

Le lac Pavin et ses voisins, histoire d'un patrimoine européen unique

The lake Pavin and its neighbours, history of an unique european heritage

Michel MEYBECK, Université Pierre-et-Marie-Curie, CNRS, U.M.R. Sisyphe, 4 place Jussieu, 75252 PARIS Cedex 05 - michel.meybeck@upmc.fr

Résumé

Parmi les 100 000 lacs européens seuls quelques dizaines sont d'origine volcanique, situés en Allemagne (Eifel), en Italie (Latium et Mont Vulture), en Islande et en Auvergne-Velay. Parmi ceux-ci les lacs du Plateau d'Auvergne, situés autour du Pavin, se distinguent par l'absence quasi-totale de pressions humaines, à l'exception de la contamination atmosphérique générale. Certains sont exceptionnels, voire uniques : par leur dynamique et leur chimie (Pavin), leur bilan hydrique et leur chimie (Godivelle d'En-Haut), leur morphologie et leur régulation thermique (Creux de Soucy), leur enregistrement du climat Holocène (Chambédaze). Dès le XIXe siècle, ces lacs ont attiré l'attention de grands naturalistes, dont H. Lecoq, E.A. Martel et A. Delebecque, le fondateur de la limnologie en France, qui en fit un inventaire scientifique complet en 1892.

L'étude du Pavin s'est amplifiée à deux reprises. En 1951, Olivier décrit des anomalies négatives d'oxygène dissous dans les couches profondes du lac et, en 1962, Pelletier signale une couche sans oxygène permanente à partir de 70 m, le monimolimnion. Cet état, dit méromictique, n'est partagé que par quelques lacs en Europe. En 1986, le dégazage catastrophique du lac-maar Nyos, également méromictique, au Cameroun, établit, pour la première fois dans la communauté scientifique, le phénomène d'*éruption limnique*. Ce nouveau risque relance au Pavin l'étude géochimique des eaux profondes : on y décrit de nombreuses couches stratifiées, chacune de nature chimique et microbiologique unique. Le Pavin est devenu un observatoire naturel des processus d'oxydo-réduction en milieu aquatique, de renommée mondiale.

Le débat sur le risque au Pavin est rouvert ici par l'hypothèse d'une activité passée de dégazage, sans doute étalée sur plusieurs siècles, basée sur : (i) les découvertes récentes de coulées de boues dans la Couze Pavin, ayant pu être déclenchées par des surverses du lac, et de glissements des sédiments sur les pentes du lac, (ii) la ré-analyse ici des descriptions de l'état du Pavin de 1566 à 1831, faites par des témoins locaux et retranscrites depuis le XVIe siècle par les géographes les plus fameux comme Sébastien Münster (1489-1552), appelée ici « récit du Tourbillon et de la tempête », (iii) la similitude étroite entre cette dernière et l'observation des éruptions limniques de Nyos et de celles des lacs de Monticchio au Mont Vulture (1800-1820), reprises récemment par les volcanologues italiens. Enfin certains des premiers miracles (1557 à 1609) de Vassivière, située à 3 km du Pavin, sont mis en relation avec cette activité de dégazage. Quant à la légende de la Ville engloutie, qui prévaut aujourd'hui, elle serait plutôt liée aux objets cylindriques (meules ?) en pierre taillée trouvés sur le pourtour et dans le Pavin et retombés dans l'oubli.

Les analyses préliminaires multicritères du Pavin et son voisinage (rareté limnologique, biodiversité, pression humaine, histoire des sciences, valeurs culturelle et économique des lacs ; valeur du paysage) mettent en évidence la valeur exceptionnelle de cet ensemble, déjà reconnue par l'Unesco en 1969, au titre du patrimoine naturel, dont la conservation concertée est indispensable.

Abstract

Among the 100 000 lakes in Europe few dozens only are of volcanic origins, located in Germany (Eifel maars), Italy (Latium and Monticchio Lakes), in Iceland and in Auvergne-Velay. The Auvergne Plateau Lakes, located around Lake Pavin, are particular due to their total lack of Human pressure, apart from the atmospheric contamination background. Some of them are exceptional, if not

unique, for their water dynamics and chemistry (Pavin), their water balance and chemistry (Godivelle-d'En-Haut), their morphology and thermal regulation (Creux de Soucy), or for their Holocene sedimentary archives (Chambédaze). These lakes have attracted the attention of famous XIXth naturalists as H. Lecoq, E. A. Martel and A. Delebecque, the founder of French limnology, who in 1892 made their complete scientific inventory.

The Pavin Lake research has been amplified at two occasions. In 1951, Olivier describes negative dissolved oxygen anomalies in deep waters and, in 1962, Pelletier mentions the setting of a permanent anoxic layer from 70 m to the bottom (92 m), the monimolimnion. Such meromictic state is shared by very few lakes in Europe. In 1986 the catastrophic degassing of Nyos, another meromictic maar-lake situated in Cameroon, sets the concept of *limnic eruption* for the first time in the scientific community. The study of Pavin deep waters geochemistry is accelerated by this new risk : numerous stratified layers of unique chemical and/or microbiological composition are described. Pavin Lake is now a world-class natural observatory for redox processes in aquatic systems.

The degassing risk debate is reopened here through the hypothesis of past limnic eruptions, probably lasting hundred of years, based on: (i) the discovery of past mud flows, possibly triggered by lake overflows, and of sediment sliding from the lake slope, (ii) the re-analysis of Pavin descriptions as related by locals from 1566 to 1831, and transcribed by naturalists since the XVIth century, termed here the "legend of storm and tourbillion", (ii) the striking similarity between this legend and the description of limnic eruptions as related by volcanologists for Nyos Lake and by naturalists for the Monticchio Lakes in 1800-1820, recently re-considered by Italian volcanologists. Finally some of the 1557 to 1609 miracles of Vassivière, a famous local pilgrimage 3 km from Pavin Lake, could be connected to a former degassing activity.

A preliminary multi-criteria analysis of Pavin Lake and its neighbours, based on limnological peculiarities, biodiversity, pristine state, sciences history, cultural and economic values, and landscape value sets up the exceptional value, at the European level, already recognized by Unesco in 1969, of this ensemble for its natural patrimony. Its concerted preservation should now be ensured.

1. Introduction

En 1795, l'Abbé Antoine Delarbre docteur en médecine, premier directeur du jardin botanique de Clermont-Ferrand, commence sa Description du lac Pavin ainsi : « *Pavin est un des plus beaux lacs de l'Auvergne* ». Depuis cette époque, les lacs d'Auvergne attirent l'attention des scientifiques et fascinent les visiteurs. En 1770, le lac Pavin et le Creux de Soucy, son compagnon tout aussi mystérieux, sont sondés avec la plus grande précision par Chevalier, un ingénieur royal des Ponts et Chaussées. On peut y voir le premier travail scientifique réalisé sur un lac français. Un siècle plus tard, Delebecque, l'initiateur en France de la limnologie, la science des lacs, vient de Thonon-les-Bains jusqu'en Auvergne pour étudier le Pavin, le Chauvet, le Montcineyre, le Chambédaze, le Bourdouze, les Esclauzes, la Landie et les deux lacs de la Godivelle. Depuis, cet ensemble de lacs passionne les chercheurs par sa diversité et son caractère unique en France. A la suite du grand naturaliste clermontois du XIXe siècle, Henri Lecoq, et des pionniers de la Station biologique de Besse-en-Chandesse (Berthoule, Bruyant, Eusébio), de nombreux scientifiques

auvergnats travaillent sur le Pavin et les lacs de la région. Ils sont rejoints à partir des années 1940 par d'autres chercheurs français puis, trente ans plus tard, par des équipes internationales. Jusqu'en 1980, les recherches entreprises concernent surtout l'hydrobiologie, en particulier l'étude du phytoplancton et du zooplancton (travaux d'Olivier, Omaly, Devaux). Aujourd'hui, elles sont très diversifiées : chimie des eaux, microbiologie, paléolimnologie, volcanologie, sédimentologie, géochimie.

Les lacs voisins font aussi l'objet de recherches approfondies en paléolimnologie (Chambédaze), en limnologie physique (Godivelle d'En-Haut). Un siècle après les inventaires physicochimiques et hydrobiologiques de Delebecque (1898) et de Berthoule (1890), très complets pour l'époque, un nouvel inventaire de biodiversité sera mené dans le cadre du programme Natura 2000.

Depuis 1852, date du premier article de Lecoq, l'intérêt pour le Pavin s'est développé à la suite de deux événements importants : d'abord la découverte dans les années 1950 d'une couche anoxique permanente et riche en gaz dissous, dans les eaux profondes (phénomène de

méromicticité), par Luc Olivier et Jean Pelletier puis, en 1988, la crainte d'un risque de dégazage de CO₂ dissous de cette dernière, à la suite de l'éruption gazeuse, ou limnique, du lac de cratère Nyos, au Cameroun, qui fit 1 700 morts en 1986.

