

Variations récentes de niveau du lac Pavin : essai de mise en cohérence des différentes sources d'information

Didier Miallier*

Université Clermont Auvergne (UCA), CNRS/IN2P3, Laboratoire de Physique de Clermont (LPC), 4, avenue Blaise-Pascal, 63178 Aubière Cedex, France

Reçu le 12 août 2019 / Accepté le 5 février 2020

Résumé – Le lac Pavin résulte de l'enneigement d'un cratère volcanique qui s'est ouvert d'une façon explosive il y a environ 6700 ans. Aux origines, les eaux ont pu remplir jusqu'à un niveau élevé un cratère intact. Puis, au cours des siècles, une dégradation locale des parois du cratère a entraîné une baisse, certainement irrégulière, du niveau du lac jusqu'à ce que l'intervention humaine perturbe les processus naturels. L'altitude actuelle du lac, environ 1197 m, est l'aboutissement de cette longue histoire qui éveille depuis quelques temps un regain d'intérêt, notamment dans la perspective de possibles événements catastrophiques passés et futurs. La période qui recouvre les trois derniers siècles peut être appréhendée par le prisme de la documentation historique (publications, rapports, manuscrits, cartes, photographies). En parallèle et en complément, l'histoire du Pavin et de ses variations de niveau est reconstituée par l'analyse de sédiments échantillonnés par carottage au fond du lac. En effet, certains faciès, certaines séries sédimentaires traduisent des modifications intervenues dans le passé, parfois brutalement, de hauteur de la colonne d'eau. La profondeur à laquelle se trouvent actuellement ces sédiments témoins, repérée par rapport à la surface du lac, est donc un paramètre essentiel de leur interprétation. Conscients que l'altitude actuelle du lac peut résulter en partie d'une intervention humaine récente, les auteurs concernés sont conduits à prendre en compte cette possibilité en introduisant des corrections de profondeur exprimées en mètres. Cependant, d'un article à l'autre, les valeurs numériques avancées sont dispersées et généralement très mal documentées. Ce constat nous a incités à essayer de réviser la documentation historique, puis à en tirer un scénario qui a ensuite été confronté aux résultats, discussions et conclusions des publications récentes. Les principaux points ressortant de cette analyse sont les suivants : (1) des publications récentes font état d'aménagements du seuil du lac à la fin du XVIII^e siècle ou au XIX^e siècle, ayant conduit à baisser (de 4 m) ou élever (de 2 m) artificiellement son niveau. Or, non seulement il n'y a pas eu de tels aménagements mais, de plus, il y a une forte présomption que le niveau du lac n'ait quasiment pas varié depuis le début du XVIII^e siècle ; (2) des travaux scientifiques récents, basés sur l'analyse de sédiments lacustres, ont conclu que le niveau du lac avait brutalement chuté vers l'an 600 suite à un événement catastrophique induisant – ou induit par – une rupture partielle du barrage naturel. La baisse instantanée du niveau s'inscrit dans une gamme de 6,5, 9 ou 13 m selon les publications. À l'examen, seule une baisse de 9 m peut être retenue et elle n'a pas été instantanée : c'est une baisse cumulée entre la chute catastrophique intervenue aux environs de l'an 600, inférieure à 9 m, et la période actuelle. Entretemps, le niveau du lac a connu une phase de stabilité vers la mi-parcours, autour de la cote +4,8 m au-dessus de l'actuelle.

Mots clés : Maar / Pavin / niveau / variations / débordements / historique

Abstract – Fluctuations of the Pavin lake elevation: How consistent the available sources of information are? Lake Pavin originated from water filling of a maar crater that erupted violently about 6700 years ago. In the early maar, lake water attained a high level within a pristine crater. Then, over time, local degradation of the inner walls of the crater rim allowed the lake level to decrease steadily but unevenly. This has been followed, for an unknown number of centuries, by human action that disrupted natural processes occurring in the lake. The current elevation of the lake, ca. 1,197 m a.s.l., results from a several centuries long history, but changes in the lake body have recently drawn attention from scientists,

*Auteur de correspondance : didier.miallier@clermont.in2p3.fr

particularly as catastrophic events such as overbank and floods may have occurred in the recent past or might occur in the future. We unravel the most recent period of this history, namely the past three centuries, using publications, manuscripts, maps, photographs and unpublished reports as well. In parallel, the history of fluctuations of the Pavin Lake has been analyzed by teams of sedimentologists using sediment cores retrieved from the bottom of the lake. Lithofacies and sediment types have been shown by these scientists to be markers of past fluctuations of the lake water column, which may have been sudden events. In such cases, depth is a major parameter of the discussion. Consequently, it must be accounted for the recent variations of the level of the lake, mostly those from anthropic origin. This can be done by introducing correcting factors quoted in meters. However, the fluctuations in lake elevation as published in the scientific literature are scattered and poorly documented. To overcome this difficulty, we have revised the available historic documentation. Once the historic dataset was revised, we have elaborated and compared a scenario to results, discussion and conclusions from the most recent scientific articles. The key points of this work are as follows: a few articles have claimed that the lake rim spillway artificially dropped by about 4 m or alternatively raised the lake level by about 2 m during the XVIIIth century and/or the XIXth century. Here we have found no evidence for human impact. In contrast, we show that the level of the lake has remained within about 1 m of the current elevation since the beginning of the XVIIIth century. Based on dated cores, sedimentologists have demonstrated that the lake level experienced a sudden drop around 600 AD. This catastrophic event was triggered by, or alternatively, triggered the failure of the maar rim. Several authors have claimed that the instantaneous lake level drop was in the range of 6.5, 9 or as high as 13 m. Here we show that the level drop was in the order of 9 m, and was not instantaneous. This corresponds to the total height range cumulated between the initial sudden drop less than 9 m in height, which occurred around 600 AD, and the current lake level. Between 600 AD and at least two centuries ago, the lake level remained for some time around 4.8 m above the present level.

Keywords: Maar / Pavin / lake level / variation / overbank / history

1 Introduction

Dans de nombreuses régions du Monde, des lacs se sont installés dans des réceptacles naturels directement ou indirectement formés par un phénomène volcanique : calderas, cratères, espaces confinés totalement ou partiellement par une accumulation syn- ou post-éruptive de matériaux (coulée de lave, pyroclastites, débris d'avalanche, dépôts de lahar). La constitution du réceptacle est mixte dans le cas des lacs de maars, assez communs en contexte volcanique (Ollier, 1967 ; Cas et Wright, 1987) : leur bassin est formé par un cratère, souvent assez vaste, couronné par une accumulation de pyroclastites d'épaisseur variable, l'anneau de tufs (*tuff-ring*). Le cratère résulte du transpercement du substratum par de violentes explosions phréatomagmatiques, initiées par des interactions à faible profondeur entre la lave ascendante et de l'eau (Lorenz, 1973). Les tufs de l'anneau sont composés, en proportions variables, de lapilli et bombes de lave juvénile et de fragments des différentes roches traversées par le conduit, brisées par les explosions. Ce mode de formation induit certains traits particuliers des maars, dont deux intéressent cet article : la partie supérieure de leur enceinte peut être fragile en raison de sa forte pente interne et du fait qu'elle est constituée de matériaux non consolidés et ils peuvent être profonds. La fragilité de l'enceinte les expose à une baisse de niveau par abaissement graduel ou saccadé de l'exutoire, par érosion régressive (Provencher et Dubois, 2008) et, dans les cas extrêmes, par des ruptures soudaines de la digue naturelle (Lorenz, 2007 ; Németh et Cronin, 2015). Une grande profondeur peut contrarier les mouvements saisonniers de mélange entre les eaux profondes et les eaux de surface, d'une façon d'autant plus efficace que la surface du lac est faible relativement à sa profondeur, et protégée du vent par des

versants élevés. Cela peut conduire, en combinaison avec d'autres facteurs tels que la salinité ou la présence de sources profondes, (Hutchinson, 1957), à maintenir au fond du lac une tranche d'eau jamais oxygénée. Le lac est alors dit méromictique. Le lac Pavin (commune de Besse-et-Saint-Anastaise, Puy-de-Dôme, France), seul lac méromictique français, en est un bon exemple.

Le lac Pavin a un contour sub-circulaire d'environ 800 m de diamètre moyen (Fig. 1) et il a 92 m de profondeur (Renault, 2009). Il occupe un vaste cratère de maar qui s'est ouvert il y a environ 6700 ans (Juvigné et Miallier, 2016), en entaillant à l'emporte-pièce le substrat géologique préexistant (Boivin *et al.*, 2017). Le lac a donc un âge un peu inférieur à 6700 ans. Composite, le substrat géologique superficiel recoupé par le cratère comprend des empilements de coulées volcaniques compactes et des couches de matériaux plus meubles, ponces, sables et dépôts périglaciaires qui, en lits superposés plus ou moins épais, sont observables dans les pentes internes (Thouret *et al.*, 2016). Une mince (≈ 1 m) couche de ponces et fragments rocheux divers ayant été expulsés par les éruptions du volcan couronne l'anneau du grand réceptacle naturel. Le lac est alimenté par des sources (toute la bibliographie sur l'hydrologie du lac Pavin peut être retrouvée dans l'ouvrage collectif de Sime-Ngando *et al.*, 2016). Le trop-plein se déverse à l'extérieur, en direction de la plaine du Gelat située en contrebas, par un exutoire installé au nord, dans une échancrure profonde incisant la partie moins résistante de l'enceinte naturelle du lac sur environ 50 m de largeur et 22 m de hauteur (point E, Fig. 1). Le niveau du lac est principalement contrôlé par l'altitude de cet exutoire. Ce niveau est situé aujourd'hui vers 1197 m d'altitude mais différents indices suggèrent qu'il a été plus élevé à l'origine, quand les parois internes du cratère étaient encore intactes sur



Fig. 1. Le lac Pavin en 1867. Extrait du plan topographique dressé par l'ingénieur ordinaire des Ponts et chaussées. Archives départementales du Puy-de-Dôme, AD63, S0104 d. E : entrée et émissaire ; G : plaine du Gelat ; CP : Couze Pavin ; CC : Couze Chambourguet.

Fig. 1. Lake Pavin, 1867. Extracted from a topographic drawing. E: entrance of the site and outlet; G: plaine of Gelat; CP: Couze Pavin river; CC: Couze Chambourguet river.

toute sa périphérie. Une reconstitution hypothétique du cratère initial, par fermeture virtuelle de son échancrure nord en interpolant la ligne de crête, permet d'évaluer à environ 1218–1220 m l'altitude maximale qu'aurait pu avoir le lac à l'origine, soit environ 21 m de plus qu'aujourd'hui. La période primitive de hautes eaux, de durée indéterminée, s'est achevée quand un début de dégradation naturelle du bord du bassin a entraîné une baisse irréversible du niveau maximal du lac. La baisse de niveau s'est ensuite poursuivie suivant une séquence inconnue, jusqu'à ce que l'intervention des riverains perturbe les processus naturels.

L'altitude actuelle du lac Pavin, qui résulte des péripéties de cette longue histoire, est un repère pertinent pour l'étude des variations de son niveau dans le passé. Ces variations pourraient comprendre des baisses de niveau intervenues soudainement lors d'événements catastrophiques. L'existence de glissements de terrain sous-lacustres a été révélée récemment par la présence de séquences sédimentaires particulières dans des dépôts sous-lacustres échantillonnés par carottage (Chapron *et al.*, 2010, 2012; Chassiot *et al.*, 2016, 2018). La profondeur à laquelle se situent ces séquences, évaluée par rapport à la surface actuelle du lac, est une donnée fondamentale pour leur interprétation. Par ailleurs, les eaux du lac Pavin sont stratifiées d'une façon très particulière qui

détermine son caractère méromictique (Sime-Ngando *et al.*, 2016): la tranche d'eau comprise entre une profondeur d'environ 60 m et le fond du lac n'est pas sujette aux mélanges saisonniers, entre les eaux de surface et les eaux profondes, qui affectent la majorité des lacs. Cette masse d'eau profonde, le monimolimnion, est dense, anoxique, riche en ions, gaz dissous (Camus *et al.*, 1993) et éléments traces (Viollier *et al.*, 1995). La transition entre le monimolimnion et la tranche d'eau supérieure affectée par les mélanges saisonniers, le mixolimnion, se fait par une zone intermédiaire, d'une dizaine de mètres d'épaisseur, le chemocline (Aeschbach-Hertig *et al.*, 2002). Dans cette stratification, le paramètre profondeur est un paramètre important, par le contrôle de la température et de la pression, mais aussi du fait que des sources qui semblent jouer un rôle important dans le maintien de la méromixité sont situées à une altitude critique, vers la limite supérieure du monimolimnion (Aeschbach-Hertig *et al.*, 2002; Bonhomme *et al.*, 2016). À la stratification physicochimique du lac se superpose une répartition en profondeur des organismes vivants, par exemple les plantes aquatiques dont la croissance est influencée par la pénétration de la lumière (Wetzel, 1983), ou les poissons (Desmolles, 2016) inféodés à une chaîne trophique dépendante de la lumière.

