficient de perte de charge fD



Sur le graphe ci-dessus, en abscisse les valeurs du nombre de REYNOLDS sont données par la formule :

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2)$$

Avec : Re : le nombre de REYNOLDS ; au-delà de 3000 Re le régime est turbulent,

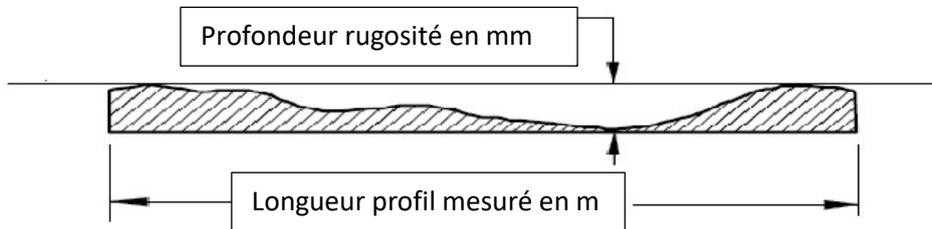
- ρ : masse volumique du fluide (en Kg /m³),
- V : vitesse de l'écoulement d'eau (en m/s),
- D : diamètre du conduit (en mètre),
- μ : viscosité dynamique du fluide (en Pa s).

La viscosité dynamique est la résistance à l'écoulement laminaire d'un fluide. Au cours de l'augmentation de température les molécules du fluide s'écartent et la densité diminue. Inversement, si la température baisse, le processus s'inverse. Ainsi la viscosité varie en sens inverse de la température. Estimation du nombre de REYNOLDS (Re) au col du VENTURI de la section de galerie 2 (cf. coupe de cavité de la chauve-souris)

$$Re = \frac{100 \cdot 27,71 \cdot 1}{0,001 \cdot 139} = 24\,328\,358 \text{ Re} ; 2,5 \cdot 10^7 \text{ Re}(2)$$

La rugosité de la paroi $\frac{\varepsilon}{D}$ prise en compte est la rugosité la plus importante du graphe avec un diamètre de 1m correspondant à celui de la galerie au col :

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,05m}{1m}$$



Pour estimer la perte de charge produite par les parois du col, on utilise l'équation de DARCY-WEISBACHEN :

$$\Delta H = fD \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

$$\Delta H = 0,071 \times \frac{3}{1} \times \frac{27,71^2}{2 \cdot 9,8} = 8,40 \text{ mCE soit } 823,73 \text{ hPa (e)}$$

A noter que d'autres méthodes peuvent être utilisées pour calculer fD , à savoir : la formule de COLEBROOK WHITE (0,071554), la relation SWAMEE et JAIN (0,071554), la corrélation de HAALAND (0,071695), les coefficients corroborent ceux du graphe.

En prenant en compte une perte de charge avec une rugosité très importante produite par les parois du col :

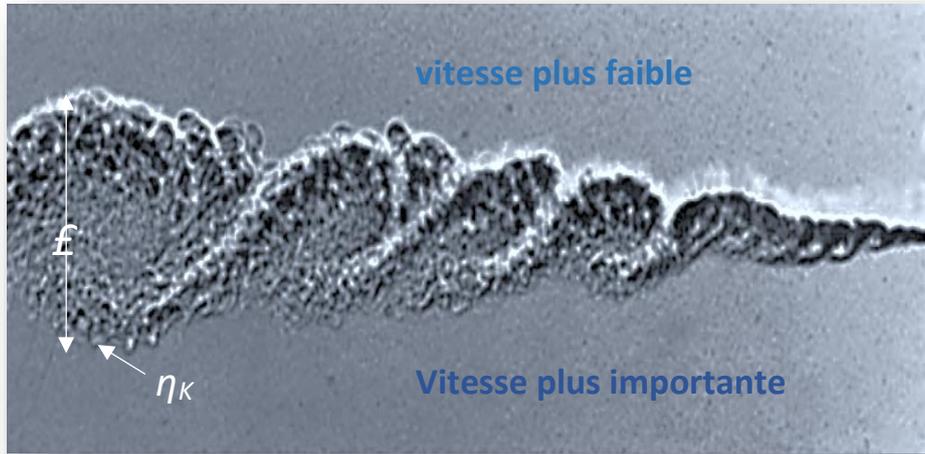
$\Delta P = 3\,824,22 \text{ hPa(d)} - 823,73 \text{ hPa(e)} = 3000,5 \text{ hPa} > 2\,975,25 \text{ hPa(c)}$ donc contact avec la cloche de vapeur latente.

La cascade turbulente générant un tourbillon à la sortie du col

A la sortie du col, la transition entre le régime turbulent et le régime laminaire pourrait produire des régimes tourbillonnaires dans laquelle l'énergie de translation se transforme en rotation avant de se dissiper.