Depuis une vingtaine d'années, le Pavin fait ainsi l'objet de recherches intensives menées par des dizaines de chercheurs, et de l'attention des pouvoirs publics concernant le risque d'une éruption limnique. Ces deux aspects ont fait l'objet d'un colloque international à Besse en mai 2009 portant sur le Pavin et autres lacs méromictiques, organisé par Didier Jézéquel (Université de Paris 7, Paris-Diderot et Institut de Physique du Globe de Paris), Christian Amblard et Gérard Fonty (Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand).

Malgré leur caractère spécifique, voire unique, tant scientifique qu'historique et culturel - ces lacs font l'objet de nombreuses légendes - le Pavin, le Creux de Soucy et leurs voisins ne sont pas encore reconnus pour leur valeur patrimoniale au niveau national ou européen. L'objectif premier de cette note était d'attirer l'attention sur le caractère spécifique de ces lacs et de leur valeur patrimoniale, d'abord par la comparaison avec les autres lacs volcaniques européens, par un rappel historique des travaux sur le Pavin sur deux siècles, de 1770 à 1985, enfin par une évocation des travaux plus récents.

La reprise des documents du XVIII^e et XIX^e siècles concernant le Pavin nous amène aussi à poser la question de la permanence de la méromicticité et des risques limniques. Cette ré-analyse s'appuie aussi sur (i) la description de l'éruption limnique du lac Nyos survenue en 1986, et des phénomènes extraordinaires observés de 1800 à 1820 aux lacs de cratères Monticchio en Italie, (ii) la mise en évidence par les chercheurs de glissements de sédiments subaquatiques et d'une coulée de boue dans la vallée de la Couze Pavin au Moyen Âge. Ceci nous conduit à une relecture totale des légendes du Pavin et même de certains des miracles de Vassivière.

2. Les lacs volcaniques d'Auvergne : un ensemble unique en Europe

Les lacs du plateau d'Auvergne, ainsi dénommés par Ajalbert (1896), correspondent à une quinzaine de lacs essentiellement d'origine volcanique situés entre les villages d'Aydat au

Nord et de la Godivelle au Sud, illustrés ici par la carte de Berthoule de 1890 (figure 1). Cette dénomination nous semble plus adéquate que celle de lacs Mont-Doriens, souvent utilisée, car cet ensemble très récent d'un âge de 7 000 à 50 000 ans environ, ne se rattache pas au volcanisme du Mont-Dore. Ces lacs ont une origine très diverse (PRVA, 2004) : (i) des lacs remplissant des maars, c'est-à-dire des cratères d'explosion phréatomagmatique, comme ceux de Servières, Pavin, Chauvet, La Fage, Godivelle d'En-Haut, (ii) des lacs de barrage par une coulée de lave (Aydat), un volcan (Montcineyre) ou un volcan puis un glissement de terrain (Chambon), (iii) des lacs, en général très peu profonds, situés sur des coulées anciennes érodées par les glaciations comme Landie, Esclauzes, Bourdouze, Bordes, Godivelle d'En-Bas, enfin (iv) le Creux de Soucy et son petit lac souterrain dans la coulée du Montchal. Le Pavin et le Creux de Soucy sont plus particulièrement détaillés plus loin.

Les lacs d'Aydat et du Chambon, d'une altitude inférieure aux autres (837 m et 875 m respectivement) et déjà eutrophes sont nettement à part et ne sont ici qu'évoqués, de même que les lacs de Servières (1202 m) et de Guéry (1246 m) qui sont situés au nord du massif du Mont Dore, et de Tazenat, dans la chaîne des Puys.

En France, on ne dénombre que quelques centaines de lacs naturels, environ 450, en comptant les petits de moins de 10 ha. Situés plutôt en montagne (Vosges, Alpes, Pyrénées et Corse), ils sont pour beaucoup également d'origine glaciaire (Delebecq, 1898).

Chaque année, des lacs artificiels de barrage ou des retenues collinaires sont également créés. Ils sont considérés à part par les limnologues car très récents – quelques dizaines d'années au plus – et extrêmement régulés, selon des règles de gestion variées. Leur fonctionnement hydrologique, thermique et écologique sont donc très différents de ceux des lacs naturels. Certains d'entre eux sont utilisés à des fins hydro-électriques et ont ainsi perdu une partie de leur caractère d'origine. C'est le cas de deux lacs exceptionnels, le lac de cratère d'Issarlès en Ardèche (109 m de profondeur initiale) et le lac de la Girotte en Savoie. Le premier fut transformé en réservoir pompé/turbiné dans les années 1950. Le second était connu jusqu'alors comme le seul lac méromictique français, c'est-à-dire qu'il ne se mélangeait jamais jusqu'au fond. Il

fut siphonné entre 1923 et 1931 puis noyé par un barrage en 1949 (Dussart, 1952).

En Europe, les lacs liés à l'activité volcanique représentent moins d'un lac sur mille : la très grande majorité des lacs (plusieurs centaines de mille) est liée à l'activité des glaciers quaternaires dans le Nord de l'Europe (Pourriot et Meybeck, 1995). Les deux autres importantes provinces de lacs volcaniques se trouvent en Eifel (Allemagne) et dans le Latium (Italie Centrale) (figure 2) (Negendank et Zolitschka, 1993). Ces lacs sont situés à des altitudes beaucoup plus faibles, autour de 500 m, et sont le plus souvent très affectés par l'anthropisation, au contraire des lacs du plateau d'Auvergne discutés ici.

2.1. Lacs de l'Eifel (Allemagne)

Les neuf lacs de l'Eifel, entre Bonn et Coblenze, sont tous des lacs-maars témoins d'un volcanisme d'âge varié. Si trois lacs sont d'âge tertiaire, la majorité a un âge compris entre 10 000 et 70 000 ans (Scharf et Björk, 1992 ; Büchel, 1993). Leur profondeur varie de moins de 20 m à 70 m (Pulvermaar). Le lac le plus connu des géologues est le Laachersee dont l'énorme explosion, il y a 12 900 ans, a expédié des cendres volcaniques à des centaines de kilomètres. Elles sont aujourd'hui repérables dans les sédiments déposés au fond des lacs de l'Europe de l'Ouest (Bogaard et Schmincke, 1995). Les bassins-versants des lacs de l'Eifel sont situés à des altitudes peu élevées (259 m pour le Laachersee) et les rapports bassins-versants/surface lacustre varient entre 1,24 fois (Weinfelder) et 34 fois (Holzmaar). Les bassins-versants peuvent comprendre des surfaces cultivées importantes et même des villages et des bourgs. Certains de ces lacs, soumis à une anthropisation moyenne (Büchel, 1992), sont donc déjà eutrophes (Holzmaar, Meerfelder, Schalkenmehrener), d'autres sont restés oligotrophes (Pulvermaar, Weinfelder, Gemünder). De nombreux autres maars sont déjà entièrement comblés par les sédiments.

L'Ulmenermaar (37 m de profondeur) est méromictique, comme le Pavin actuellement, depuis au moins sa première étude faite en 1912 par Thienemann, le fondateur de la limnologie allemande. Dans ces lac, le mélange vertical des eaux est incomplet et l'oxygène dissous y est donc absent de la couche profonde. Le

Gemündenermaar est, lui, devenu méromictique dans les années 1950, mais ses eaux profondes ont été siphonnées en 1982 (Scharf et Björk, 1992).

2.2. Lacs du Latium (Italie Centrale) et du Mont Vulture (Italie du Sud)

Dans le Latium se rencontre une demi-douzaine de lacs d'origine volcanique (Margaritora, 1992 ; Niessen *et al*, 1993 ; Chondrogianni *et al*, 1996) :

- (i) des lacs-maars âgés de 38 000 à 40 000 ans dans la région de Castel Gandolfo : le lac Albano, très profond (175 m, 6 km²) et le lac de Nemi (33 m, 1,8 km²). Tous deux sont privés d'exutoire naturel et ont fait l'objet de drains souterrains déjà creusés par les Romains en 390 av. J.-C.. Il faut aussi citer le lac Averno, « sans oiseaux », près de Naples (60 m, altitude du plan d'eau 3 m), sans doute envahi en profondeur par l'eau de mer,
- (ii) des lacs beaucoup plus grands situés dans des calderas d'effondrement comme le Bolsena (151 m, 13,5 km², âge de la caldera 150 000 ans), le Bracciano (165 m, 56,8 km², 100 000 ans) et le Vico (48,5m, 12,9 km², 95 000 ans). Leur diamètre est énorme et peut excéder 10 km (Bolsena). Leur profondeur est relativement modeste vu leur taille (154 m pour le Bolsena, 165 m pour le Bracciano). Leurs bassins-versants situés entre 200 et 800 m d'altitude excèdent aussi largement les murs incisés de leur caldera.

Les lacs du Latium sont encore plus anthropisés et urbanisés que ceux de l'Eifel. Le lac Nemi, qui sert de site de villégiature depuis l'antiquité, est aujourd'hui eutrophe.