Pour les différentes raisons qui viennent d'être évoquées, les acteurs de la recherche sur un lac tel que le Pavin doivent, à certains stades de leur réflexion, s'interroger sur la signification de son altitude actuelle: a-t-elle varié dans le passé? Si oui, quand et comment? Une partie des réponses se trouve dans la documentation ancienne (textes, cartes, dessins, photographies). Or, l'exploitation qui est faite de cette documentation présente des divergences importantes suivant les auteurs et les publications. Il en découle des discussions et conclusions reposant en partie sur des bases très fragiles, voire erronées. Il nous a donc semblé nécessaire de procéder à une relecture de la documentation ancienne pour en tester la cohérence et essayer d'en formaliser les informations. Nous commencerons par examiner deux points clés du problème, à savoir d'une part les premiers travaux documentés, effectués au niveau de l'émissaire du lac vers 1859–1861 et, d'autre part, la découverte, vers 1909, d'un ancien déversoir situé à plusieurs mètres d'altitude au-dessus du niveau du lac. Nous présenterons des projets envisagés au XIX^e siècle mais restés sans suite, qui sont une source précieuse d'informations et dont la connaissance très partielle a pu être à l'origine de conclusions hâtives. Nous essayerons de tirer parti de trois témoignages antérieurs au milieu du XIX^e siècle. Ensuite, ces documents historiques étant relus, nous analyserons la façon dont ils sont pris en compte dans la littérature récente. Finalement, nous tenterons de concilier les résultats des travaux scientifiques récents avec les témoignages anciens. Cet article fait donc une large part à la documentation dite « grise », pas facilement accessible et non validée suivant les standards des publications internationales. Cependant, c'est un cas d'école où une lecture insuffisamment attentive de la documentation grise peut introduire dans la littérature scientifique contemporaine des informations fausses mais importantes par leurs implications, et qui risquent d'être pérennisées par le jeu des citations. Nous disposons de différents types de sources documentaires: publications récentes; rapports récents non publiés mais accessibles en ligne; publications anciennes accessibles auprès de



Fig. 2. Un rocher à fleur d'eau : a : dans le second quart du XX^e siècle (Photo Gouttefangeas, collection F. Faure-Perrin, Besse) ; b : le même aujourd'hui. La hauteur de la zone dénudée (environ 40 cm, en (a) donne une idée des fluctuations de niveau.

Fig. 2. Reef just above the water: a: as seen in the second quarter of XXth century; b: same reef nowadays. The width of the naked zone (about 40 cm in a) gives an idea of the range of water level variation.

bibliothèques numériques ; publications, rapports et manuscrits non numérisés, accessibles en bibliothèque (bibliothèque du patrimoine de Clermont-Ferrand) ; documents uniques consultables au service des archives départementales du Puy-de-Dôme (AD63). Pour ne pas alourdir notre système de références, nous les avons tous cités de la même façon, à l'exception des documents d'archives.

En préambule, il faudrait définir ce qu'est le niveau (ou l'altitude) du lac, car ce niveau peut fluctuer, même dans une configuration à peu près figée de son exutoire. Bouillet (1875) note que « les eaux du lac Pavin [...] ont un flux et un reflux très irrégulier ». Par exemple, le lac a débordé en 1861 « par suite des pluies torrentielles et de la fonte des neiges » (Bruyant et Eusebio, 1904), effet peut-être amplifié par un colmatage des grilles du déversoir (Eusébio et Reynouard, 1925 ; Omal, 1968). Actuellement encore, un colmatage de l'entrée du déversoir peut occasionnellement faire monter quelque peu le niveau du lac (P. Boivin et personnel d'entretien du site, com. pers.). À l'opposé, un bilan hydrique déficitaire peut conduire à une baisse de niveau telle que celles, récurrentes, qui ont suscité les projets d'aménagements du XIX^e siècle. Une

photographie datable du milieu du XX^e siècle (Fig. 2A) suggère qu'à cette époque (vers 1950), le niveau du lac pouvait varier d'au moins 40 cm, le niveau maximal étant repéré par la limite inférieure de la mousse et de la végétation sur un rocher émergé. Pour aujourd'hui, selon un témoignage rapporté par Assayag *et al.* (2008), « des observations régulières indiquent que le niveau du lac a été stable dans les limites d'une incertitude de 50 cm depuis au moins plusieurs décennies » (traduit de l'anglais). Nous avons nous-mêmes observé une amplitude de fluctuations d'environ 30 cm entre mai et septembre 2019 (Annexe A). Dans cet article, on conviendra que le niveau du lac est son niveau moyen dans une configuration donnée, stable, de son exutoire (idem pour son altitude). Actuellement, la partie la plus haute de la plateforme aménagée formant le barrage du lac se situe vers 1197,40 m (Annexe A), ce qui constituerait donc aussi l'altitude maximale du lac en cas de crue. En moyenne, la surface de l'eau se trouve vers 1196,50 m.

2 La stabilisation du niveau du lac au XIX^e siècle

2.1 Les travaux de 1859–1861

En 1857, H. Lecoq, titulaire de la Chaire d'Histoire Naturelle de la faculté des Sciences de Clermont-Ferrand, confia à son préparateur de cours, B. Rico, la mission d'étudier les possibilités de développer la pisciculture dans le département du Puy-de-Dôme (Lecoq, 1861a). Il disposait à cet effet d'une somme de 1000 francs allouée par le conseil général du département. Dans ce cadre, la municipalité de Besse concéda à Rico le lac Pavin pour 15 années. À partir de 1858, Rico fit construire une digue au déversoir et y installa un système de grilles en toile métallisée. Selon Lecoq, le « dégorgeoir » du lac était large, ce qui nous permet de comprendre que la digue avait pour fonction de réduire le passage des eaux, les grilles étant destinées à « mettre un obstacle à la sortie du poisson ». Dès 1861, un débordement induit par un colmatage des grilles entraîna de nombreux alevins hors du lac. L'écartement des grilles fut alors augmenté (Eusébio et Reynouard, 1925 ; Omal, 1968) et « trois ouvertures de 1 m chacune furent alors pratiquées » (Bruyant et Eusebio, 1904). De fait, sur diverses photographies et cartes postales anciennes (fin XIX^e et début XX^e siècles), l'entrée du déversoir apparaît bifide (Fig. 3 ; plus de photos sur : phototheque@puy-de-dome.fr) et Morin (1888) évoque seulement « deux ouvertures grillagées ». L'accès au bord du lac, qui était auparavant très malcommode (Lecoq, 1835) fut facilité par le tracé de chemins. Enfin, Rico fit construire à ses frais, à proximité du dégorgeoir, un petit pavillon pouvant servir d'habitation à un gardien (Fig. 3). Ce local comprenait un caveau dans lequel avait été construit un réservoir en communication avec le lac. Le local est souvent désigné comme la « maison du pêcheur » sur les cartes postales du début du XX^e siècle. Un plan du site (AD63, 1806 W 13), réalisé en 1951 par l'ingénieur ordinaire des Ponts et Chaussées dans le cadre d'un projet d'aménagement des abords du lac, permet de localiser de façon assez précise cet édifice, ce qui, sera utile dans la discussion : il est situé à une distance maximale (angle SE du bâtiment) de 3 m environ par rapport au bord du lac auquel il est relié par une canalisation d'environ



Fig. 3. L'entrée nord du cirque du lac Pavin, vers 1870–1880. À gauche : la maison du pêcheur construite vers 1859–1860. Au centre : le déversoir ; à droite : extrémité est du talus occidental (Photo Sanitas, coll. P. Chatelus).

Fig. 3. Northern access to the lake Pavin cirque, c. 1870–1880. Leftward: the fisherman's cabin, built c. 1859–1860. In the centre: the outlet; rightward: east end of the western embankment (Photo Sanitas, coll. P. Chatelus).

4 m de longueur. Il a cédé sa place à un hôtel-restaurant vers 1971.

Ces travaux sont les seuls qui soient attestés à la clé du lac entre les années 1859–1860 et les années 1950. En 1909, Bruyant écrit que « depuis cette époque le seuil n'a donc pas varié ». Il faut accorder une certaine valeur à cette assertion puisque son auteur fréquentait assidument le Pavin dès la fin du XIX^e siècle. Il est à noter que les travaux les plus récents (après 1951) semblent n'avoir eu aucun effet sur l'altitude du lac : le niveau maximal actuel est le même qu'au milieu du XX^e siècle (Figs. 2a et 2b). De plus, au second quart du XX^e siècle, la configuration du seuil avait très peu varié depuis 1860, à la nuance près que depuis longtemps, il n'était plus vraiment entretenu ainsi que le montrent toutes les photographies de la fin du XIX^e siècle et du début du XX^e siècle (Fig. 3). Déjà vers 1875, Bouillet remarquait que « le niveau des eaux doit baisser continuellement à mesure qu'elles usent la digue qui les retient » (Bouillet, 1875), ce qui suggère un manque d'entretien.

2.2 Altitude et profondeur du lac

L'altitude du lac a été relevée pour la première fois d'une façon assez précise dans le cadre de l'établissement d'une carte générale de la France, projet de très long terme et de très grande envergure initié par une ordonnance royale de 1827 et concrétisé par la publication des fameuses cartes d'état-major, étalée sur des décennies (Berthaut, 1898). La feuille comprenant la région de Besse et le Pavin résulte d'une campagne topographique conduite entre 1835 et 1845 (<https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-de-letat-major-1820-1866>). Cette campagne cartographique a bénéficié de méthodes topographiques trigonométriques réputées précises, infra-métriques (J. Chadeyron, CHEC, UCA, com. pers.). Cette carte d'état-major restera la base de toutes les cartes publiées jusqu'au début du XX^e siècle, par exemple celle de

Lecoq en 1861, avec seulement quelques ajustements à la marge (urbanisme et voirie). L'affinement des mesures altimétriques se fit ensuite par étapes, dans le cadre de campagnes nationales bénéficiant de progrès techniques : campagne confiée à l'ingénieur Paul-Adrien Bourdaloué (1857–1864), puis celle dirigée par Charles Lallemand (1884–1897), et enfin campagnes IGN (à partir de 1969).

L'altitude mentionnée pour le lac est restée la même, soit 1197 m, d'une publication à l'autre (Lecoq, 1861a, 1861b ; Vimont, 1875 ; Berthoule, 1890 ; Delebeque *et al.*, 1898 ; Eusébio et Reynouard, 1925) jusqu'à aujourd'hui. Ceci signifierait que cette altitude n'a pas varié depuis les années 1835–1845 avec, toutefois, trois réserves. La première est relative aux fluctuations du niveau du lac évoquées plus haut. La seconde réserve concerne la précision qu'il faut accorder aux mesures altimétriques indiquées sur la carte d'état-major du second quart du XIX^e siècle. La comparaison des altitudes indiquées sur cette carte à celles de la carte IGN actuelle, pour quelques points caractéristiques dans le voisinage du lac Pavin, montre des écarts pouvant atteindre plusieurs mètres en plus ou en moins ; mais quelle est la part de l'imprécision de la mesure et quelle est celle de l'imprécision de sa localisation exacte ? Ce n'est qu'à partir du moment où les mesures issues de la campagne Bourdaloué ont remplacé les précédentes que la précision est réellement devenue très inférieure au mètre. La troisième réserve est que, justement, nous ignorons à partir de quelle date les auteurs cités plus haut (Berthoule, Delebeque, Eusébio, Lecoq, Reynouard, Vimont) – qui, bien sûr, n'ont pas fait de mesures eux-mêmes – ont pu intégrer les nouvelles données.

Les mesures de profondeur peuvent apporter une information complémentaire, peut-être un peu plus précise que l'altitude. Lecoq (1861a) a mesuré cette profondeur en dix endroits différents et trouvé un fond plat à une profondeur moyenne de 90 m. Celle-ci est aujourd'hui évaluée à 92 m (Renault, 2009). En prenant en compte un taux annuel de sédimentation d'environ 0,3 cm/an pour les derniers siècles (d'après Chassiot *et al.*, 2018), un écart de 2 m entre 1861 et aujourd'hui (92–90 m), l'élévation du lac depuis cette date serait de 2,3 m environ, sous réserve que la technique de mesure de Lecoq soit strictement comparable aux techniques actuelles, ce qui n'est pas du tout assuré. Une élévation du niveau du lac suppose l'établissement d'un barrage, or comme il sera montré plus loin, il n'en a pas été construit depuis 1860, ce qui nous incite à attribuer l'écart de 2,3 m au fait que les méthodes de mesure n'ont pas été similaires. Lecoq ne dit pas quand il a fait ses mesures ; s'il les avait effectuées en période estivale de très basses eaux, il l'aurait peut-être mentionné. Il a probablement utilisé à cet effet l'une des « deux élégantes chaloupes » construites par Rico vers 1858–1859, car c'est seulement à partir du moment où ces bateaux ont été disponibles qu'il a pu se déplacer commodément sur le lac (Lecoq, 1861a). En 1890, les mesures de Delebeque situent le fond du lac entre 90 et 92 m. Ainsi, les données de profondeur du lac, indépendantes des mesures d'altitude, s'accordent avec ces dernières sur une variation de niveau faible (1 à 2 m au maximum) ou nulle depuis 1861.