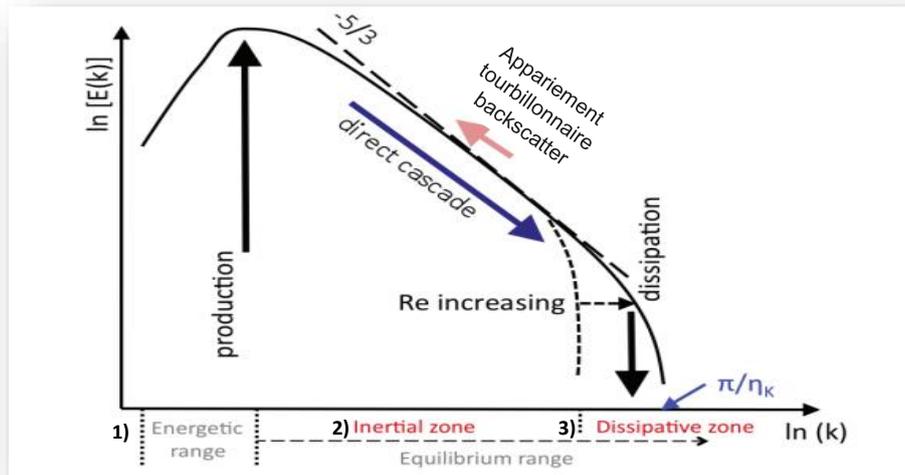
En effet, au col la section du flux d'eau se réduit et provoque une circulation plus rapide dans la zone du col plus étroite. Puis à la sortie du col, l'eau rencontre soudainement un autre courant à vitesse plus lente qui génère un tourbillon en cascade turbulente.

La cascade turbulente est une forme de transfert d'énergie entre les tourbillons à grande énergie cinétique et les plus petits qui absorbent et dissipent celle-ci. Ce mécanisme est à l'origine du spectre d'énergie turbulente dans un écoulement. La coexistence d'arrangements turbulents d'échelles variées au sein d'un écoulement turbulent est illustrée par la figure ci-dessous représentant une zone de mélange étudiée par Brown et Roshko. Ces échelles sont comprises entre l'échelle intégrale \mathcal{L} de la structures plus large tourbillonnante où l'énergie turbulente est produite et d'autre part l'échelle de Kolmogorov η_K où l'énergie turbulente est dissipée par l'ensemble des phénomènes de résistance au mouvement du fluide (viscosité).



Couche de mélange obtenue par BROWN et ROSHKO, les échelles L et η_K sont mises en évidence

La théorie classique dite de la « cascade », introduite par Richardson et reprise par Kolmogorov, est illustrée par le graphe ci-dessous.



Répartition de l'énergie cinétique turbulente $E(k)$, selon les différentes zones

On peut y distinguer trois zones :

- 1) dite « énergétique », où il y a production d'énergie cinétique turbulente grâce aux grosses structures dont la taille est liée à la géométrie du phénomène,
- 2) dite « inertielle », où le transfert d'énergie vers les plus petites échelles revêt un caractère universel caractérisé par une décroissance avec une pente de $-5/3$,
- 3) zone dissipative où l'énergie est dissipée. On notera que l'étendu de ce spectre varie avec le nombre de Reynolds lié à l'échelle intégrale.

En pratique, ce transfert d'énergie n'est pas à sens unique, le phénomène d'appariement tourbillonnaire (en anglais backscatter) permettant le transfert ponctuel de petites structures tourbillonnaires (qui fusionnent) vers une ou des plus grosses

Conclusion

Pour les calculs faits sur la base de sections profilées du VENTURI (cylindriques et tronç coniques), les valeurs de dépression ΔP peuvent descendre théoriquement sous la pression de vapeur saturante d'eau à 10°C. Mais dans le réseau de la chauve-souris, la forme des galeries ne permet pas un régime stationnaire aussi parfait que dans le venturi et les lignes de courant en se resserrant ne conservent pas le régime laminaire aussi parfait dans le col. Les pertes de charges causées par l'irrégularité des parois produisent une perte de vitesse au resserrement de galerie. Cependant dans notre cas, sur une base de la section de galerie au col et d'une rugosité de paroi importante, la perte de charge à priori n'annule pas le ΔP nécessaire pour atteindre le contact avec le point de vapeur latente.

Sur la base du karst d'introduction actuel où les eaux percolent dans les sables du quaternaire en provoquant la rétention d'eau dans les creux des Abannets ; il est évident que la charge est insuffisante pour donner un débit adéquat. Mais il faut insister sur le fait que la cavité est un paléokarst qui initialement aurait fonctionné différemment avant que les dépôts aient colmaté les Abannets du karst d'introduction et que le surcreusement du bassin hydrographique ait asséché l'ex-résurgence de la chauve-souris.

A signaler que la cavitation est plus efficace avec des eaux plus chaudes. A titre d'exemple pour une pression atmosphérique de 1013 hPa, la pression de phase latente passe de 6,57 hPa pour l'eau à 1°C, à 31,66 hPa pour l'eau à 25°C. Pour sa part la viscosité dynamique qui représente l'agitation moléculaire, passe de 0,0017 Kg pour 1°C à 0,00089 Kg à 25°C ce qui diminue les pertes de charge pour l'eau à 25°C.