Le lac Albano est méromictique et donc anoxique à partir de 50 m, avec une température relativement élevée, de 9°C au fond (Margaritora, 1992). Il contient du CO₂ d'origine profonde (Boni *et al* 1995, cité par Belis et Ariztegui, 2004). Son niveau a été considérablement abaissé ces dernières années par des prélèvements d'eau pour irriguer les jardins pontificaux. Les lacs Bolsena et Bracciano, sources d'eau potable pour la Rome antique, ont fait l'objet de mesures de protection dès 1987 (interdiction des pesticides et fertilisants).

Enfin il faut aussi signaler, en Italie du Sud, les deux lacs de cratère de Monticchio sur lesquels nous reviendrons. Ils sont situés dans le Mont Vulture à une altitude de 650 m et sont pour l'un eutrophe/polytrophe (Lago Grande), pour l'autre oligo/mésotrophe (Lago Piccolo) (Caracausi *et al.*, 2009) (Figure 2). Ces deux lacs sont très creux et sont décrits comme méromictiques depuis des dizaines d'années.

Les autres régions volcaniques d'Europe (Sicile, Mer Egée) n'ont pas développé de telles provinces lacustres. En Islande, plusieurs lacs de cratères sont répertoriés, dont l'Oskjuvatn (11 km², 21 m de profondeur), formé en 1875 mais peu connu. Le principal lac est le lac Myvatn (37 km², 4,5 m) situé sur une coulée et surtout alimenté par des eaux souterraines. La richesse en silice de ses eaux et l'absence d'apports terrigènes par des affluents y génèrent la formation actuelle de sédiments très rares, presque exclusivement constitués de débris d'algues siliceuses, les diatomées. Ce produit microporeux - de l'ordre de dix microns - et très recherché pour la fabrication de matériaux réfractaires, de filtres industriels, d'abrasifs dans les produits ménagers, y a été exploité. Les diatomites fossiles ont été décrites pour la première fois en Auvergne au XIX^e sous le nom de randannites. Elles correspondent à d'anciens dépôts lacustres dans un ancien lac de cratère. Elles ont fait l'objet en Auvergne d'une exploitation intensive - comme à Riom-ès-Montagne (Cantal) - représentant jusqu'à 14 % de la production mondiale, et sont encore exploitées en Ardèche et dans le Cantal (Murat).

2.3. Les lacs du plateau d'Auvergne

Malgré leurs origines communes avec ceux du Latium et de l'Eifel, ces lacs en sont très différents et certains d'entre eux sont exceptionnels (tableau 1) :

- (i) **Altitude** : ils sont tous situés à une altitude comprise entre 1 050 et 1 260 m (Figure 1),
- (ii) **Position** : ils sont positionnés sur la crête séparant les bassins de l'Allier de la Dordogne, la ligne de partage des eaux des hydrologues,
- (iii) **Thermique** : en raison de leur altitude, ils gèlent tous pendant plusieurs mois en hiver et sont donc

soumis à deux périodes de circulation verticale des eaux lorsqu'il y a homothermie à 4°C (maximum de densité de l'eau pure) ; ils sont donc dimictiques (Dussard, 1966 ; Pourriot et Meybeck, 1995 ; Touchard, 2002). Les propriétés particulières du Pavin et du Creux de Soucy seront détaillées plus loin.

- (iv) **Bassins-versants** : leur influence relative sur les lacs est minimale et, à l'exception de la Landie, leur bassin-versant est extrêmement réduit, moins d'un km². Le rapport bassin-versant/lac est généralement inférieur à 3, une valeur observée dans moins de 5 % des lacs d'Europe (Pourriot et Meybeck, 1995).

- (v) **Pressions anthropiques** : la densité de la population humaine sur ces bassins est quasi nulle (<1 habitant/km²). Sauf exception, l'élevage bovin y est extensif, quelques vaches à l'hectare en été. Ces lacs reçoivent donc jusqu'ici très peu d'apports polluants, tels que pesticides, nutriments, métaux lourds, par les eaux de ruissellement et les ruisseaux, ni par des habitations,

- (vi) **Apports atmosphériques** : les sources locales et régionales de pollution atmosphérique à cette altitude y sont également très réduites. Il n'y a pas à proximité d'émissions de polluants industriels ou domestiques, la densité générale de la population de la région du Mont-Dore-Cézallier étant inférieure à 10 habitants au km² pour une surface de plus de 1 000 km². Les pluies sont très peu polluées (Negrel et Roy, 1998). Le caractère naturel de l'eau des lacs est, par exemple, vérifié par des concentrations en sulfates et en chlorures, ici tous deux d'origine atmosphérique et sensibles aux contaminations industrielles ou urbaines. Elles sont très faibles par rapport aux eaux de surface françaises et même européennes (Meybeck *et al.*, 1975 ; Meybeck, 1986). Cependant nous verrons que des traces de

contaminations atmosphériques sont décelables dans les sédiments des « lacs-pluviomètres ».

2.3.1. Lacs-maars et lacs-pluviomètres d'Auvergne

Environ une trentaine de maars ont été identifiés dans la chaîne des Puys et dans le Cézallier, mais la plupart sont déjà comblés (Juvigné *et al*, 1993). Les *lacs-maars* non comblés sont tous situés sur le plateau d'Auvergne (figure 1), à l'exception du Gour de Tazenat (66 m), situé au Nord de la chaîne des Puys : Servières (24 m de profondeur maximale), Pavin (92 m), Chauvet (64 m), Fage (2 m) et Godivelle d'En-Haut (44 m). La plupart de ces lacs présentent des particularités limnologiques et paléolimnologiques rares au niveau européen ainsi qu'une grande diversité biologique, généralement liée aux tourbières présentes dans les lacs moins profonds. Ces particularités sont résumées dans le tableau 1 pour chaque lac en codant leur rareté relative au niveau français ou européen. Le Velay et le Devez comprennent aussi de nombreux maars dont plusieurs lacs-maars : le Bouchet, Issarlès, Saint-Front.

Les *lacs-pluviomètres* (Pavin, Godivelle) sont directement alimentés par la pluie et la neige et ont un bassin-versant annulaire très réduit. Le rapport bassin-versant topographique/superficie lacustre est inférieur à l'unité (0,5 au Pavin et 0,9 à la Godivelle d'En-Haut). Cette propriété se rencontre pour moins d'un lac sur dix mille : la plupart des lacs ont un rapport de 5 à 20 allant jusqu'à 50 pour les lacs de barrage naturels. Ces lacs ont donc une indépendance remarquable à l'égard de leur bassin-versant et une plus grande sensibilité aux apports atmosphériques. Ce type de lac ne reçoit pratiquement pas de sédiments par des rivières, ni même par des ruisseaux, mais par l'érosion des berges (Godivelle d'En-Haut) et/ou par des apports autochtones (Pavin), une particularité très rare en milieu lacustre. Le lac de Servières est un autre exemple de lacs-pluviomètres, le lac Chauvet s'en rapproche.

Les lacs-pluviomètres sont étudiés pour leurs archives sédimentaires, témoins des apports atmosphériques passés comme au Pavin (Elbaz-Poulichet, 1988, Martin, 1985) ou pour leur bilan hydrique exceptionnel comme la Godivelle d'En-Haut. Ce dernier n'a actuellement pas de sortie aérienne des eaux : les eaux s'infiltrant et s'évaporent. Du fait de ce type d'alimentation par

les pluies, la Godivelle d'En-Haut est très peu minéralisée avec 11,3 mg/l de sels dissous, à égalité avec le lac de Servières (12,6 mg/l) (Meybeck *et al*, 1975). Ils sont sans doute parmi les lacs les moins minéralisés d'Europe : les produits de l'altération des roches - cations et silice dissoute - représentent moins de 20 % des sels dissous et sont 10 à 100 fois moins élevés que dans la plupart des lacs.

Le bilan hydrique extrême de la Godivelle d'En-Haut lui valut d'être équipé d'instruments de 1960 à 1975 par EDF (Jacquet et Mandelbrot, 1966), le laboratoire d'Océanographie physique du Muséum national d'histoire naturelle, les universités de Montpellier (Mazaud, 1969) et de Clermont (Albignat, 1978). Ces études pionnières en France de la dissipation de l'énergie thermique et l'évaporation, à l'échelle journalière, nécessitèrent des nouveaux capteurs thermiques immergés, précis à 0,01°C et reliés à une centrale d'acquisition de données, mis au point à la Godivelle avant de les utiliser dans les océans (Gonella et Martin, 1966). Ce n'est que trente ans après que des capteurs semblables furent installés sur le Pavin.

2.3.2. Lacs-tourbières : paléolimnologie et biodiversité

Les lacs-tourbières sont très peu profonds, quelques mètres seulement, et sont en voie de comblement par des tourbières actives. Ils sont liés à la dernière déglaciation des petits glaciers locaux et/ou ils occupent des dépressions sur des coulées anciennes (Chambédaze, Godivelle d'En-Bas, Esclauzes, Bourdouze, Bordes, voir figure 1). Leur intérêt scientifique concerne les paléolimnologues et les spécialistes de la biodiversité.