2.3 Les projets non aboutis : 1848–1898

Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, la configuration du lac aurait pu être profondément modifiée par différents projets,

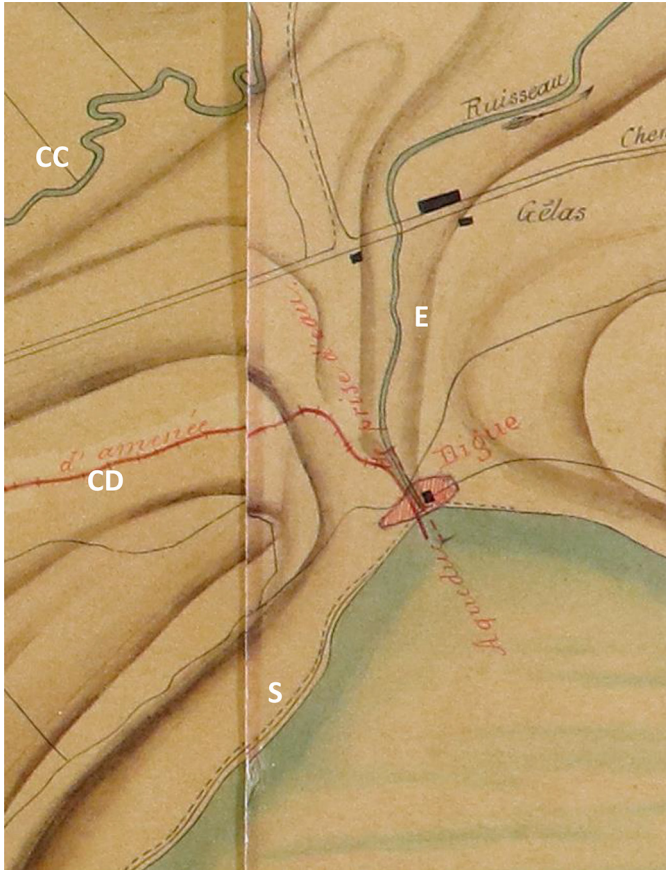


Fig. 4. Projet d'aménagement du lac Pavin, en 1867 (extrait). Archives départementales du Puy-de-Dôme, AD63, S 0104 b. CC : Couze Chambourguet; CD : canal de dérivation de la Couze Chambourguet; E : émissaire du lac; S : sentier au bord du lac. Zone hachurée : projet de digue.

Fig. 4. Laying out plan for the lake Pavin in 1867 (extract). CC: Couze Chambourguet river; CD diversion channel of Couze Chambourguet river; E: lake outlet; S: path along the shore. Hatched area: projected levee.

mais aucun d'entre eux n'a été réalisé. Ces projets n'ont eu aucun impact sur le niveau du lac, cependant leur examen est utile : ils permettent de comprendre l'origine de certaines confusions, leurs dossiers d'étude recèlent des informations précieuses et, enfin, ils éclairent les enjeux d'un contrôle du niveau du lac. Ils avaient tous pour objectif d'assurer la sécurité de l'approvisionnement en eau de la rivière dans laquelle se jettent les eaux qui débordent du lac, la Couze Pavin. Vers 1848–1850, le Ministre de l'Agriculture avait recommandé le relèvement du seuil du lac. Ce projet avait fait l'objet de plusieurs rapports au conseil général du Puy-de-Dôme, mais « il n'y fut donné aucune suite favorable » (extrait du Registre des délibérations de la Ville d'Issoire, 1888. AD63, S 104), ce qui est aussi rapporté à la même date par [Morin \(1888\)](#). L'affaire fut relancée en 1865 par M. Legros, conducteur des Ponts et Chaussées, ce qui déboucha, en 1867, sur un grand projet dont les trois principaux volets étaient les suivants (AD63, S 104) :

- surélévation du niveau du lac par un barrage de 5 m de hauteur (Figs. 4 et 5) ;
- construction d'un canal de dérivation de la Couze Chambourguet, sur un parcours d'environ 2,5 km de longueur, pour alimenter le lac Pavin (Fig. 4). (NB : les eaux issues du lac Pavin rejoignent, dans la plaine du Gélat, la Couze Chambourguet, rivière dont le nom est abandonné au profit de celui de Couze Pavin en aval du point de confluence) ;
- construction d'un aqueduc de prise d'eau, à plusieurs mètres de profondeur sous la surface du lac, débouchant sur le ravin de l'exutoire, en contrebas du barrage.

Ce projet a fait l'objet d'études très détaillées, comprenant un état des lieux (géotechnique, relevé des pentes subaquatiques, nivellement du parcours du canal de dérivation), une description des travaux à effectuer, illustrée de plans et de dessins d'architecte aquarellés, une évaluation des coûts et un schéma du cadre juridique de gestion de l'ouvrage. En parallèle, un projet alternatif, moins développé, consistait à installer l'aqueduc de prise d'eau à grande profondeur, sans changer le niveau du lac.

En 1888, alors que rien n'a encore été fait, de nouvelles expertises sont conduites, ce qui donne à l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées l'occasion d'émettre une préférence pour la seconde option du projet de 1867, car « les digues d'exhaussement [sont] toujours exposées à de graves avaries sous l'action des masses d'eau qu'elles soutiennent » (AD63, S 104-3). Cinq ans plus tard, en 1893, le chantier n'a toujours pas été programmé comme le souligne l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées dans un avis manuscrit, la principale raison en étant l'impossibilité de faire face à son coût très élevé. Cependant, le printemps 1893 a été marqué par une forte sécheresse qui a pénalisé la production d'herbe, et le besoin d'arroser les prairies reste pressant. Durant l'été de la même année, appuyé sur une délibération de son conseil municipal et sur les avis favorables de l'ingénieur ordinaire et de l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, le maire de Besse, A. Berthoule, demande une subvention à l'état pour endiguer le lac à hauteur de 1,50 m (AD63, S 104-1). Ce projet, beaucoup moins ambitieux que celui de 1867, ne verra pas le jour non plus : en 1898, le préfet du Puy-de-Dôme le rappelle dans un courrier adressé à M. Chigot, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées (AD63, S 104-1). Ce courrier est destiné à réactiver l'instruction du dossier, ultime tentative qui sera infructueuse comme les précédentes. Les photographies de la fin du XIX^e siècle et de la première moitié du XX^e siècle montrent un déversoir élargit et dégradé (Fig. 3), sans aucune trace de travaux récents et ni [Bruyant \(1909a\)](#), ni [Eusébio et Reynouard \(1925\)](#) ne font la moindre allusion à des travaux. Enfin, ce qui confirme implicitement que rien n'a encore été fait, Bruyant relance en 1909 l'idée de surélever le niveau du lac de « 3, 4 ou même 5 m (...) avec un barrage de peu d'importance et facile à dissimuler sous des blocs de roche volcanique » ([Bruyant, 1909b](#)), de façon à augmenter le débit de la Couze en période d'étiage. Contrairement à ses prédécesseurs, il ne met pas en avant les besoins de l'agriculture mais expose en revanche tous les bénéfices que pourrait en tirer l'industrie locale.

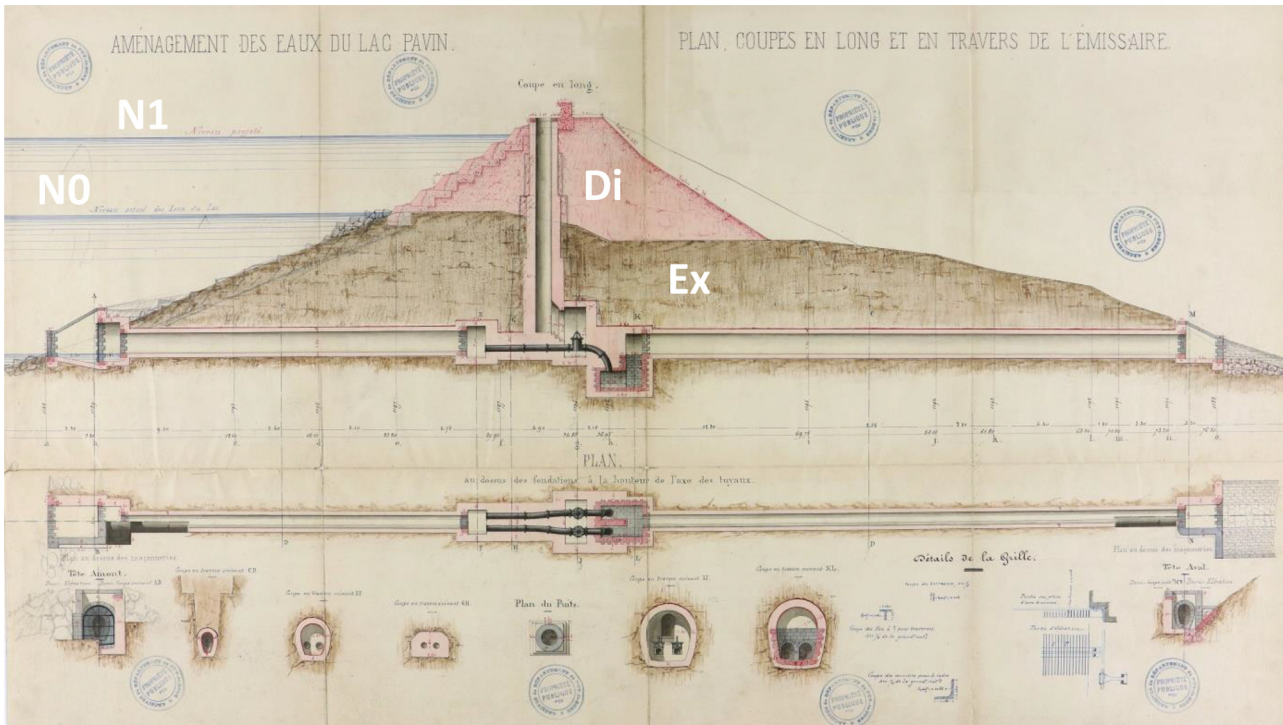


Fig. 5. Projet de digue en 1867 : coupe transversale (lac à gauche). Ex : profil existant ; Di : digue ; N0 : niveau du lac en 1867 ; N1 : niveau du lac envisagé après construction de la digue. Archives départementales du Puy-de-Dôme, AD63, S 0104 p.

Fig. 5. Projected levee, in 1867: cross-section (lake at left handside). Ex: existing profile; Di: levee; N0: lake level in 1867; N1: expected lake level after construction of the levee.

3 Les observations de 1909 : un ancien déversoir surélevé et un canal désaffecté

3.1 Un ancien déversoir surélevé

En 1909, Bruyant signale l'existence, à l'entrée nord du lac, d'un ancien déversoir dont la paroi orientale a été partiellement coupée (Bruyant, 1909a). Situé à une certaine distance à l'ouest du déversoir alors actif, l'ancien déversoir se trouve à une altitude significativement plus élevée. Aidé de Reynouard, Bruyant a évalué à 4,84 m la hauteur de ce déversoir désaffecté par rapport au niveau du « plan d'eau ». En fait, sur le schéma qui accompagne son texte, la dénivelée de 4,84 m est plutôt celle entre les bases des deux déversoirs (Fig. 6). Bruyant observe que le thalweg du déversoir ancien converge vers celui du déversoir alors actif. Ceci est confirmé par Eusébio et Reynouard (1925) qui reprennent presque intégralement le texte et le schéma en coupe de Bruyant et y ajoutent un schéma en plan. Sur ce schéma, les deux canaux confluent suivant un angle aigu. Selon Bruyant, le déversoir ancien « amenait les eaux à un gradin qui déterminait une cascade ». Cette cascade se serait donc située en amont du point de confluence.

Les schémas publiés en 1909 et en 1925 (Fig. 6) paraissent un peu trop simplifiés pour être très utiles, cependant une visite sur place nous permet de comprendre que le déversoir surélevé devait se trouver sur le talus qui ferme l'entrée du lac du côté ouest (Fig. 7). Le sommet de ce relief forme aujourd'hui un replat subcirculaire, d'environ 12 m de diamètre, qui se rattache vers l'ouest, par une légère dépression, à la pente de la

vaste échancrure en V qui donne accès au lac. Le replat s'élève à 4–5 m environ au-dessus du niveau de l'eau. Dans le projet de 1867, le canal de dérivation des eaux de la Couze Chambourguet devait déboucher en surplomb sur le lac en empruntant la dépression entre le talus et la pente (Fig. 8). Peu après 1951, le talus a été rogné sur une bande latérale à la plateforme, de 5 à 6 m de largeur et 22 m environ de longueur, par des travaux d'élargissement de l'accès au lac. Ces travaux sont prévus sur le dessin d'aménagement de 1951 (AD63, 1806 W 13) et le talus s'est fortement réduit sur celui de 1961 (AD63, 851 FI 5).