Dans la grotte de la chauve-souris les formes de désagrégation de la roche (Chenal de voute et vagues d'érosion) se concentrent sur des bords d'attaches situés en voute dans les zones de rétrécissement de galerie. Ces formes de cupules et de chenaux de voutes sont singulièrement comparables à la désagrégation observées dans d'autres domaines de technologie hydrauliques et à priori, l'analyse dimensionnel de l'hydrodynamique pouvant générer la cavitation dans la grotte de la chauve-souris montre une certaine adéquation entre la cavitation, la diminution de section de galerie et les vitesses d'écoulement qui n'aurait été réunies qu'en climat tropical antérieur aux périodes de glaciations.

Bibliographie

- CARTE GEOLOGIQUE DE WALLONIE, Notice explicative 57/5-6 - IGNIES/SÉLOIGNES - 2003 - Jean-Marc MARION & Laurent BARCHY Université de Liège
- CAVITATION ET ETAT DE SURFACE : UNE NOUVELLE ANALYSE DES MECANISMES D'ATTACHE D'UNE CAVITE A UNE SURFACE - Journée de l'hydrodynamique 2003 Jean-Yves BILLARD Jean-Yves, Mohamed FARHAT Mohamed, Faïçal GUENNOUN, François AVELLAN.
- COMPORTEMENT D'UNE BULLE DE CAVITATION A PROXIMITE D'UNE PAROI SOLIDE Contribution à l'étude du mécanisme d'érosion – 1997 .J.-C. ISSELIN, A.P. ALLONDE, D. DUFRESNE et M. AUTRIC.
- CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL : L'ARDENNE PALEOZOÏQUE (Nord de la France et Sud de la Belgique) Géologie de la France, n° 1-2, 2006, p. 7 à 13, Jean-Louis MANSY, Frédéric LACQUEMENT.
- CONTRIBUTION A L'ETUDE DES ACTIONS MECANIKES ET SEDMENTOLOGIQUES DANS LA SPELEOGENESE – 1968. Ann. Spéléo, 23 Philippe RENAULT.
- DEFORMATIONS AU FRONT SEPTENTRIONAL DE LA CHAINE VARISQUE : L'EXEMPLE DES ARDENNES FRANCO-BELGES DANS LA REGION DE GIVET - Géologie de la France, n° 1-2, 2006, p. 85 à 90. Olivier AVERBUCH, Frédéric LACQUEMENT, Jean-Louis MANSY, Rafal SZANIAWSKI, Marek LEWANDOWSKI.
- ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DES CALCAIRES DU GIVETIEN, annale de la société géologique de Belgique tome 105, 1982, Alain PREAR & Frédéric BOULEVAIN.
- LA GROTTTE DE MONTFAT : UN JALON DANS L'EVOLUTION DE LA VALLEE DE LA MEUSE - Karstologia n° 40, 2002, p.13 à 18. Y QUINIF
- LA MEUSE, UN ENREGISTEUR DE L'EVOLUTION TECTONIQUE RECENTE DU FRONT VARISQUE Géologie de la France, n° 1-2, 2006, p. 103 à 108, Brigitte VAN VLIET-LANOË, Frédéric LACQUEMENT, Léon VOISIN, Jean-Louis MANSY, Francis MEILLIEZ.
- LES TERRASSES DE LA MEUSE DANS LA REGION DE CHOOZ. Bull. Soc. Hist. Nat. Ardennes, Charleville Mézières, 73, p. 45 à 50. 1983 Voisin L.
- L'AVEN D'ORGNAC : UN GRAND RESEAU PARAGENETIQUE, ETUDE SPELEOGENETIQUE DES GRANDS VOLUMES KARSTIFIES. Cahiers de géographie, numéro 5, 2007. Stéphane Jaillet, Jean-Jacques DELANNOY, Jean-Loïc BERSIHAND, Matthieu NOURY, Benjamin SADIÉ, Stéphane TOCINO
- LE VALLON DE LA JONCQUIERE ; GEOLOGIE, GEOMORPHOLOGIE, SPELEOLOGIE. Les naturalistes Belges, 1974. Y. QUINIF.
- LES VAGUES D'EROSION. Karstologia n°10, 2^e semestre 1987. LISMONDE BAUDOUIN, LAGMANI ABDALLAH
- L'ORIGINE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE EN THIERACHE ARDENNAISE OU L'HISTOIRE DE LA "MEUSE LORRAINE". Cahiers de Géographie Physique n° 14, 2003. Guillaume PIERRE.
- QUELQUES IDEES SUR LA MORPHOLOGIE DE L'ARDENNE OCCIDENTALES. Hommes et terres du Nord, 1982, p. 39 à 50. L. VOISIN.
- SIMULATIONS NUMERIQUES D'ECOULEMENTS REACTIFS MASSIVEMENT D'ECOLLES PAR UNE APPROCHE HYBRIDE. 2011, Bruno SAINTE-ROSE.