Le lac-tourbière de Chambédaze, dont la séquence d'archives sédimentaires porte sur les derniers 10 000 ans, est connu des spécialistes mondiaux des climats continentaux anciens. Il est répertorié dans la banque Global Pollen Data Base CHAMS de Boulder (Colorado) (Guenet et Reille, 1988).

A Chambédaze, la paléo-limnologie, pratiquée sur des carottes de sédiments anciens, permet d'établir une chronologie très précise de l'évolution du climat, de la végétation, du magnétisme terrestre, de l'activité volcanique

locale (Montchal, Montcineyre) ou lointaine (Laachersee), enfin, de l'occupation des sols de la région depuis le Néolithique. Ces chronologies sont particulièrement bien archivées dans la plupart des lacs-tourbières de la région, notamment celles des retombées de cendres volcaniques (téphrochronologie) (Juvigné, 1992 ; Juvigné *et al*, 1993). Toutefois, les chercheurs n'y disposent pas d'archives du climat aussi longues que celles du lac-maar du Bouchet (Devez, Haute-Loire), situé à 1 207 m, qui porte sur 250 000 ans (Truze et Kelts, 1993), cette région n'ayant pas été recouverte par les glaces pendant les dernières glaciations, au contraire du Mont Dore.

Les écologues qui pratiquent les inventaires complets des espèces végétales et animales ont également mis en évidence la richesse spécifique exceptionnelle des lacs-tourbières de la région et de leurs zones humides : Bourdouze, aussi nommé lac d'Anglard, Esclauzes, les Bordes, Chambédaze (Brunhes *et al*, 1982), Godivelle d'En-Bas. Ils y ont identifié de nombreuses espèces rares héritées de la dernière période glaciaire tant pour la flore euro-sibérienne et arctique (ligulaire de Sibérie) que pour la faune d'insectes (damier de la succise et azuré du serpolet, pour les lépidoptères, l'agrimon à lunules pour les odonates), de rotifères ou d'oiseaux (grèbe castagneux, râle d'eau, bruand des roseaux). A la Godivelle d'En-Bas, selon Pascal Dupont (1999) qui en a réalisé l'inventaire entomologique, on trouve 78 % des espèces d'insectes présents dans les eaux acides/tourbeuses du Massif central, ceci malgré un assec du lac de 1960 à 1968 pour l'exploitation de la diatomite. Cette biodiversité naturelle remarquable des lacs-tourbières est maintenant largement reconnue aux niveaux national et européen par leur inclusion dans les listes Natura 2000 (PNRVA, 2004).

Plusieurs lacs ont livré des objets archéologiques, comme la Landie où des vases gallo-romains et une aiguille en bois de renne ont été retirés vers 1850 et vers 1950 lorsqu'une chaussée entrant dans le lac a été remarquée en plongée (Dr. J Bernard, Egliseneuve d'Entraigues, com.pers.). Au Pavin, d'autres objets lithiques ont été retirés. Aucune fouille récente n'a été menée sur ces sites qui attestent une implantation humaine ancienne au bord de ces lacs, quoique problématique au Pavin (voir plus loin).

2.3.3. Introduction d'espèces dans les lacs de cratères

L'ichtyofaune, très remarquable à l'époque actuelle, des lacs-maars Pavin, Chauvet, Godivelle d'En-Haut et Servières, ainsi que celle de la Landie, était originellement très pauvre. Elle a été complètement modifiée par l'introduction d'espèces de salmonidés vers la fin du XIX^e siècle. Trois espèces de peu d'intérêt économique ou touristique dominaient auparavant : ablettes, perches et vairons pour le Chauvet, ablettes et goujons pour le Pavin.

A. Berthoule, maire de Besse et Secrétaire général de la Société Nationale d'Acclimatation de France, décrit en détail dans son ouvrage remarquable sur les lacs d'Auvergne (1890) la période pionnière de l'empoisonnement effectué par Rico soutenu par Lecoq, qui débute en 1859 au Pavin. Cette période sera également relatée par Charles Bruyant (Professeur à l'Ecole de médecine et Sous-directeur de la Station Biologique de Besse) et par Jean-Baptiste Eusébio, Secrétaire général de la Société de pêche et de pisciculture du Puy-de-Dôme (1904). La pisciculture créée par Rico à Besse disposait d'un laboratoire d'éclosion pourvu d'augettes Coste pour incuber 100 000 œufs et plus. Sur le Pavin, dont aucune truite n'avait jamais franchi le seuil en 1859, on apporte de 1860 à 1870, 120 000 truitelles, tout d'abord à partir du laboratoire de Clermont, et 20 000 saumons (*S. salar*), 800 ombles-chevaliers (*Salvelinus umbla*), 18 saumons du Danube (*S. hucho*), quelques milliers de corégones (*C. fera*), des carpes, des gardons et des écrevisses, espèces jusque là absentes du Pavin.

Pendant ces dix premières années, Rico pêchera au filet 3 000 truites pour un poids de 1 570 kg. Puis les prises déclinèrent, mais jusqu'en 1887 au moins, des saumons d'une livre étaient pris (poids maximum de 1,25 kg). Quant au saumon Heuch (*S. hucho*), il en prend quelques sujets âgés, dont un de 14,5 kg en 1874 ! L'écrevisse (*Astacus fluviatilis*) s'est également très bien développée au Pavin. Berthoule regrette par ailleurs la présence de « dangereux forbans » ichtyophages, faisant concurrence aux pêcheurs, comme la loutre (*Lutra lutra*), le balbuzard fluviatile (*Pandion haliaetus*), devenu très rare en France, l'alcyon (*Alcedo ispido* Lin.) et le cinglé (*Sturnus cinglus* Lin.).

Au Chauvet, l'ensemencement fut réalisé par Berthoule lui-même à partir de 1870. Ce fut un succès à partir de 1872 où il fut mis 7 000 alevins de *Salmo lacustris*, 9 000 de *Salvelinus umbla*, 35 000 de *S. fario* et 40 000 *Coregonus*. Des introductions similaires furent aussi pratiquées plus tard à la Godivelle d'En-Haut et au lac de Servières. Sur la Landie, les introductions de salmonidés canadiens (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, variétés Kamloops et steelhead) pour la pêche sportive ont fait la réputation internationale de ce lac, plus d'un siècle plus tard. Les truites et les ombles-chevaliers des lacs-maars, si prisés aujourd'hui, sont donc totalement introduits.

2.3.4. Niveaux de nutriments et eutrophisation

Le niveau des nutriments, silice, azote et phosphore, est assez variable et lié au mode d'alimentation des lacs du plateau d'Auvergne. Les teneurs naturelles des eaux en phosphates comme en silice dissoute sont élevées en terrain volcanique par rapport aux terrains cristallins ou sédimentaires (Bruyant et Eusebio, 1904 ; Meybeck, 1986). Les lacs alimentés par des eaux souterraines ont aussi des teneurs plus élevées que ceux alimentés par les pluies. Enfin les teneurs actuelles en azote et en phosphore des lacs sont très influencées par les sources agricoles et/ou domestiques. Il en résulte que la plupart des lacs français ont un excès de l'un ou l'autre, parfois des deux (Pourriot et Meybeck, 1995). Aussi, les lacs du plateau d'Auvergne, situés à plus de 1 000 m d'altitude et exposés à une anthropisation très limitée, sont caractérisés par des eaux plus pauvres en azote et même en phosphore que la très grande majorité des lacs et réservoirs français de faible ou moyenne altitude.

La teneur en silice, essentielle au développement des diatomées, signe les modes d'alimentation en eau des lacs. A la Godivelle d'En-Haut, où l'alimentation par les pluies est maximale et l'altération chimique des roches minimale, la teneur moyenne en silice est parmi les plus basses de toutes celles observées en Europe (0,27 mg/l de SiO₂). A l'opposé, dans les couches profondes du Pavin, sans doute alimentées par des eaux souterraines profondes – en cours d'étude – et où une re-dissolution partielle de la silice du test des diatomées est probable, la teneur y atteint 60 mg/l SiO₂, une concentration également record au niveau européen.

Les niveaux en nitrates sont également très faibles par rapport aux lacs français. L'azote organique d'origine naturelle domine dans les lacs-tourbières (Chambédaze, Esclauzes, Bourdouze) très riches en matière organique dissoute. L'étude systématique des rapports C/N/P/Si, qui reste à mener dans les lacs d'Auvergne, peut encore apporter des surprises. Les lacs étudiés ici sont donc ultra-oligotrophes à oligotrophes. Cependant, le Pavin évolue vers la mésotrophie.