Un document permet de se faire une idée assez précise de l'ancienne topographie des lieux : en 1867, dans le cadre du projet de barrage du lac (cf. Sect. 2.3), l'ingénieur ordinaire des Ponts et Chaussées fit un nivellement détaillé de l'entrée du lac et en tira un rendu en courbes de niveau au pas d'un mètre, à l'échelle 1/500 (AD63, S 104 h ; Fig. 8). Nous avons utilisé ces données pour tracer une coupe verticale passant vers le milieu de la plateforme, dans une direction à peu près tangente au lac, à environ 11 m du bord de l'eau (Fig. 9). Le rapprochement de ce schéma avec celui de 1909 (Fig. 6) montre, en dépit des réserves émises plus haut sur la précision de ce dernier, une grande similitude entre eux et suggère très fortement que le déversoir surélevé de Bruyant est en fait la dépression qui relie, encore aujourd'hui, la plateforme à la pente (Fig. 7). Cette dépression était certainement plus nette en 1909, et *a fortiori* en 1867, en particulier dans sa portion nord-est qui converge vers le thalweg. Cette portion du talus a été fortement entaillée après 1951, avant d'être parementée de pierres appareillées.

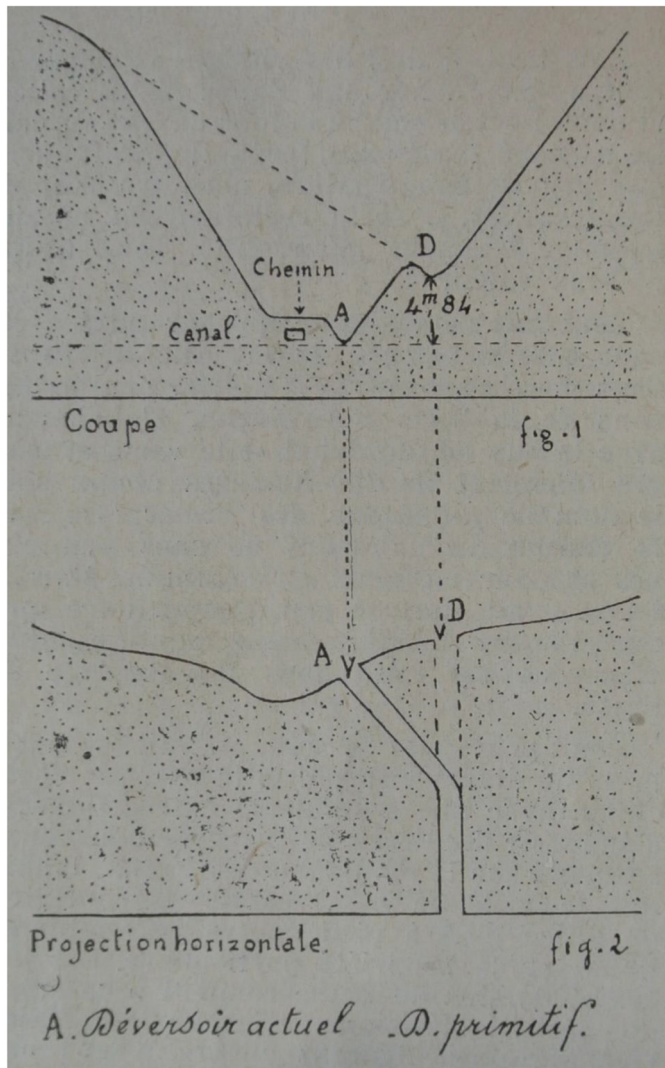


Fig. 6. Vues en coupe et en plan de l'entrée du lac Pavin en 1909. La coupe est vue depuis l'extérieur, en direction du lac. Dessin de Eusébio et Reynouard (1925), d'après Bruyant (1909a, b).

Fig. 6. Cross-section (looking towards the lake) and plan of the entrance of lake Pavin in 1909. Sketch by Eusébio and Reynouard (1925), adapted from Bruyant (1909a, b).

3.2 Un canal désaffecté

Dans la même publication, Bruyant (1909a) nous apprend que Reynouard a mis au jour, à 30 m du bord du lac, un canal maçonné (Fig. 6) qui était destiné à alimenter une rase d'irrigation (rase : nom donné localement aux étroites rigoles qui irriguent les prairies). Les textes ne précisent pas que le canal était couvert, mais c'est évident sur le schéma (Fig. 6). La rase, passant au-dessus du bord oriental du ravin qui fait communiquer le lac avec la plaine du Gelat, partait à flanc de montagne vers l'est, jusqu'au hameau d'Olpillière, au sud de Besse. Elle se devine encore dans les prés à quelque distance du lac et est très apparente sur un relevé stéréophotogrammétrique de haute résolution (Thouret *et al.*, 2016). Le canal découvert par Reynouard présente un décalage

d'altitude de 21 cm par rapport au « seuil actuel » (en 1909). Comme la tradition orale rapporte que la rase était opérationnelle « il y a un siècle et demi, environ », Bruyant en déduit que le lac a perdu « au minimum 21 cm en moins d'un siècle », soit entre la seconde moitié du XVIII^e siècle et le moment (1859) où le niveau du lac aurait été stabilisé (« à partir de 1859, le seuil a été protégé contre toute cause de destruction »). Il attribue l'abaissement du niveau du lac à l'intervention épisodique des « riverains de la Couze », qui recreusaient parfois le seuil en temps de sécheresse en vue d'assurer une alimentation continue à leur rivière. Cette hypothèse sera reprise par Eusébio et Reynouard (1925), qui précisent que les riverains concernés sont « les meuniers ». L'interventionnisme des riverains peut être illustré par une remarque de Lecoq (1861a) qui rapporte que, vers 1858–1859, « quelques voisins avaient commencé à détruire les premières grilles ».

Il faut noter que le texte de Bruyant n'étaye pas sa conclusion : il écrit que « le canal de prise d'eau, à une trentaine de mètres du bord, se trouve à 0 m 21 au-dessous du seuil actuel ». S'il est effectivement « au-dessous », on ne peut pas en déduire que le niveau a baissé. Cependant, sur la coupe verticale schématique qui accompagne son texte, le canal se trouve au-dessus du seuil. C'est aussi le cas dans le schéma publié par Eusébio et Reynouard (1925) (Fig. 6). Eusébio et Reynouard écrivent « qu'à la fin du XVIII^e siècle, le sol du canal se trouva plus élevé que le plan d'eau ». C'est une version un peu différente de celle de Bruyant, aussi bien en ce qui concerne le repère chronologique (décalage par rapport à l'actuel pour Bruyant, par rapport à la fin du XVIII^e siècle pour Eusébio et Reynouard) que le sens de la dénivellée ; cependant, ils en déduisent aussi que le niveau du lac a baissé légèrement. Il est très probable que le canal était effectivement décalé vers le haut en 1909, sinon ni Bruyant, ni Eusébio et Reynouard n'en auraient tiré la moindre conclusion. Ces trois auteurs ne suggèrent pas de relation entre les déversoirs (le contemporain et l'ancien) et le canal maçonné désaffecté. Sur les deux coupes verticales publiées (Fig. 6), ce canal se trouve dans une position décalée vers l'est par rapport au déversoir moderne.

Vers 1834–1835, au cours d'une excursion estivale au Pavin, Lecoq remarque que des mottes de gazon ont été déposées au « dégorgeoir » du lac « pour élever la surface du lac, et se procurer ensuite, par ce moyen, des eaux abondantes pour l'irrigation des prairies inférieures » (Lecoq, 1835). Ce témoignage très précieux conforte la thèse de Bruyant, Eusébio et Reynouard : au début du XIX^e siècle, le niveau du canal d'alimentation de la rase devenait tangent, de sorte qu'il était nécessaire de surélever le niveau du lac pour que le canal demeure opérationnel. Dans le même ouvrage, Lecoq (1835) décrit l'irrigation des prairies au moyen de rases comme une pratique alors courante dans la région. La rase alimentée par le lac Pavin a été suivie sur un parcours d'environ 3,5 km (distance approximative entre le lac et Olpillière) par Bruyant et Reynouard (Bruyant, 1909a). Cet ouvrage hydraulique était donc important et cela justifiait que l'on fit des efforts de surélévation du seuil pour assurer son approvisionnement par un canal qui, lui-même, était d'un travail soigné (maçonné et couvert). À l'opposé, apporter de l'eau à la Couze Pavin (pour les besoins des meuniers) était plus simple, il suffisait pour cela de recreuser le déversoir.

4 Le niveau du lac entre le XVIII^e siècle et le milieu du XIX^e siècle

Si l'on suit Bruyant, Eusébio et Reynouard, le niveau du lac n'a pas varié entre 1859 et le début du XX^e siècle. Il aurait, par contre, baissé un peu (environ 21 cm) entre la fin du XVIII^e siècle et sa stabilisation en 1859. Or, une autre approche, indépendante de ces auteurs, peut nous donner une idée de la situation qui prévalait au XVIII^e siècle et au début du XIX^e siècle : la position de la beine. La beine est une « sorte de banquette existant sur le bord du lac, au-delà de laquelle le niveau plonge brusquement et sur laquelle des pierres plus ou moins grosses ont paru à des esprits imaginatifs simuler un pavage... » (Fournier, 1971). Aujourd'hui, cette banquette est observable sur presque tout le pourtour du lac, à l'exception d'un secteur de falaises immergées, à l'est : « la beine ne mesure que quelques mètres, mais elle se distingue très nettement là où elle n'est pas brisée par les rochers » (Bruyant et Eusebio, 1904). Actuellement, elle se développe sur deux à quatre mètres de largeur, avec une pente très faible, à partir du bord sous environ 0,3 m d'eau (Fig. 10) (détails in : Thouret *et al.*, 2016). Une beine lacustre est une banquette littorale comprenant typiquement une partie submergée et une partie émergée (Touchart, 2000 ; Provencher et Dubois, 2008). En général, la beine submergée décline faiblement vers le lac, depuis le niveau moyen de l'eau (au bord) jusqu'au niveau d'étiage (vers l'intérieur du lac) où elle est délimitée par un talus abrupt, le mont. La beine submergée se forme par l'accumulation d'éléments fins apportés par la houle et d'éléments détritiques variés provenant du versant (Provencher et Dubois, 2008). La beine émergée est un replat qui prolonge, sur la rive, la beine submergée. Elle combine une origine érosive, par les vagues, et une croissance par accumulation détritique. La beine émergée ne se rencontre que très localement au Pavin. La partie visible de la beine submergée du Pavin est composée de blocs de lave et de branches (Fig. 10) issus de l'érosion des versants, suivant un processus d'alimentation assez commun (Provencher et Dubois, 2008). Cette forme géomorphologique très caractéristique au Pavin n'y a pas encore été étudiée en détail, ni dans sa structure, ni dans sa dynamique, ce qui limite un peu l'argumentation qu'on peut essayer d'en tirer. À titre d'hypothèse, supposons-la constituée d'une combinaison de matériaux fins (apportés par la houle) qui auraient initié et qui entretiennent un coussin sur lequel viennent s'amortir et se déposer des colluvions et des blocs issus du démantèlement naturel, actif (Renault, 2006 ; Thouret *et al.*, 2016), des flancs internes du cratère. Son existence nous permet de déduire des enseignements utiles de trois textes anciens qui la décrivent d'une façon suffisamment précise pour qu'il n'y ait pas de doute sur leur objet.

Le premier texte est tiré du manuscrit dit *Godivel*, publié par différents auteurs (Jaloustre, 1884 ; Boyer Vidal, 1913) : « On voit à l'entour de ce lac un pavé de trois à quatre pieds de largeur que l'eau couvre entièrement et après lequel on ne voit plus le fond, ce pavé est aussi régulier que ceux de nos rues, avec cette différence néanmoins que ce sont de grands quartiers de pierres de diverses espèces et de grandes entremêlées... ». Ce manuscrit daterait, suivant les publications, de la seconde moitié du XVII^e siècle (Jaloustre, 1884 ; Meybeck, 2016a), du début du XVIII^e siècle (Meybeck, 2019) ou du XVIII^e siècle, sans précision (Fournier, 1971).

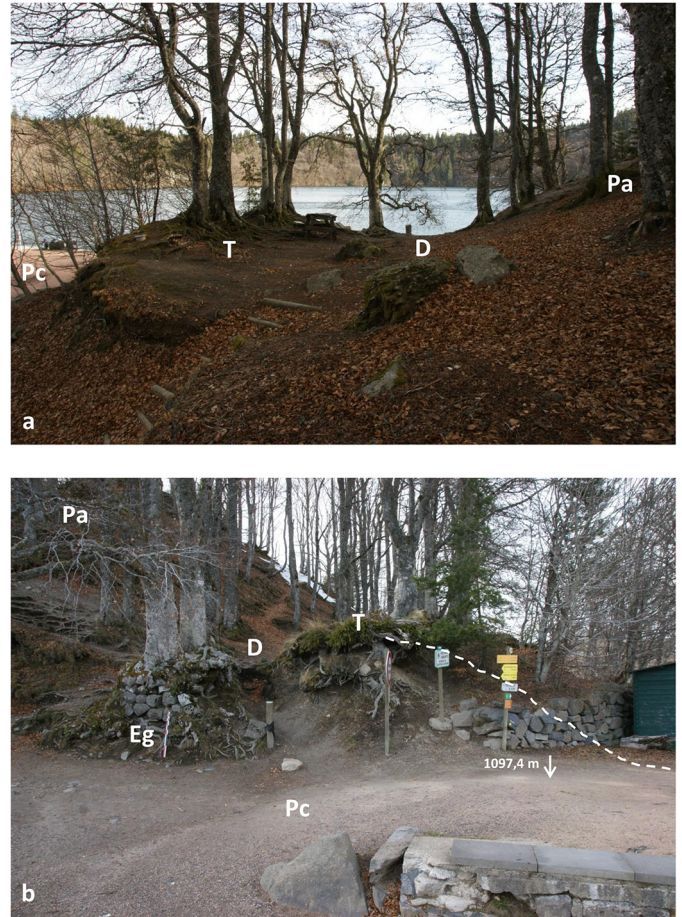


Fig. 7. Talus occidental de l'entrée du lac aujourd'hui, vu depuis l'extérieur (a) et depuis le lac (b). T: ce qui reste du talus après les travaux des années 1951 et suivantes. D: dépression entre le talus et la pente, Pa, de la grande échancrure d'accès au lac. Pc: plateforme de circulation au bord du lac. L'échelle graduée (e.g., Fig. 7b) mesure 1 m. La différence d'altitude entre la surface du lac et le talus T est d'environ 4,5 m. L'altitude de la plateforme au voisinage de la flèche est d'environ 1097,4 m. Ligne en tirets: profil approximatif du talus avant 1951.

Fig. 7. Western embankment of the entrance of the lake site in 2019, looking towards the lake (a) and outwards (b). T: remains of the western embankment after the works performed from 1951 onwards. D: depression between the embankment and Pa, the side slope of the entrance of the lake. Pc: platform. Rule for scale (e.g., Fig. 7b) = 1 m. The difference in elevation between T and Pc is about 4,5 m. Elevation of the platform (arrow) is about 1197.4 m a.s.l. Dashed line: approximate profile of the embankment before 1951.

Le second texte est extrait de la relation d'un voyage effectué en Auvergne en 1787–1788 (Legrand d'Aussy, 1794) : « Une autre singularité est la configuration du bord inférieur de ce bassin. C'est une sorte de banquette horizontale, qui, d'un côté tenant au rivage, de l'autre, s'avance à douze à quinze pieds sous l'eau. Dans cet espace, elle est couverte de fragments de laves, placés les uns près des autres, comme le ferait un pavé naturel [...]. Par de-là, elle finit brusquement ».

Le troisième texte est le témoignage de Lecoq (1835) : « Une espèce de corniche entoure le lac, et se trouve couverte

de morceaux de lave et de fragments de rochers tombés des bords supérieurs. On la voit se prolonger sous l'eau, à une petite distance du rivage ; puis tout à coup, la teinte noire des eaux annonce leur profondeur, et les escarpements du sol submergé ». La suite du texte permet de comprendre que Lecoq et ses compagnons d'excursion ont emprunté cette voie pour faire partiellement le tour du lac.

Ces trois textes décrivent évidemment la même forme de relief, la beine. À l'époque du texte le plus ancien (Godivel), elle était immergée mais peu profonde puisque suffisamment visible pour frapper le regard des visiteurs. Actuellement, la transparence des eaux du Pavin est faible : une grosse pierre sombre, comme le sont les laves affleurant dans le cratère du Pavin, ne peut pas être vue au-delà de 2,5 à 3 m, environ. Eusébio et Reynouard (1925) rapportent le résultat d'une mesure de transparence effectuée par la méthode de Secchi. Celle-ci consiste à noter à partir de quelle profondeur un disque de porcelaine blanche, de 20 cm de diamètre, n'est plus visible : 4,25 m pour le Pavin. Une pierre sombre était moins visible qu'un disque blanc. Le texte de Legrand d'Aussy et, encore plus clairement celui de Lecoq, indiquent sans ambiguïté que la beine était, à leurs époques respectives, à fleur d'eau, voire en partie exondée. La conclusion qui semble s'imposer est que le niveau de la beine par rapport à la surface du lac a peu varié entre le début et la fin du XVIII^e siècle, puis il n'a plus varié entre la fin du XVIII^e siècle et les années 1830–1835. Aujourd'hui, on ne saurait faire le tour du lac en marchant sur la beine qu'avec de l'eau jusqu'aux genoux, ce qui signifie que son niveau relatif par rapport à celui du lac a pu descendre de quelques décimètres depuis 1835. Malgré notre méconnaissance de la dynamique de la beine, il peut être suggéré qu'elle puisse gagner de l'altitude absolue par recharge, car l'érosion est active sur les flancs internes du cratère (Renault, 2006 ; Thouret *et al.*, 2016), mais au contraire, elle ne puisse pas en perdre. Ainsi, en première approximation, en tirant argument uniquement du niveau de la beine, le niveau du lac serait peu ou prou aujourd'hui ce qu'il était au début du XVIII^e siècle.

5 Hésitations de la littérature récente sur les variations de niveau d'origine anthropique

Omalý (1968) ne distingue pas clairement le canal maçonné et le déversoir. Tout en rappelant que l'ancien déversoir était surélevé de 4,84 m par rapport au lac, elle écrit que la baisse de niveau de 21 cm a été déduite des relevés « effectués à partir des deux déversoirs ». Elle adopte l'assertion de Bruyant (1909a), selon laquelle la rase était encore utilisée « il y a un siècle et demi, environ » (ce qui nous conduirait vers : 1909–150 = 1759) et en déduit que « la rase était encore utilisée il y a deux siècles » (soit vers : 1968–200 = 1768). Fournier (1971) remarque que « l'indication de "deux siècles", donnée par Omalý, demanderait à être mieux étayée » et ajoute que « le chiffre de 4,84 m peut sembler, à première vue, un peu fort ».

Selon Meybeck (2016a), le lac, qui a aujourd'hui une profondeur de 92 m, était probablement plus profond de 4 m avant le creusement de l'exutoire à l'air libre, naturel, à la fin du XVIII^e siècle (traduit de l'anglais : « ... probably 4 m deeper before the excavation of natural aerial outlet in the late

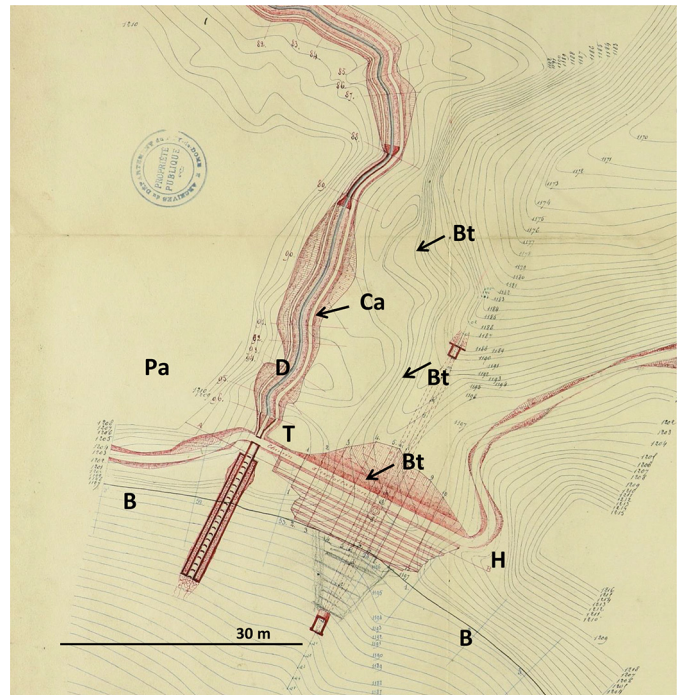


Fig. 8. Extrait du plan topographique de l'entrée du lac en 1867 (AD63, S 0104 h). Relevé en courbes de niveau et projets d'aménagement (en rouge). B : bord du lac ; T : sommet du talus occidental ; D : dépression entre le talus et la pente de l'échancrure d'entrée du lac ; Bt : ligne de niveau de la base du talus occidental ; Ca : canal d'amenée d'eau depuis la Couze Chambourguet ; Pa : pente interne de l'échancrure d'accès au lac ; H : emplacement de l'hôtel-restaurant actuel. Les points D et T correspondent à peu près aux mêmes points sur la figure 6.

Fig. 8. Plan of the access zone of the lake in 1867 (extract). Contour lines and laying out project (in red). B: lake shore; T: summit of the western embankment; D: depression between the embankment and Pa, the side slope of the entrance of the lake; Bt: contour line of the base of the western embankment; Ca: end of the diversion channel of Couze Chambourguet river; Pa: side slope of the entrance of the lake; H: situation of the Hotel-restaurant in 2019. Points D and T, are approximately the same as on Figure 6.

1800th...»). Il écrit plus loin, dans le même article, que les mesures de profondeur effectuées par Chevalier, en 1770, restent valides aujourd'hui « si l'on prend en considération l'abaissement du lac, de 96 à 92 m, quand le seuil naturel fut recreusé à la fin des années 1800 » (« if one considers the lowering of the lake, from 96 to 92 m, when the natural sill was dug out in the late 1800s »). Il y a contradiction entre les deux assertions. En effet, « the late 1800th » se traduit en français par « la fin du XVIII^e siècle », tandis que « the late 1800s » se traduit par « la fin des années 1800 », soit la fin du XIX^e siècle. Le doute induit par ce désaccord est levé dans un second article où l'auteur écrit « qu'entretemps le conseil municipal de Besse modifie l'exutoire du lac, qui est décalé de quelques mètres vers le NE, et le niveau du lac est abaissé de 4 m pour atteindre son niveau actuel » (« Meanwhile, the town council of Besse modifies the lake outlet, which is shifted by few meters to the NE, and the lake level is lowered by 4 m to its current level »

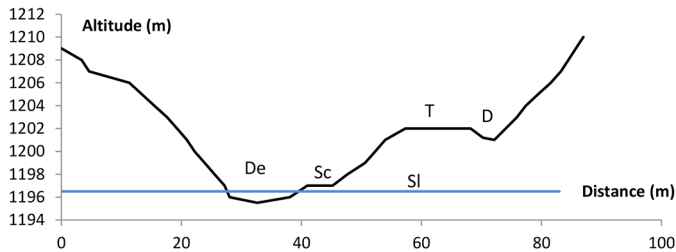


Fig. 9. Coupe transversale de l'entrée du lac, vue depuis l'extérieur, à environ 11 m du bord de l'eau, dans une direction NO-SE. Profil reconstitué à partir des courbes de niveau du plan topographique de 1867 (Fig. 8). SI: surface du lac; T: talus occidental; De: déversoir actif; Sc: surface de circulation; D: ancien déversoir selon l'interprétation de Bruyant (1909a), Eusébio et Reynouard (1925).
Fig. 9. Cross-section of the entrance of the lake site, as seen from outwards, looking south-east, at about 11 m away from the lake shore. Profile computed on the basis of the contour lines of the topographic map of 1867 (Fig. 8). SI: lake surface; T: western embankment; De: active outlet; Sc: walking area; D: former outlet, as suggested by Bruyant (1909a), Eusébio and Reynouard (1925).

(Meybeck, 2016b)). La phrase ne date pas l'opération (déplacement de l'exutoire et abaissement du niveau du lac de 4 m) mais son contexte indique sans ambiguïté la fin du XIX^e siècle.

Se référant explicitement à Meybeck (2016a, 2016b), Chassiot *et al.* (2016) retiennent la thèse d'une stabilisation du niveau du lac à la fin du XVIII^e siècle : « finalement, l'exutoire du Pavin a été stabilisé à une altitude de 1197 m seulement récemment, par la construction d'infrastructures humaines à la fin du XVIII^e siècle » (« Finally the outlet of Pavin has been stabilized at an altitude of 1197 m only recently, by the building of human infrastructures at the end of the eighteenth century »). Quelques lignes plus bas, dans le même article, ils font état d'un abaissement artificiel du niveau du lac à la fin du XVIII^e siècle : « parce que le creusement de l'exutoire à l'air libre, naturel, fit chuter le niveau du lac Pavin d'environ 4 m à la fin du XVIII^e siècle, ces changements de sédimentation dans [la carotte] PAV10E peuvent être reliés à une chute abrupte du niveau du lac d'environ 13 m » (« Because excavation of the natural aerial outlet artificially dropped the level of Lake Pavin by ca. 4 m in the late XVIIIth century (Chap. 1, this issue), these sedimentation changes in PAV10E can be related to an abrupt lake level drop of roughly 13 m »). Cette dernière citation est intentionnellement assez longue pour donner le contexte et éclairer les explications et la discussion qui suivent.