Le Pavin était depuis les premières observations de Delebecque, en 1892 jusqu'en 1970, un des lacs les plus transparents de France (Delebecque, 1898 ; Olivier, 1939 ; Würtz, 1945 ; Omaly, 1968 ; Devaux, 1980a, b) avec un maximum à 15,5 m et une moyenne entre 1892 et 1975 de 8,5 m (n>20 mesures). Depuis une trentaine d'années, la transparence, indicateur du niveau trophique, a beaucoup diminué et une augmentation lente de la biomasse est observée ; il est aujourd'hui redouté que le Pavin n'évolue vers le niveau eutrophe comme c'est déjà le cas pour les lacs d'altitude moyenne, Chambon et Aydat (J. Devaux, com. pers., 2009). Les apports de nutriments qui en sont à l'origine, se font par plusieurs sources (sources des Prêtres et source Eusébio) dont la surveillance a été progressivement mise en place à la demande du Parc naturel régional des volcans d'Auvergne (PNRVA), un processus qui a été très accéléré par les activités humaines et qui n'est pas encore identifié à la hauteur qu'il convient (PNRVA 2004). Ici, les nutriments pourraient provenir de prairies de fauche fertilisées qui alimentent certaines des sources. Depuis 2010, des réunions de concertation avec les élus, les agriculteurs et toutes les administrations concernées sont menées sous l'égide du Conseil régional pour contrôler les apports de nutriments du Pavin. C'est urgent car, compte tenu du temps de renouvellement des eaux de surface d'au moins 10 ans (Camus *et al.*, 1993), leurs stocks ne diminuent que largement en raison des sources internes venant des eaux profondes anoxiques - le monomolimnion (D. Jézéquel, com.pers., 2011).

Sur les autres lacs d'altitude cités ici, le risque d'eutrophisation est actuellement très faible compte tenu de l'usage des sols mais la vigilance s'impose à la Landie, à l'Esclauzes et même au Chauvet.

2.3.5. Usages des lacs

Les lacs du plateau d'Auvergne ont une valeur économique très diverse (tableau 1). Leurs usages concernent essentiellement trois domaines : (i) l'adduction d'eau potable (Godivelle d'En-Haut, Montcineyre, La Fage), (ii) la pêche, concédée à des particuliers ou à des sociétés de pêche (Pavin, Chauvet, Godivelle, Servières, Landie), (iii) le tourisme de masse au Pavin qui recevrait 200 000 visiteurs par an, et le tourisme vert à la Réserve naturelle des Sagnes de la Godivelle.

Les eaux de lacs, nous l'avons souligné, sont en effet extrêmement pures, « sans nitrates » ni pesticides jusqu'ici. Elles présentent aussi des teneurs en bactéries fécales infimes (maximum 6 germes par 100 ml et seulement 46 % de détection) et une absence de pesticides (<10 ng/l au total), selon la DDASS (Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales) du Puy-de-Dôme pour les eaux de distribution de la Godivelle.

En conclusion de ce tour d'horizon, les lacs du plateau d'Auvergne ont donc été jusqu'ici préservés de toute pollution directe par les bassins-versants du fait de leur position particulière en tête de bassin, à cheval sur la crête séparant l'Allier de la Dordogne, et de leur altitude. Ils n'ont pas fait l'objet de modification des berges ou de leur fonctionnement hydrologique, comme cela a été le cas pour le lac de la Crégut (867 m) dans l'Artense, aujourd'hui relié aux aménagements de l'Eau Verte. Ils n'ont pas été eutrophisés comme les lacs d'Aydat et Chambon. Curieusement, les principales modifications anthropiques sont les introductions massives de salmonidés au XIX^e siècle et l'éradication d'espèces, aujourd'hui protégées, comme la loutre et le balbuzard. Leurs eaux et leurs sédiments sont restés d'une rare pureté au contraire des lacs des deux autres provinces volcaniques d'Europe, l'Eifel et le Latium. Très variés par leur origine, leur morphologie, leur biogéochimie, ils forment ainsi un ensemble limnologique remarquable. Pourtant ils ne sont actuellement protégés que pour leur seule biodiversité floristique et faunistique (insectes, oiseaux). Dans cet ensemble, examinons à part le Pavin et le Creux de Soucy, sans doute uniques en Europe, et qui occupent une place éminente dans l'histoire scientifique.

3. Le Pavin, un lac fondateur de la limnologie

Jusqu'au XVIII^e siècle, le Pavin est un lieu sans accès et évité par les populations locales. En effet, à cette époque, le Pavin inspire une grande frayeur aux populations locales et fait l'objet de nombreuses « légendes » très précises qui courent depuis plusieurs siècles sur ce lieu à l'aspect terrifiant.

Avec le Léman, le Pavin est l'objet de relevés scientifiques très précoces dès le XVIII^e siècle. A la fin du XIX^e siècle et au cours de la première moitié du XX^e, des travaux nombreux voient le jour, en limnologie générale et en limnologie physique, sur la morphologie, la température, sur les inventaires hydrobiologiques. La plupart des chercheurs français travaillant sur les lacs passent ainsi au Pavin, accueillis par la Station biologique de Besse-en-Chandesse. Après la mise en évidence dans les années 1950-1960 d'une couche anoxique, sans oxygène dissous, à partir de 70 m de profondeur, des recherches nouvelles se développent dans d'autres domaines : géochimie isotopique, sédimentologie. En 1986, la catastrophe limnique du lac Nyos induit d'autres thèmes d'études sur les gaz dissous, CO₂ et méthane, la chimie et la microbiologie des couches profondes, et la prise en compte des risques naturels. Dès 1770, les recherches sur le Pavin sont souvent menées conjointement avec celles sur le lac du Creux de Soucy. Ce dernier, encore plus particulier que le Pavin, est également détaillé ici. Comme il est impossible de décrire en détail ces recherches - la liste de travaux sur le Pavin comprend une centaine de références - les périodes marquantes ne sont donc ici que résumées.

3.1. Le Pavin, un lac craint et évité (XVI^e siècle à 1859)

Avant 1859, le Pavin reste craint des populations locales : il n'y a aucun chemin d'accès, aucune barque. C'est le naturaliste auvergnat Henri Lecoq qui construit avec le pisciculteur Rico le premier accès et une petite cabane qui a précédé l'hôtel actuel. Le sentier qui fait le tour du lac à l'intérieur du cratère ne sera tracé par la commune de Besse qu'en 1909.

Premières descriptions du Pavin au XVI^e et XVII^e siècles

Le Roi Charles IX visite ses provinces de 1564 à 1566. **Abel Jouan** en fait une chronique détaillée en **1566**. Après avoir couché à Saint-Saturnin le 30 mars 1566, où il a pu voir de « *fortes grandes et haultes montagnes, que l'on appelle les Monts dorez* » le roi se rend à Clermont : « *par dela icelle y a une haulte montaigne que l'on appelle le Puy de Dome, sur icelle montaigne y a un grand gouffre duquel il sort ordinairement une grande fouldre de gresle et de tonnerre, qui gatste les bledz des vallées* ». (souligné par nous)

Ce récit est très similaire à la description de Münster (1489-1552), le cosmographe fameux du XVI^e siècle, traduit en français par François de Belleforest, dans sa description de l'Auvergne au tome 2 de Cosmographie Universelle (1575, pages 237-238).

« Et près de ce Mont d'or est la ville de Besse, à demie quart de lieue de laquelle on voit un lac de grande étendue et presque au sommet d'une montagne, lequel est sans fonds qu'on aye donc sceu trouver et dedans lequel n'y entre l'eau d'ailleurs qu'on l'aperçoive. Au reste il est admirable à voir et encore plus effroyable, d'autant que, si on jette quelque pierre dedans, on se peut tenir pour assuré d'avoir bientôt du tonnerre, des éclats (éclairs), pluies et gresles. Non loing de ce lac il y a un creux ou abisme nommé le creux des Soulcis, qui est rond à son ouverture et de profondeur qu'on ne saurait juger : il approche quelque peu du naturel de l'autre : car y ayant jecté quelques pierres dedans, vous prestez l'oreille contre, vous oyez un bourdonnement, et bruit merveilleux que vous diriez que c'est un tonnerre ouï de loing : et en été sans qu'on s'y rue rien dedans, il mène ce murmure aux concavitez de soy mesme, ainsi que les vapeurs sont agitées, de sorte qu'on dirait que ce sont des vents qui s'entre combattent. Les Creux de Fontanet et lac de Margoulins, bien qu'on n'y voie entrer ny fontaine ny ruisseau, ni en sortir une goutte d'eau si sont-ils toujours en état mesme : (sans doute s'agit-il des deux lacs de La Godivelle) : le (lac) Lacassou est rond comme un plat, assis sur une montagne et est de mesme que les sus-nommés (sans doute le lac Chauvet), étant voisin d'une chapelle que l'on nomme Notre-Dame-de-Vassivière, où se font de grands miracles, où le peuple afflue ordinairement et y va avec une grande dévotion en pèlerinage ».