L'analyse de sédiments lacustres échantillonnés par carottage permet à Chapron *et al.* (2010) d'émettre l'hypothèse qu'un glissement de terrain subaquatique significatif s'est produit entre 580 et 640, environ. Dans une seconde étude, Chapron *et al.* (2012) remarquent qu'une séquence particulière, fossilisée, de sédimentation (transition entre une formation de diatomite et le faciès littoral) se trouve située, dans la carotte PAV10E, sous 17,5 m d'eau alors qu'aujourd'hui la séquence équivalente est située aux environs de 26 m sous la surface. Ils en déduisent que le niveau du lac a perdu soudainement de l'altitude à un moment donné de son histoire. Ils évaluent cette perte à environ 6,5 m pour tenir compte du fait que l'installation d'infrastructures, vers 1855, aurait relevé



Fig. 10. La beine, vue du chemin de ronde à l'ouest du lac.
Fig. 10. The beine, as seen from the path, west of the lake.

le niveau du lac de 2 m (« This abrupt change in sedimentation from a deeper to a shallower environment occurring below 17.5 m water depth indicates a rapid lake level drop of ca. 6.5 m at that time (taking into consideration that first human infrastructure around 1855 at the outlet induced a lake level rise of ca. 2 m »)). Dans l'extrait cité plus haut, Chassiot *et al.* (2016) ne reprennent pas à leur compte ce calcul, mais plutôt, considérant une chute de niveau hypothétique d'environ 9 m (*i. e.*, 26–17 m), ils concluent à une perte d'altitude totale d'environ 13 m, pour tenir compte du supposé saut de 4 m intervenu à la fin du XVIII^e siècle. De plus, ils associent cette chute de niveau au glissement de terrain subaquatique intervenu vers 600 d'après Chapron *et al.* (2010, 2012). Les fortes vagues induites par le glissement de terrain auraient fortement endommagé la digue naturelle, réduisant sa hauteur. Cette conclusion (chute de niveau de 13 m vers 600) a été adoptée par Meybeck (2016a), tandis que Chassiot *et al.* (2018) proposent une chute de niveau de 9 m environ.

6 Discussion

6.1 Essai de mise en cohérence des différentes sources documentaires

La thèse d'un abaissement artificiel du niveau du lac, de 4 m d'amplitude, intervenu à la fin du XVIII^e siècle (Meybeck, 2016a) ou à la fin du XIX^e siècle (Meybeck, 2016a, 2016b), reprise par Chassiot *et al.* (2016), n'est pas documentée : les auteurs ne donnent pas leurs sources et nos propres recherches ne nous ont pas permis de trouver d'éléments dans ce sens. Cette thèse est à l'exact opposé des *desiderata* exprimés au cours du XIX^e siècle par les usagers qui ont toujours souhaité relever le niveau du lac (*cf.* Sect. 2.3) et elle est contredite par la documentation qui témoigne plutôt de la stabilité (Annexe B). Faute de plus d'informations, cette thèse, peut-être inspirée tout-à-la fois des projets non réalisés de 1848–1898 (pour l'intention municipale de modifier le niveau du lac) et des observations de 1909 (pour la baisse de niveau d'environ 4 m), sera abandonnée.

La thèse d'une élévation artificielle du niveau du lac, de 2 m d'amplitude, vers 1855 (Chapron *et al.*, 2012), n'est pas

non plus documentée. Lecoq (1861a) n'y fait aucune allusion, présentant au contraire l'intervention de Rico en 1858 comme pionnière. Cette thèse contredit les auteurs du début du XX^e siècle, dont certains ont été actifs au Pavin dès la fin du XIX^e siècle (Bruyant, Reynouard), et qui datent les premiers aménagements de l'exutoire du Pavin à 1859. Elle est incompatible avec la documentation sous différents aspects (Annexe C). Nous ne retiendrons pas cette thèse. Elle n'a d'ailleurs pas été adoptée dans des articles parus après 2012 (Chassiot *et al.*, 2016, 2018), sans toutefois être explicitement remise en cause.

Les données documentées ne sont pas elles-mêmes exemptes d'incertitudes, voire de petites contradictions dont certaines ont été soulignées plus haut, mais les incertitudes numériques restent dans des limites de l'ordre du mètre. Il y a aussi des incertitudes sur les datations. Par exemple, selon le témoignage de Lecoq (1835), la rase a probablement été abandonnée plus tard qu'à la fin du XVIII^e siècle, contrairement à ce que supposaient Bruyant (1909a), Eusébio et Reynouard (1925), sur la foi de la tradition orale. Ces réserves étant posées, une séquence simplifiée de l'histoire récente du lac, respectant l'essentiel des témoignages anciens, peut être proposée :

- le niveau du lac a été établi, pendant une durée indéterminée, à une époque antérieure au XVIII^e siècle, à une altitude d'environ 1202 m (1197 m + 4,83 m, arrondi) ;
- son altitude a ensuite globalement baissé, suivant une séquence temporelle inconnue, pour se stabiliser, avant la fin du XVIII^e siècle, vers 1197 m. Les fluctuations de niveau, naturelles (effets météorologiques) ou d'origine humaine (installations de mottes de terre), pouvaient cependant être significatives (de l'ordre du mètre ?) ;
- de 1859 à aujourd'hui, l'altitude du lac est restée autour de 1197 m, avec des fluctuations temporelles faibles (pluri-décimétriques).

La séquence proposée ci-dessus tente de respecter et de mettre en cohérence la documentation historique. L'étape suivante consiste à y intégrer les conclusions des études sédimentologiques les plus récentes, en ne retenant cependant que les conclusions qui ne prennent pas explicitement en compte les variations historiques de niveau du lac discutées dans cet article (+2 m ou -4 m). Cette seconde séquence, plus complète, est basée sur les données publiées à ce jour. Elle pourra être affinée ou même revue dans l'avenir, si de nouvelles observations conduisent à compléter ou modifier les conclusions actuelles des études sédimentologiques. Elle peut être déclinée, en l'état actuel des connaissances, de la façon suivante (Fig. 11) :

- le niveau du lac a été établi, pendant une durée indéterminée, à une époque antérieure à 580–640, à une altitude d'environ 1206 m (soit : 1197 m–17 m (profondeur actuelle de l'interface fossilisée diatomite / faciès littoral) + 26 m (profondeur actuelle de l'interface active diatomite / faciès littoral (*cf.* Sect. 5) ;
- vers 580–640, le niveau du lac a connu une baisse soudaine qui l'a finalement conduit, suivant une séquence inconnue – en une seule fois ou en plusieurs étapes trop courtes pour imprimer une marque encore perceptible dans les pentes du

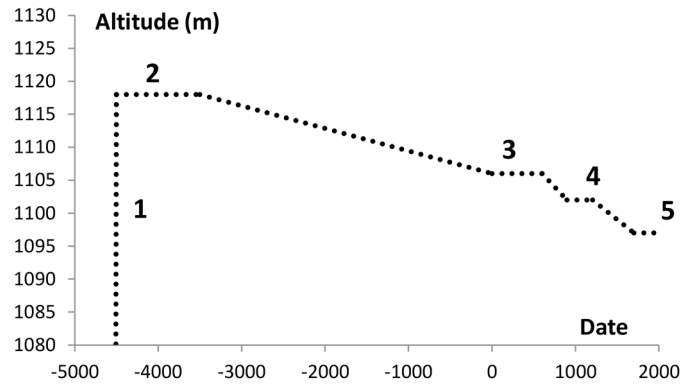


Fig. 11. Évolution temporelle de l'altitude du lac Pavin, schéma récapitulatif très simplifié. L'incertitude est élevée suivant les deux axes (dates et altitudes). 1 : remplissage du cratère, probablement à brefs délais après sa formation (Thouret *et al.*, 2016) ; 2 : période initiale de hautes eaux, suivie d'une baisse de niveau ; 3 : période de stabilité, s'achevant par une chute soudaine entre 580 et 640 ; 4 : nouvelle période de stabilité (correspondant au déversoir fossile), terminée par un démantèlement du barrage naturel ; 5 : période de stabilité actuelle, commencée au plus tard vers le début du XVIII^e siècle.

Fig. 11. Elevation of the lake surface vs. time; highly simplified sketch. Important uncertainty both in time and elevation. 1: early lake filling stage; 2: initial high level stage, followed by level drop; 3: period of stability, ended by sudden drop c 580-640 AD; 4: new period of stability, corresponding to the fossil outlet, ended by dismantling of the natural levee; 5: present period of stability, started around the beginning of the XVIIIth century onwards.

lac – jusqu'à l'altitude de 1202 m (celle du déversoir surélevé) ;

- après une étape vers 1202 m, de durée suffisamment longue pour que se mette en place un déversoir individualisé, le niveau du lac est reparti à la baisse. La baisse de niveau soudaine intervenue vers 580–640 a donc eu une amplitude maximale de 4 m (1206–1202 m) ;
- vers la fin du XVII^e siècle ou le début du XVIII^e siècle, le niveau du lac était déjà établi vers 1197 m. Les années 1859–1860 ont sans doute marqué un arrêt définitif des creusements intentionnels du seuil. Après 1860, le niveau du lac a pu être stabilisé pendant deux à trois décennies par un entretien régulier de la digue, mais ensuite son abandon jusqu'au milieu du XX^e siècle n'a, semble-t-il, pas été marqué par une reprise significative de l'érosion.

La séquence proposée ci-dessus est évidemment très simplifiée et ignore la possibilité de sensibles variations naturelles du niveau des lacs français durant les derniers siècles (revue et discussion dans Chapron *et al.*, 2010). En particulier, si le niveau maximal est contraint par la hauteur de l'exutoire, ce n'est pas le cas du niveau minimal. Des niveaux assez bas ne pu exister. En outre, il reste une question en suspens : s'il y a eu pendant un certain temps un niveau stable de lac vers 1202 m, il devrait exister des traces d'une beine vers 1201–1202 m. Elle pourrait éventuellement être le support du tronçon Est-Nord-Est du chemin du tour du lac, qui a est à peu près à

cette altitude (Thouret *et al.*, 2016), mais aucun relief ne permet de soupçonner son existence ailleurs. Le chemin du tour du lac a été tracé en 1909 sous l'égide du Touring Club (Eusébio et Reynouard, 1925 ; Omaly 1968), par prolongement d'un sentier qui existait déjà au bord occidental du lac en 1861 (Fig. 4) (Lecoq, 1861a) et se terminait sans issue au contact, alors infranchissable, de grands éboulis (Morin, 1888). Peut-être la période concernée par un lac à la cote 1202 m a-t-elle été une étape relativement courte dans la séquence de descente du niveau du lac depuis un niveau initial indéterminé (dates et altitudes) jusqu'à l'actuel. Cette descente avait aussi compris, avant 580–640, une étape vers 1206 m, suffisamment longue pour que se mette en place un mécanisme sédimentaire équilibré, avec production de diatomites (Chapron *et al.*, 2012). Or, aucune trace de beine fossile n'a été signalée vers 1206 m.

6.2 Modalités d'effacement de la digue à +4,8 m

On peut s'interroger sur les modalités d'une baisse historique de niveau d'environ 4,8 m. Dans l'hypothèse d'une baisse plus ou moins régulière, au rythme de l'érosion naturelle et des coups de pioche des riverains, sur la base d'environ 21 cm par siècle et avec toutes les réserves qu'on peut avoir sur ce taux d'érosion estimé par Bruyant (1909a), la descente se serait étalée sur environ 23 siècles. Or, la baisse de niveau de 4,8 m est forcément plus récente que celle, brutale, des environs de l'an 600. Il faut donc supposer des épisodes plus rapides que 21 cm par siècle. Ils peuvent être imputables à des petits événements : selon Bruyant et Eusebio (1904), le débordement de 1861 « entraîna une partie de la chaussée ». Ils peuvent aussi être imputables à l'intervention des riverains en périodes prolongées de basses eaux. Toutefois, les impératifs de l'irrigation des prairies par la rase s'opposaient à ceux de l'alimentation des moulins par la Couze Pavin et cette opposition a probablement contribué à ralentir la dynamique anthropique d'abaissement du niveau du lac. De plus, l'irrigation étant une activité saisonnière (Lecoq, 1835), il pouvait y avoir une forme de compromis entre les différents intervenants.

Un autre aspect de la question doit aussi être évoqué : la baisse de niveau du seuil s'est accompagnée de son très large évaselement et d'un déplacement du déversoir. Dans quelles conditions cela s'est-il produit et quel a été le volume des matériaux déplacés ? Pour nous en faire une idée, partons de l'hypothèse que la plateforme surélevée ouest (Fig. 7) est un lambeau de la digue naturelle à l'époque où le déversoir fossile était actif. Le plan de 1867 (Fig. 8) permet de restituer cette plateforme dans un état moins dégradé qu'aujourd'hui et de l'extrapoler pour refermer le seuil du lac avec une digue naturelle atteignant au minimum la cote 1202 m. Pour reconstituer cette digue à partir de sa topographie résiduelle en 1867, il faut lui apporter très approximativement de 3000 à 5000 m³ de matériaux. Cette estimation quantitative suggère, malgré sa très grande imprécision, que la baisse de niveau du lac (d'environ 4,8 m) a été accompagnée ou suivie du démantèlement d'un volume important de la digue naturelle.