Ce texte est remarquable à plusieurs titres. Tout d'abord, le Pavin n'est pas nommé ici, comme d'ailleurs dans le récit de Jouan, mais sa localisation est très claire. Sa description est précise, de même que celle du Creux de Soucy, suggérant que le texte se base sur des témoignages

de première main, ce qui n'est pas le cas de celui de Jouan. Dans le même texte sont associés ici le lac Pavin, le gouffre du Creux de Soucy et le pèlerinage de Vassivière ; toutefois il n'y a pas ici de lien entre ce dernier et deux autres sites remarquables qui valent une mention à Besse dans cette description de l'Auvergne pour le public international érudit du XVI^e siècle. Nous reviendrons plus tard sur les liens possibles entre ces trois sites.

Münster ne cite que quelques lacs dans son encyclopédie géographique qui couvre le monde exploré de l'époque. Dans son index qui comprend des milliers d'entrées, on trouve le Lac de Lieman (Léman), le Lac Podamique (lac de Constance), puis onze références de lacs anonymes mais bien localisés tels que : lac asphaltique et lac merveilleux et dangereux en Babylone (il s'agit de lacs de naphte), un lac merveilleux en Carnie (il s'agit des lacs karstiques saisonniers particuliers à la Yougoslavie), un lac en Haiti (analogie aux cénotes du Yucatan : puits dans lesquels « *l'eau entre et sort à gros bouillons* »), un lac sur l'île de Lango ou de Stancou (Mer Egée), avec « *des exhalations et des vapeurs si infectes qu'il est impossible qu'on puisse les souffrir* ». Le Pavin est, lui, répertorié à deux entrées : **Lac Merveilleux en Auvergne et à Lac sans fond en haut d'une montagne excitant tonnerre et éclairs** (tome 2, page 238). Münster a donc choisi de décrire les lacs tout à fait extraordinaires sur tous les continents (sauf l'Australie), avec une grande précision qui fait qu'on peut les identifier, sinon par leur localisation précise, du moins par leurs types exceptionnels : les lacs karstiques de Yougoslavie et les cénotes du Yucatan – dolines karstiques verticales remplies d'eau – resteront mystérieux pendant des siècles et ne seront étudiés par les scientifiques que 400 ans plus tard. Münster attache aussi une grande importance aux exhalaisons des lacs (mort des oiseaux passant au dessus des lacs de naphte, vapeurs infectes de l'île de Lango), les phénomènes météorologiques observés au Pavin et les vapeurs du Creux de Soucy en font partie.

Le texte de Münster-Belleforest, concernant le Pavin, correspond à une description exacte de l'état du lac à cette époque, bien connu des érudits, état assez merveilleux pour figurer dans leur Cosmographie Universelle, avec les autres merveilles géographiques du monde connu en 1575.

La région de Besse et le Pavin sont également décrits dans le **Manuscrit Godivel** datant de la seconde moitié du XVII^e siècle, gardé dans la famille Godivel jusqu'en 1874. Cette famille compte des lettrés dont plusieurs membres ont exercé des fonctions de judicature à Besse, telles que notaire (1531) ou bailli (1639). C'est Elie Jaloustre, membre de l'Académie de Clermont et de la Société française d'archéologie, qui en fait une transcription mot à mot (Jaloustre, 1884, p. 29-36).

Ce texte intitulé « Remarques touchant la Ville de Besse » fait sept pages dans la publication de Jaloustre et se présente comme une description générale de cette ville et de ses habitants depuis au moins 1204, en particulier sur le plan religieux et seigneurial. La moitié du manuscrit Godivel est consacrée d'abord au Creux de Soucy (une page), puis au Pavin (deux pages et demie). En voici des extraits concernant ce dernier :

« ...un des plus beaux lacs qui sont dans l'Europe...3° à raison de la profondeur qu'on croit être sans fond ; pour le moins sçait-on bien que les années passées quelques habitants de Besse et des environs qui vivent encore aujourd'hui aussy courageux que curieux, étant allés avec un futureau vers le milieu du lac, y jetterent jusques trois cent treize brasses de corde sans avoir jamais pu trouver le fond. Cette profondeur s'augmente à mesure qu'elle approche du milieu du lac ; 4° à cause de la source qui est bien si féconde qu'il en sort aussy bien les jours les plus chauds de la canicule qu'aux plus froids de l'hiver autant d'eau qu'il en faudrait pour faire moudre deux moulins ; 5° pour les propriétés de l'eau, elle est entièrement claire ; ceux qui en ont goust et l'odorat plus délicats trouvent qu'elle est un peu amère et qu'elle sent ce que sentent ces eaux qui lavent les rochers dont on tire le fer dans le mont pyrénées. Au reste on y a jamais pris ny veu poissons petits ou grands, on y voit pas même la plus petite pointe d'herbes aux extrémités.

Les oiseaux, ces hotes des bois, sont rares dans ceux qui environnent le lac et la raison en est parce que les fréquens brouillards que l'on voit sortir de ce lac presque en tout temps les en chassent leur en rendant ce lieu inhabitable.

On a appelé de tout temps le lac le lac de Pavent. Ce paré qu'on y voit à l'entour pourroit avoir donné lieu à cette dénomination, laquelle viendrait originairement du verbe paveo duquel on se servoit anciennement et signifie en françois paver. Quelques uns veulent que ce nom luy ait été donné de verbe grec παύω qui signifie en latin quiesco et en françois reposer, parce que les eaux de ce lac sont

dormantes et toujours dans une perpétuelle tranquillité à cause des montagnes qui l'environnent et qui mettent à l'abry de tout.

Suivant donc cette dénomination, le lac de Pavent serait la même chose que le lac ou il ne fait pas vent.

Néanmoins il semble plus vraisemblable qu'il s'appelle lac de Pavent à raison de la frayeur et de la peur qu'il cause à tous ceux qui le regardent, l'eussent-ils veu tous les jours de leur vie. Pavent viendrait donc de ces deux mots patois Par-ven ou du verbe paveo qui signifie j'ai peur, soit que cette peur soit excitée par la seule vue et considération du lac, soit parce qu'il s'élève de ce lac pendant l'été plusieurs exhalaisons et vapeurs qui peu de temps après dégénèrent en nuës et finalement en tempêtes qui tiennent en crainte et en peur tout le païs. »

On note ainsi les termes : sans fond, courage, frayeur, peur, inhabitable, absence de petits ou grands poissons, rareté des oiseaux, goût amer et odeur de fer des eaux, brouillards fréquents, exhalaisons et vapeurs, tempêtes, sur lesquels nous reviendrons.

Ce manuscrit, écrit par un érudit connaissant le grec, est une description détaillée de Besse et de ses alentours et correspond à la perception de l'état du Pavin par les contemporains. Il faut noter que le Creux de Soucy est aussi un site remarqué alors que le reste du voisinage de Besse n'a droit qu'à quelques lignes tant pour « les sources multiples et très bonnes » que pour le « Montdor où s'y fait de très bonnes fourmes et du meilleur beurre ». A cette époque le Soucy et le Pavin sont donc les sites les plus remarquables de toute la région mais ne sont pas fréquentés.

Deux siècles plus tard, Jaloustre, en 1884, qualifiera en note infra-paginale ces descriptions des deux sites comme des « spécimens curieux des légendes passées ». Il est d'autre part assez critique sur les interprétations étymologiques de Pavin faites par Godivel, encore citées dans tous les guides actuels, bien que débattues. Le Manuscrit Godivel a malheureusement disparu depuis sa publication par Jaloustre, mais cet historien régional est considéré comme un « érudit sérieux » et sa transcription comme une source fiable par les historiens actuels (Stéphane Gomis, université Blaise-Pascal, com.pers., 2011), notamment en matière religieuse et sociale.

Le premier sondage du Pavin en 1770

Au XVII^e siècle, on rapporte toujours la même description de la « merveille » du Pavin, celle de la pierre, du tourbillon et de la tempête mais la plupart des chroniqueurs, comme le chanoine Audigier (vers 1720), n'y croient pas et les visiteurs n'observent plus rien d'anormal.

Ainsi, dans leur description de la France en 42 volumes, l'Abbé de La Porte, de Fontenay et Domaïron (1765-1795) consacrent trois pages au Pavin et au Creux de Soucy contre seulement une demie page à la ville de Besse (vol. 32, pp. 19-23) : une fois encore, on note l'importance exceptionnelle, dans la culture locale et régionale, de ces deux lieux isolés et peu accessibles. Pour Domaïron, le lac est une des anciennes curiosités naturelles de l'Auvergne, sujet à des « *révélations de merveilles* » et plusieurs « *vieilles traditions* » dont celle rapportée par le père Fodéré : « *le lac est admirable ... parce qu'il est sans fond ... et épouvantable, d'autant que, si vous y jetez une pierre, vous êtes assurés d'avoir bientôt du tonnerre, de la pluie et de la grêle* » (souligné dans la citation par Domaïron). Bien que Domaïron rapporte que « *lorsqu'on jetait une pierre dans ce lac un épais nuage s'élevait aussitôt du milieu des eaux, produisant des éclairs le tonnerre l'orage et la grêle* » (souligné par nous), il n'y trouve, lors de sa visite en 1760, que « *l'image du calme et un des plus riants paysages que j'aie jamais admiré* ».