Les deux caractères qui ressortent de la discussion précédente, rapidité relative de la baisse de hauteur du seuil et volume important déplacé, pourraient être expliqués par une

seule, ou plusieurs ruptures successives de la digue naturelle. En effet, une érosion régulière aurait incisé le passage (d'un second déversoir, concurrent du premier) sans beaucoup l'élargir, tandis qu'aucun intérêt économique ne pouvait justifier l'effort d'un élargissement significatif du passage avant l'exploitation halieutique du lac. Or, l'étude des sédiments du fond du lac a suggéré qu'il y avait eu un débordement catastrophique engendrant une rupture de digue entre la fin du VI^e siècle et le début du VII^e siècle, ainsi que rappelé plus haut, mais qu'il y avait aussi eu, plus tard, entre le XIII^e siècle et le XIV^e siècle, un important glissement de flanc subaquatique, possiblement accompagné de vagues ayant entraîné une nouvelle rupture de digue (Chapron *et al.*, 2010 ; Chassiot *et al.*, 2016). Ainsi, pour expliquer le déversoir perché, l'hypothèse d'un ou plusieurs écroulements soudains de la digue – plutôt qu'une action humaine étalée dans le temps associée à une lente érosion naturelle – ne doit pas être écartée.

De fait, cette forme naturelle était très fragile : la masse du talus résiduel est une formation sableuse préexistante à l'éruption du Pavin, dont l'équivalent peut être observé sur plusieurs mètres d'épaisseur au sud et au sud-ouest du lac. Cette formation repose elle-même sur le tuf trachytique compact signalé par plusieurs auteurs, mais non visible actuellement à cet endroit. L'ingénieur ordinaire qui avait assuré la pré-étude du projet de 1867 (AD63, S 104-6) avait déjà remarqué que ce « bourrelet » était constitué de « matières meubles », qui avaient selon lui été incisées sur 5 m de hauteur, soit la différence d'altitude entre sa surface et la base – en tuf compact, plus résistant – de l'émissaire. Le mode le plus fréquent d'effondrement d'une digue constituée de matériaux meubles, naturelle ou artificielle, est le renard hydraulique (Foster *et al.*, 2000). Ce phénomène consiste en un développement extrêmement rapide, à partir de l'aval, d'une voie d'eau souterraine initiée par érosion interne de la digue. L'effondrement engendré par un renard est quasi instantané, il peut mobiliser de très grands volumes de matériaux et d'eau, puis causer des catastrophes matérielles et humaines.

6.3 Implications de la révision des variations historiques de l'altitude du lac

Nous avons souligné, en introduction, le fait que la profondeur est un paramètre pertinent pour l'étude du lac dans presque tous ses aspects. Notre travail propose, en le justifiant, un schéma de variations de son altitude – directement liée sa profondeur – mais, surtout, il remet en question l'amplitude des variations brutales d'altitude : nous concluons à une amplitude maximale de chute instantanée d'environ 4,8 m, tandis que des valeurs de 6,5 m (Chapron *et al.*, 2012), 9 m (Chassiot *et al.*, 2018) et 13 m (Chassiot *et al.*, 2016) ont été avancées récemment. Les variations de niveau du lac et leur dynamique ont des implications dans différents domaines, et leur examen relève des disciplines concernées. Ce paragraphe en évoque quelques-unes, en mettant l'accent sur les aspects catastrophiques.

On peut supposer que les implications d'une baisse de niveau sont faibles pour des paramètres qui varient peu et d'une façon régulière avec la profondeur, tout au moins dans les premiers 20 m, par exemple la teneur en carbone organique dissous (Jézéquel *et al.*, 2016). Par contre, les implications

devraient être plus fortes pour des paramètres qui présentent une variation complexe avec la profondeur. Par exemple, la courbe de températures présente schématiquement trois domaines : un domaine de décroissance rapide dans les 10–20 premiers mètres (suivant la saison), suivi d'un domaine de relative stabilisation et enfin d'une remontée rapide, vers –60 m (Jézéquel *et al.*, 2016) : un décalage théorique d'altitude de la surface de l'ordre de 10 m, vers le haut ou vers le bas, décalerait le premier domaine d'autant, entraînant une déformation du profil de températures du mixolimnion, avec probablement des effets sur tous les phénomènes sensibles à la température. Les variations soudaines de niveau du lac peuvent avoir des conséquences catastrophiques. Ainsi par exemple, sachant que le modeste débordement de 1861 a fait perdre au lac un grand nombre d'alevins (Eusébio et Reynouard, 1925 ; Omaly, 1968), il peut être supposé qu'une vidange instantanée d'une tranche d'eau plurimétrique aurait des effets très marqués sur la vie aquatique. Mais la conséquence la plus spectaculaire et la plus dévastatrice d'un écroulement de digue naturelle est la génération d'une vague chargée de matériaux rocheux. De fait, l'existence de coulées boueuses historiques jusqu'à plusieurs kilomètres du lac Pavin a été avancée (Lavina et Del Rosso-d'Hers, 2009) et un delta de dépôts détritiques a été mis en évidence dans la vallée du Gelat, en contrebas de l'exutoire (Thouret *et al.*, 2016). Lorsque ces dépôts auront été quantifiés, et éventuellement datés, la confrontation des résultats avec la séquence que nous proposons permettra soit d'affiner cette séquence, soit de la remettre en question.

Nous avons introduit cet article dans le cadre des instabilités des maars récents. Dans le cas du Pavin, c'est beaucoup moins l'anneau de tufs qui est en cause – car il est peu développé et perché haut au-dessus du niveau de l'eau – qu'un secteur particulier de la paroi du cratère. L'ouverture de l'exutoire du lac, là où il se situe, tient à la conjonction d'une topographie favorable (faible épaisseur de l'enceinte, suspendue au-dessus d'une vallée) et d'un substratum localement et superficiellement constitué de matériaux meubles. Ces matériaux meubles reposaient sur des tufs compacts – encore en place et légèrement érodés – recouvrant eux-mêmes une coulée volcanique. Il est donc probable que la baisse de niveau de l'exutoire est maintenant stoppée pour quelques temps (Thouret *et al.*, 2016).

7 Conclusions

Si les observations anciennes sont valides et ont été correctement interprétées, il faut analyser leur signification en termes de dates et d'étapes. La première conclusion importante est que le niveau du lac s'est stabilisé à peu près à l'altitude actuelle au plus tard vers le début du XVIII^e siècle (repère chronologique donné par le manuscrit *Godivel*). Les thèses selon lesquelles des interventions humaines auraient, depuis le XVIII^e siècle, significativement modifié le niveau du lac, soit à la baisse (–4 m), soit à la hausse (+2 m), ne sont nullement étayées et se heurtent à plusieurs contradictions. La seconde conclusion est que le lac a connu une période de stabilisation vers 4,8 m au-dessus du niveau actuel avant de subir une chute de niveau relativement rapide, à une époque historique antérieure au début du XVIII^e siècle. Si nous combinons ces données avec les observations sédimentologiques de

Chapron *et al.* (2010, 2012) et de Chassiot *et al.* (2016, 2018), comme ces auteurs ont déjà tenté de le faire eux-mêmes, nous sommes conduits à remettre en cause leurs conclusions selon lesquelles le lac aurait perdu d'un seul coup 6,50, 9 ou 13 m d'altitude à un moment donné de son histoire, vers 600 (Chapron *et al.*, 2012 ; Chassiot *et al.*, 2016) : seule la valeur de 9 m est à retenir et elle ne correspond pas à une chute instantanée de niveau. C'est une baisse cumulée entre l'évènement initial, vers 600, et le moment où le lac s'est à peu près stabilisé à son altitude actuelle. L'amplitude maximale qu'a pu avoir une baisse instantanée est de l'ordre de 5 m. Cette nouvelle lecture doit conduire à reconsidérer l'ampleur des catastrophes historiques supposées.

Remerciements. L'auteur remercie vivement toutes les personnes et institutions qui l'ont aidé dans ce travail : P. Boivin, J. Chadeyron, P. Labazuy, M. Léger, J.-C. Thouret, pour une relecture attentive et la communication d'informations ; F. Faure-Perrin et P. Chatelus, pour des illustrations ; P. Cochet et la photothèque-63 (archives départementales du Puy-de-Dôme) pour la mise à disposition et la numérisation de documents anciens ; la Bibliothèque du Patrimoine de Clermont-Ferrand pour la communication de documents anciens.

Références

- Aeschbach-Hertig W, Hofer M, Schmid M, Kipfer R, Imboden DM. 2002. The physical structure and dynamics of a deep, meromictic crater lake (Lac Pavin, France). *Hydrobiol* 487: 111–136.
- Assayag N, Jézéquel D, Ader M, Viollier E, Michard G, Prévot F, *et al.* 2008. Hydrological budget, carbon sources and biogeochemical processes in lake Pavin (France): constraints from $d_{18}O$ of water and $d_{13}C$ of dissolved inorganic carbon. *Applied Geochem* 23 (10): 2800–2816.
- Berthaut C. 1898. La carte de France, 1750–1898. Étude historique. Service géographique de l'armée.
- Berthoule A. 1890. Les lacs d'Auvergne. *Revue de la Société Nationale d'Acclimatation*, Paris.
- Boivin P, Besson JC, Briot D, Deniel C, Briot D, Gourgaud A, *et al.* 2017. Volcanologie de la Chaîne des Puys. Carte et fascicule. Parc Naturel Régional de la Chaîne des Puys.
- Bonhomme C, Jézéquel D, Poulin M, Saad M, Vinçon-Leite B, Tassin B. 2016. Lake Pavin mixing: new insights from high resolution continuous measurements. In : Sime-Ngando T, Boivin P, Chapron E, Jézéquel D, Meybeck M, eds. *Lake Pavin, History, geology, biogeochemistry, and sedimentology of a deep meromictic maar lake*. Springer, pp. 177–184.
- Bouillet JB. 1875–1878. Description historique des communes du Puy-de-Dôme. Manuscrit conservé à la Bibliothèque du Patrimoine de Clermont-Ferrand. MS 977.
- Boyer Vidal A. 1913. Besse-en-Chandesse. *Revue d'Auvergne* 30 : 224–273.
- Bruyant C. 1909a. Le niveau du Pavin. *Annales de la station limnologique de Besse* 1909: 203–206.
- Bruyant C. 1909b. Mélanges. *Annales de la station limnologique de Besse* 1909: 10–15.
- Bruyant C, Eusebio A. 1904. Matériaux pour l'étude des rivières et lacs d'Auvergne. Clermont, Paris : Louis Bellet, Klincksieck.
- Camus G, Michard G, Olive P, Boivin P, Desgranges P, Jézéquel D, *et al.* 1993. Risques d'éruption gazeuse carbonique en Auvergne. *Bull Soc Géol France* 164: 767–781.