Au XVIII^e siècle apparaît une remise en cause progressive des descriptions faites par Jouan, Münster, Godivel et Fodéré, par des naturalistes et/ou des ecclésiastiques, comme l'Abbé Delarbre et Legrand d'Aussy. Cette réfutation commence par l'insondabilité du lac.

Le 9 mars 1726, le lac est l'objet d'une tentative infructueuse de sondage en hiver par un autre membre de la famille Godivel, subdélégué de Besse : la ligne filée ne trouve pas le fond, accréditant la croyance locale. D'après Legrand d'Aussy, ce n'est pas la première tentative. La tentative suivante, à l'initiative de l'Abbé Delarbre, fut menée et réussie par Théodore Chevalier, inspecteur des Ponts et Chaussées du Roi, le 28 septembre 1770 à partir d'un radeau. Les deux expériences ont eu à l'époque un fort écho car elles sont décrites en détail par Legrand d'Aussy (1788) et par Delarbre (1798). Celle de Chevalier peut être considérée comme la première étude limnologique en France. En effet il sonda le Pavin à 48 toises et 8 pieds, soit environ 92 m, profondeur trouvée en 1892 par Delebecque

(1898), puis le Creux de Soucy, une cavité naturelle remplie d'eau voisine du Pavin, à 1,25 km au Sud dans l'alignement Pavin-Montchal. Il nivela aussi les deux plans d'eau. Le niveau moyen de l'eau dans le Creux de Soucy est situé à 1 242 m, soit 45 m plus haut que celui du Pavin (1 197 m) ce qui rendrait ainsi possible un écoulement de ses eaux vers le Pavin, cependant improbable (Lecoq, 1835 ; Bakalowicz, 1966).

A la suite du sondage de Chevalier, Legrand d'Aussy (1737-1800, historien et naturaliste, membre de l'Institut), écrit dans son *Voyage en Auvergne* (1788 p.319-334) : « *le Pavin est un lieu vaguement célèbre sur lequel on a débité cent sottises absurdes. Pavin n'excite ni orage ni tempête, ce n'est qu'un simple lac* » (souligné par nous). Pour ce savant auvergnat, la réussite du sondage de Chevalier, montre bien « *l'absence de maléfices* » sur ce lieu et permet ainsi de réfuter en bloc les descriptions qui ont encore cours sur le Pavin et rapportées par les « *Compilateurs* », non nommés par Legrand, sans doute de La Porte *et al.*

L'abbé Antoine Delarbre (1724-1807), directeur du Jardin botanique de Clermont et donc lui aussi scientifique reconnu, décrit le site du Pavin en détail dans sa *Flore d'Auvergne* (Delarbre, 1798) et dans sa *Notice sur l'Ancien Royaume des Auvergnats* (1805) : « *Pavin est un des plus beaux lacs d'Auvergne.... Les Géographes Français se sont accordés pour en raconter des histoires du vieux temps, auxquelles il ne manque autre chose que la vérité. On a dit que le lac était sans fond, que lorsqu'on y jetait des pierres, il en sortait des vapeurs qui étaient suivies d'éclairs et d'éclat de tonnerre, etc... Autant de contes de bonne femmes... On a avancé que ce lac n'est point poissonneux ; l'est-il beaucoup ? Je n'oserais l'assurer, mais j'ai vu du poisson s'élancer sur la surface de l'eau* » (souligné par nous).

La description ancienne du Pavin comprend toujours des éclairs et des coups de tonnerre, déclenchés par des jets de pierre. Mais Delarbre les qualifie d'« *histoire du vieux temps* » et, plus loin, attribue les coups de tonnerre au craquement de la glace. En ce qui concerne les poissons, nous avons déjà vu qu'effectivement il n'y a que des ablettes et des goujons jusqu'en 1859.

En 1804, Louis-Marie Prudhomme, journaliste et éditeur, publie son Dictionnaire universel de la France en cinq volumes, dont 40 lignes sont consacrées à Besse (tome 1, p. 317) où il signale encore « *une image miraculeuse de la mère de Jésus-Christ trouvée sur la montagne de Va-s-y-veyre ...et un lac qui présente un effet merveilleux. Lorsqu'on y jette une pierre avec force, il s'élève une vapeur épaisse, qui, un instant après, se résout en petite pluie* ». On note ici la mention conjointe des miracles (de Vassivière) et des effets merveilleux du Pavin. Nous reparlerons de cette association. Prudhomme n'a sans doute pas visité le site mais fait, sans doute, état d'écrits précis comme ceux des Compileurs (de La Porte, de Fontenay, Domeiron 1765-1795). Les autres dictionnaires géographiques publiés de 1739 à 1890, comme celui de Bruzen de la Martinière (1662-1746), ne font pas état du Pavin, sauf celui de Kilian et Piquet (1825) qui le citent comme une « *curiosité naturelle* ».

Les visites de Lecoq (1831-1859)

Le 31 juillet 1831, le naturaliste Henri Lecoq (1802-1871), futur membre de l'Académie des sciences, lors d'une excursion à partir du « Mont d'Or » (qui deviendra Mont Dore), visite pour la première fois le Pavin, le Creux de Soucy et la Godivelle. Au Pavin, Lecoq note (1835, p. 337 et 338) : « *Aucun bateau, aucune nacelle ne traversent ses eaux profondes. Aucun habitant des environs n'oserait s'attarder sur cette plaine liquide. Un tourbillon existe au milieu, et engloutirait l'imprudent qui voudrait y conduire sa barque. Une pierre lancée assez loin pour atteindre ce gouffre, fait bouillir les eaux et produit un orage. Le plomb des sondes fond au milieu du lac et sa profondeur n'atteint pas de limites... Telles sont les absurdités que nous entendions raconter* ».

Lecoq ne parle pas de légendes mais de croyances précises, bien qu'absurdes, encore rapportées en 1831 par les habitants. La réputation d'insondabilité est encore vivace malgré les efforts de Chevalier et de Delarbre. On note que la description du Pavin est précise et semblable à celle du Manuscrit Godivel, dont Lecoq ne mentionne pas l'existence, avec la mention d'un tourbillon, du bouillonnement produit par une pierre lancée et de l'orage.

Depuis 1760 au moins, l'absence de phénomènes particuliers observables au Pavin conduit donc tous les visiteurs et les scientifiques

à réfuter en bloc les descriptions anciennes. Celles-ci restent cependant abondamment rapportées comme des faits avérés dans les présentations de l'Auvergne jusqu'en 1804 au moins. On verra plus loin que des naturalistes confirmés rapportent, au tournant du XIX^e siècle, pour les lacs de Monticchio, en Italie, les mêmes phénomènes *merveilleux* que ceux attribués au Pavin (Ciarallo et Capaldo, 1995).

3.2. Le Pavin et l'essor de la limnologie française (1859-1952)

Après sa première visite au Pavin, Lecoq continue à s'intéresser aux lacs tant en France qu'en Suisse et en Italie. A son tour directeur du Jardin botanique, en 1847, il fait construire la première barque au Pavin et en effectue la première étude des eaux avec Dalmas, pharmacien à Besse. En 1859, il y introduit des salmonidés avec Rico, premier responsable de pisciculture du Puy-de-Dôme, ce qui lui démontrera l'absence de fondement des légendes. C'est le début des investigations limnologiques régulièrement menées sur le Pavin depuis 150 ans et qui impliqueront de très nombreux chercheurs. Lors de ces recherches poussées en 1859, il décrit une nouvelle espèce d'éponge d'eau douce (*Spongylus lacustris*) très abondante sur le bois mort immergé. Ce type d'éponge est caractéristique d'eaux riches en silice dissoute, ce que Lecoq devine sans pouvoir le quantifier à l'époque.

Lecoq publie en 1871, à la fin de sa vie, un ouvrage remarquable, *L'eau sur le plateau central de la France*, dans lequel il décrit par thème, origine, couleur, température..., les nombreux lacs qu'il a visités depuis quarante ans. Cependant, il lui manque les innovations techniques : embarcation spécialisée, treuil, thermomètre de grande précision, analyses chimiques poussées. Celles-ci sont développées en 1892 par André Delebecque (1861-1947), jeune ingénieur des Ponts et Chaussées en poste à Thonon-les-Bains, qui entreprend de dresser un inventaire de 330 lacs français (origine, morphométrie, thermique, chimie des eaux et des sédiments) (Delebecque 1898).

Delebecque dresse avec la meilleure précision possible – sa carte du Léman comprend 5 000 sondages et autant de visées faites du bord – la bathymétrie d'une centaine de lacs français qui fait encore référence aujourd'hui. En

Auvergne, il carte ainsi Pavin (92 m maximum), Montcineyre (17 m), Servières (27 m), Chauvet (63,2 m), Godivelle d'En-Haut (43,7 m) et aussi Tazenat (66,6 m), Bouchet (27,5 m) et Issarlès (108,6 m). Delebecque confie l'analyse des eaux et des sédiments à Duparc, professeur de chimie à Genève, et remarque pour la première fois les teneurs en silice dissoute (SiO_2) très fortes et la nature siliceuse unique des sédiments du Pavin avec plus de 90 % de la matière minérale (en excluant la perte au feu), sans toutefois la qualifier de diatomite actuelle.