- Cas RAF, Wright JV. 1987. Volcanic successions: Modern and ancient. London: Allen & Unwyn.
- Chapron E, Albéric P, Jézéquel D, Wersteeg W, Bourdier JL, Sitbon J. 2010. Multidisciplinary characterisation of sedimentary processes in a recent maar lake (Lake Pavin, French Massif Central) and implication for natural hazards. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 10: 1–13.
- Chapron E, Ledoux G, Simonneau A, Albéric P, St-Onge G, Lajeunesse P, *et al.* 2012. New evidence of Holocene mass wasting events in recent volcanic lakes from the French Massif Central (Lakes Pavin, Montcineyre, and Chauvet) and implications for natural hazards. In: Yamada *et al.*, ed. *Submarine mass movements and their consequences. Advances in Natural and Technological Hazards Research* 31: 255–264.
- Chassiot L, Chapron E, Miras Y, Schwab M-J, Albéric P, Beauger A, *et al.* 2016. Lake Pavin paleolimnology and event stratigraphy. In: Sime-Ngando T, Boivin P, Chapron E, Jézéquel D, Meybeck M, eds. *Lake Pavin, History, geology, biogeochemistry, and sedimentology of a deep meromictic maar lake*. Springer, pp. 381–406.
- Chassiot L, Miras Y, Chapron E, Develle A-L, Arnaud F, Motelica-Heino M, *et al.* 2018. A 7000-year environmental history and soil erosion record inferred from the deep sediments of Lake Pavin (Massif Central, France). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 497: 218–233.
- Delebeque A, Ritter E, Magnin J. 1898. Carte. Atlas des lacs français. Principaux lacs du Plateau Central. Ministère des travaux publics.
- Desmolles F. 2016. History of the fish fauna of lake Pavin: A population heavily influenced by man? In: Sime-Ngando T, Boivin P, Chapron E, Jézéquel D, Meybeck M, eds. *Lake Pavin, History, geology, biogeochemistry, and sedimentology of a deep meromictic maar lake*. Springer, pp. 345–361.
- Eusébio A, Reynouard J. 1925. Le lac Pavin et le Creux de Soucy. Besse: Station limnologique de Besse.
- Foster MA, Fell R, Spannangle M. 2000. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal* 37(5): 100–1024.
- Fournier PF. 1971. Le nom du lac Pavin, essai d'étymologie. *Bull Hist Sc Auvergne* 85(631): 159–164.
- Hutchinson CE. 1957. A treatise on limnology, Vol. 1. New-York: Wiley.
- Jaloustre E. 1884. Le beffroi de Besse. *Mém Acad Sci Belles Lettres et Arts* de Clermont.
- Jézéquel D, Michard G, Viollier E, Agrinier P, Albéric P, Lopes F *et al.* 2016. Carbon cycle in a meromictic crater lake: Lake Pavin, France. In: Sime-Ngando T, Boivin P, Chapron E, Jézéquel D, Meybeck M, eds. *Lake Pavin, History, geology, biogeochemistry, and sedimentology of a deep meromictic maar lake*. Springer, pp. 185–203.
- Juvigné E, Miallier D. 2016. Distribution, tephrostratigraphy and chronostratigraphy of the widespread eruptive products of Pavin volcano. In: Sime-Ngando T, Boivin P, Chapron E, Jézéquel D, Meybeck M, eds. *Lake Pavin, History, geology, biogeochemistry, and sedimentology of a deep meromictic maar lake*. Springer, pp. 143–154.
- Labazuy P, Leclerc A. 2015. Mission de stéréophotogrammétrie Lac Pavin-plaine du Gelat (Besse 63) 20–23 avril 2015. Rapport technique LMV-OPGC – Mesures GNSS Projet TELEPATH – photogrammétrie par drone.
- Lavina P, Del Rosso-d'Hers T. 2009. Le système volcanique du groupe Montchal-Pavin : nouvelle stratigraphie des formations volcano-sédimentaires et nouvelles datations, volcanologie dynamique, conséquences pour une évaluation des risques naturels. In: *Séminaire international «Lac Pavin et autres lacs méromictiques», Besse-en-Chandesse, Résumé des com.*, 15 p.
- Lecoq H. 1835. Description pittoresque de l'Auvergne, tome II : Le Mont Dore et ses environs. Clermont-Ferrand: Librairie Auguste Veyssat.
- Lecoq H. 1861a De la pisciculture dans le département du Puy-de-Dôme. *Mémoires de l'Académie des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Clermont* III: 29–41.
- Lecoq H. 1861b Carte géologique du département du Puy-de-Dôme au 1/40 000^e, 24 feuilles. Clermont-Ferrand, Paris.
- Légrand d'Aussy PJB. 1794–1795. Voyage fait en 1787 et 1788, dans la ci-devant haute et basse Auvergne, aujourd'hui départements du Puy-de-Dôme, du Cantal et partie de celui de la Haute-Loire. Paris : Imprimerie des Sciences et Arts.
- Lorenz V. 1973. On the formation of maars. *Bull Volcanol* 37: 183–204.
- Lorenz V. 2007. Syn- and post eruptive hazards of maar-diatreme volcanoes. *J Volcanol Geotherm Res* 159: 285–312.
- Meybeck M. 2016a. Pavin, the Birthplace of french limnology (1770–2012), and its degassing controversy. In: Sime-Ngando T, Boivin P, Chapron E, Jézéquel D, Meybeck M, eds. *Lake Pavin, History, geology, biogeochemistry, and sedimentology of a deep meromictic maar lake*. Springer, pp. 3–27.
- Meybeck M. 2016b. Pavin a rich but fragmented history (200 AD–2016). In: Sime-Ngando T, Boivin P, Chapron E, Jézéquel D, Meybeck M, eds. *Lake Pavin, History, geology, biogeochemistry, and sedimentology of a deep meromictic maar lake*. Springer, pp. 29–52.
- Meybeck M. 2019. Les dégazages ignorés du Pavin, le terrifiant lac-maar d'Auvergne. *Geochronique* 150: 18–36.
- Morin F. 1888. Les lacs d'Auvergne. *Revue d'Auvergne* V: 221–234.
- Németh K, Cronin SJ. 2015. Syn- and post-eruptive erosion, gully formation, and morphological evolution of a tephra ring in a tropical climate erupted in 1913 in West Ambryn, Vanuatu. *Geomorphology* 86: 115–130.
- Ollier CD. 1967. Maars. Their characteristics, varieties and definition. *Bull Volcanol* 74: 45–73.
- Omary N. 1968. Le lac Pavin, historique et hydrobiologie. *Rev Sc Nat Auvergne* 34: 8–29.
- Provencher L, Dubois JM. 2008. Proposition d'une nomenclature géomorphologique du rivage lacustre et comparaison avec les rivages côtiers et fluviaux. La société Provancher d'Histoire Naturelle du Canada, Université de Sherbrooke, pp. 90–96.
- Renault O. 2006. Besse-en-Chandesse. Examen des risques d'éboulement au droit du chemin circulaire du lac Pavin. Rapport final. Rapport BRGM/RP-54810-FR.
- Renault O, collaboration Del Rosso Th, Lavina P, Rouzaire D. 2007. Commune de Besse et st-Anastaise (63) – Elaboration d'une carte d'aléa « mouvement de terrain » des flancs internes du Lac Pavin – Mise en place d'un réseau de suivi topographique. Rapport final. BRGM/RP-55301-FR.
- Renault O. 2009. Étude préliminaire de la stabilité des flancs internes du cratère du lac Pavin. Rapport BRGM/RP-57603-FR.
- Sime-Ngando T, Boivin P, Chapron E, Jézéquel D, Meybeck M. 2016. Lake Pavin, History, geology, biogeochemistry, and sedimentology of a deep meromictic maar lake. Springer.
- Touchart L. 2000. Les lacs : origine et morphologie. L'Harmattan.
- Thouret JC, Boivin P, Labazuy P, Leclerc A. 2016. Geology, geomorphology and slope instability of the maar lake Pavin (Auvergne, French Massif Central). In: Sime-Ngando T, Boivin P, Chapron E, Jézéquel D, Meybeck M, eds. *Lake Pavin, History, geology, biogeochemistry, and sedimentology of a deep meromictic maar lake*. Springer, pp. 155–174.
- Vimont E. 1875. Les lacs Pavin, de la Montcineyre et de la Godivelle (Auvergne). In: *Annuaire du Club Alpin français I*, pp. 337–349.
- Viollier E, Jézéquel D, Michard G, Pèpe M, Sarazin G, Albéric P. 1995. Geochemical study of a crater lake (Pavin Lake, France):

trace-element behaviour in the monimolimnion. *Chem Geol* 125: 61–72.

Wetzel RG. 1983. *Limnology*, 2nd ed. Philadelphia: Saunders College Publishing.

Annexe A Altitude actuelle du lac.

Des repères géodésiques ont été installés autour du lac pour surveiller d'éventuelles déformations de son bassin (Renault, 2007). L'un de ces repères (point 11 du réseau de surveillance BRGM) est un plot en fonte (dispositif *Vermessungs Punkt*) fixé sur un pilier maçonné implanté dans l'eau, devant la plateforme d'accès au lac (Fig. 12). La surface supérieure du pilier constitue un repère très commode pour évaluer l'altitude du lac. L'altitude donnée pour le repère 11 par le rapport BRGM est 1197,923 m (NB : le point de repère sur le plot en fonte se trouve à environ 15 mm au-dessus de la base du plot, donc de la surface du pilier).

Un relevé GPS haute résolution a été effectué en 2015, sur deux points de la plateforme d'accès au lac, pour le calage altimétrique d'une stéréophotogrammétrie du secteur, dans le cadre d'une étude de stabilité des pentes internes du lac (Labazuy et Leclerc, 2015 ; Thouret *et al.*, 2016). L'altitude de ces deux points a pu être vérifiée d'une façon indépendante à partir d'un relevé Lidar effectué en 2018 : l'accord est bon à 4 cm près pour un point et 5 cm pour l'autre (P. Labazuy et P. Boivin, com. pers.). Par nivellement à partir de ces deux points, en utilisant les données de Labazuy et Leclerc (2015), nous avons mesuré l'altitude de la surface du pilier maçonné installé dans le lac, soit $1097,54 \pm 0,01$ m (IGN69).

Compte tenu de l'objectif de cet article qui n'a pas besoin d'une grande précision, nous n'avons pas cherché à expliquer la différence (~ 38 cm) entre cette valeur (1097,54 m) et celle donnée par le rapport BRGM (1197,92 m). En utilisant la valeur de 1097,54 m, ce repère (surface du pilier N° 11) nous a permis, par exemple, de constater que l'altitude de la surface du lac a fluctué entre 1096,52 m et 1096,23 m entre le 23 juin et le 12 septembre 2019.

Annexe B Arguments complémentaires en défaveur de la thèse d'une baisse artificielle du niveau du lac à la fin du XVIII^e siècle (Meybeck, 2016a ; Chassiot *et al.*, 2016) ou à la fin du XIX^e siècle (Meybeck, 2016a, 2016b).

S'il y avait eu une baisse de niveau du lac de 4 m à la fin du XVIII^e siècle, la beine, qui affleurait vers 1834 (Lecoq, 1835), aurait été située à plus de 4 m de profondeur avant la baisse. Godivel, n'aurait pas pu la remarquer au point de juger nécessaire de lui consacrer quelques lignes. Dans l'hypothèse d'une baisse de niveau intervenue à la fin du XIX^e siècle, ni Godivel, ni Legrand d'Aussy, ni Lecoq n'auraient pu la remarquer.

D'autres arguments plaident en défaveur de la thèse d'une baisse du niveau du lac à la fin du XIX^e siècle :

- 1 La topographie de l'entrée du lac telle que décrite par le plan de 1867 (AD63 S 104 h) est parfaitement compatible avec la topographie actuelle, altitude relative du lac comprise (Figs. 8 et 9). On peut notamment s'appuyer, pour



Fig. 12. Repère géodésique au bord du lac (BRGM, Renault, 2007). L'altitude du repère (plot en fonte) donnée par Renault (2007) est 1197,923 m. L'altitude de la surface de la borne, mesurée par nivellement à partir des données de Labazuy et Leclerc (2015) est $1097,54 \pm 0,01$ m (IGN69).

Fig. 12. *Geodesic mark, at the lake shore (BRGM, Renault, 2007). Elevation of the mark (cast-iron block) quoted by Renault (2007) is 1197.923 m a.s.l. Elevation of the surface of the stone, evaluated on the basis of the data from Labazuy et Leclerc (2015) is 1097.54 ± 0.01 m a.s.l. (IGN69).*

la comparaison, sur les éléments qui ont peu été modifiés, comme la partie occidentale du talus ouest ;

- 2 La maisonnette en pierre construite par Rico en 1859 est située, à la fin du XIX^e siècle (Fig. 3) et au début du XX^e siècle, à une altitude d'environ 1,5 m à 1,8 m au-dessus de celle du lac, cette valeur étant estimée d'après les photographies anciennes (*cf.* phototheque@puy-de-dome.fr) et d'après le plan d'aménagement de 1951 (AD63, 1806 W 13). Or, si la baisse de niveau de 4 m avait réellement eu lieu à la fin du XIX^e siècle, cela signifierait que la maisonnette avait été construite dans l'eau ;
- 3 L'altitude du lac est donnée par tous les auteurs, entre 1861 et 1909 à 1197 m (*cf.* Sect. 2.2). Or, même si aucun d'entre eux ne l'a vérifiée personnellement, tous auraient pu prendre en compte, dans leur publication, une variation de niveau de 4 m intervenue durant cette période s'ils en avaient eu connaissance. Cette variation se retrouverait aussi dans la profondeur du lac, mesurée indépendamment de son altitude et d'une façon plus précise. Or on ne l'observe pas (*cf.* Sect. 2.2).

Annexe C Arguments complémentaires en défaveur de la thèse d'une hausse artificielle du lac en 1855 (Chapron *et al.*, 2012).

On peut reprendre à ce propos l'argument de la beine qui affleurait vers 1835 (Lecoq, 1835) et qui est située à peine plus profondément aujourd'hui. Si le lac avait été rehaussé en 1855, il faudrait qu'il ait à nouveau baissé depuis, de la même amplitude, pour que la beine soit actuellement à peu près au même niveau qu'en 1835. Or il n'y a pas eu de baisse significative de niveau dans la seconde moitié du XIX^e siècle

(Annexe B). Le second argument est géologique et repose sur trois témoignages distincts : celui de l'ingénieur ordinaire des travaux publics qui a fait l'étude préparatoire des projets de 1867 (AD63, S 0104 – 6), ceux de de Vimont (1875) et de Berthoule (1890). Pour l'ingénieur, les eaux du lac s'échappent à travers un conglomérat trachytique. Pour Vimont et Berthoule elles s'échappent à travers un tuf

ponceux qu'elles érodent lentement. Or, si le lac avait été exhaussé artificiellement en 1855, ses eaux s'échapperaient par la suite (en 1867, en 1875 et en 1890) à travers un barrage maçonné et non le tuf naturel en place. En 1913, Boyer-Vidal écrit encore que le « déversoir est formé par une échancrure assez étroite, creusée par les eaux dans un tuf ponceux blanchâtre ».

Citation de l'article : Miallier D. 2020. Variations récentes de niveau du lac Pavin : essai de mise en cohérence des différentes sources d'information, *BSGF - Earth Sciences Bulletin* 191: 4.