Delebecque publie les premiers profils thermiques du Pavin réalisés les 19 et 24 juin 1892 avec un thermomètre à renversement Negretti et Zambra utilisé depuis une dizaine d'années par quelques océanographes et par Forel sur le Léman. Il s'agit déjà de la pointe de la technologie de l'époque (Touchard, 2002). Delebecque mesure deux fois 4,6°C au fond avec un profil normal quasiment constant depuis la profondeur de 25 m. Une troisième mesure lui donne 4,8°C au fond. Il attribue cette légère augmentation à la décomposition des algues.

Après Delebecque, Bruyant, professeur à la Faculté des sciences de Clermont, crée la Station biologique de Besse-en-Chandesse comme une annexe du Laboratoire départemental de pisciculture (Eusébio, 1896). Elle sert depuis de base permanente pour toutes les recherches sur le Pavin. Le maire de Besse, Antoine Berthoule, aussi propriétaire des lacs Pavin et Chauvet, développe, nous l'avons vu, les introductions de poissons et effectue des travaux comparatifs sur les lacs de cette région (Berthoule, 1890-1896).

Bruyant, Eusébio puis d'autres chercheurs de la Station comme Olivier (1939) ou réfugiés à Clermont, comme Würtz (1945), travaillent sur le Pavin et les lacs voisins. Leurs études portent surtout sur l'hydrobiologie du phytoplancton et du zooplancton. En 1952, Luc Olivier, chercheur à la Station biologique, décrit pour la première fois un profil d'oxygène anormal.

3.3. Découverte de la méromicticité du Pavin (1951-1963)

La méromicticité du Pavin, c'est-à-dire l'absence permanente d'oxygène au fond du lac – ce qui signe l'absence de mélange vertical – est un

état considéré comme permanent par l'ensemble des chercheurs actuels présents au colloque de Besse de 2009. Cette découverte résulte des travaux d'Olivier puis de Pelletier sur la période 1952-1962.

Les premières mesures d'oxygène dissous au Pavin sont sans doute celles faites par Olivier de mai à octobre 1938. Depuis Delebecque et jusqu'en 1963, les analyses des eaux du Pavin sont effectuées sur des prélèvements réalisés à des profondeurs déterminées avec des bouteilles à fermetures commandées depuis la surface par un messenger de laiton. La température est prise par Olivier au moyen d'un thermomètre à renversement fixé à la bouteille. Quand il effectue ses premiers profils d'oxygène (dosage Winkler), de température et de pH au Pavin, il s'arrête à 50 m dans sa publication. Mais d'après Pelletier (1963 et com. pers., oct. 2010), il est très vraisemblable qu'il ait poussé ses investigations régulières plus profondément car il rapporte trouver encore du zooplancton vivant à 80 m.

En 1951, Olivier reprend l'étude du Pavin avec la bouteille Richard et le thermomètre à renversement. Il observe pour la première fois le 24 mai 1951 une « *baisse très nette d'oxygène à 65 m* » puis le 11 juin 1951 « *une couche totalement dépourvue d'oxygène à 70 m* ». Surpris, il double la prise d'eau et le dosage immédiat d'oxygène, par la méthode Winkler. Le 16 août 1951, il retourne au Pavin et mesure 2,3 cm³ O₂/l à 60 m, 0 à 70 m, 9,1 à 80 m et 0 à encore 90 m : le profil est encore une fois très hétérograde. Cette découverte lui semble si déconcertante qu'il fait aussitôt une communication à l'Académie des Sciences (Olivier, 1952) pour « *annoncer la mise en évidence vers 70 m de profondeur d'une couche dépourvue d'oxygène, contrairement à l'opinion de Würtz* ». Würtz est chef de travaux de la Station centrale d'hydrobiologie appliquée, une nouvelle institution créée pour étudier les eaux continentales et valoriser les milieux aquatiques alors réfugiée à la faculté des sciences de Clermont et qui travaille aussi sur les lacs d'Auvergne. Au Pavin, le 20 juillet 1943, il rapporte une température de 4,4°C et 8,34 cm³ O₂/l aux profondeurs de 50 à 70 m, et note qu'« *il n'y a pas de diminution d'oxygène en profondeur* ».

A cette époque, les profils d'oxygène, conductivité et pH sont effectués de manière discrète, c'est-à-dire sur des eaux prélevées à des profondeurs données, par exemple 50 m, 60 m, 70

m. Aujourd'hui, les microsondes permettent d'effectuer ces mesures *in situ* et d'en faire l'enregistrement. Olivier ne peut donc décrire l'anomalie en oxygène avec la finesse submétrique d'aujourd'hui.

Quelques années plus tard Pelletier, futur limnologue de l'INRA à Thonon-les-Bains, accueilli à la Station biologique, refait un profil vertical dans le lac et observe à son tour pendant l'été 1962 (i) une absence complète d'oxygène dissous de 70 m jusqu'au fond, (ii) une inversion thermique vers 60 m, c'est-à-dire une augmentation de température de 4,2 à 5,2°C, (iii) la présence d'hydrogène sulfuré en profondeur caractéristique des eaux anoxiques, (iv) des teneurs en fer dissous très élevées en profondeur.

Dès 1963 il fait une première communication et conclut : « *il me semble que l'on vient d'assister à l'installation de cette couche anaérobie* » (Pelletier, 1963).

Le protocole de mesure de Pelletier est beaucoup plus précis que celui d'Olivier. De juillet 1963 à octobre 1967, il effectue encore cinq profils d'oxygène et de température. Il est le premier à mesurer au Pavin la température tous les mètres avec un électro-thermomètre Metrix sensible à 0,05°C. Les analyses chimiques sont faites tous les 10 m suivant des protocoles précis et innovants (fer dosé à l'orthophénantroline). La température à 55 m est proche de 4°C, ce qui correspond au maximum de densité de l'eau pure puis augmente dans la couche de 70 à 90 m, entre 5,2 à 5,4°C. Il faut rappeler ici qu'en raison de cette propriété la température des lacs tempérés profonds est proche de 4°C (Touchard 2002) : l'inversion thermique observée par Olivier et Pelletier est donc exceptionnelle et ne peut s'expliquer que par la présence d'eaux plus minéralisées au fond du Pavin.

Pelletier signale de plus que, du 21 août 1964 au 11 octobre 1967, la minéralisation moyenne de la couche profonde - 70 à 92 m - a augmenté significativement de 242 à 296 mg/l d'extrait sec et la conductivité électrique maximale de 320 à 370 µSiemens/cm à 25°C. Dans son article résumant ces observations (1968), il dénomme pour la première fois au Pavin le « *monimolimnion* » anoxique par opposition au « *mixolimnion* », couche de 0 à 55 m régulièrement mélangée, suivant la nomenclature des

limnologues. Pour lui, l'origine de la méromicticité vient de la minéralisation en profondeur des débris d'algues tombant de la surface et non pas d'apports d'eaux minéralisées par des sources profondes.

Le 8 avril 1969, Nicole Omaly-Lair, alors assistante à la Faculté des sciences de Clermont-Fd, effectue à son tour le premier profil en continu d'oxygène dans un lac français avec une microsonde et décrit le *mésolimnion* du Pavin, c'est-à-dire la couche d'interface entre les eaux oxygénées et anoxiques qui sera aussi appelée plus tard *oxicline* avec une précision métrique.

Les observations d'Olivier et de Pelletier appellent une discussion sur la méromicticité du Pavin. Les travaux antérieurs de Delebecque (1898), Bruyant (1893), Olivier (1939) et Würtz (1945), qui ont sondé le Pavin jusqu'aux plus grandes profondeurs, n'avaient pas rapporté de dégazage des sédiments, de changement de couleur de l'eau ramenée à la surface lié au fer précipité, ou d'odeur d'hydrogène sulfuré. Ils ne rapportent qu'« *une épaisse couche de vase sur toute l'étendue de la plaine, véritable randannite actuelle* », (Delebecque, 1898). En juin 1938, Olivier drague le fond du lac à 80 m et ramène une « *vase de couleur verdâtre, un peu collante et muqueuse, et ayant une odeur assez forte et spéciale rappelant celle des characées* » mais ne fait pas mention d'odeur caractéristique d'H₂S. La très légère augmentation de température de 0,2°C trouvée par Delebecque est dans la marge de précision de son appareil ; elle est trouvée une fois seulement sur trois mesures répétées le 24 juin 1892, et est bien différente de l'inversion thermique de +1°C, observée par Pelletier avec l'électro-thermomètre.

Cependant, une grande partie de la communauté scientifique actuelle reste toutefois sceptique sur ces observations (Didier Jézéquel, com.pers. 2010 et 2011). Par exemple, si on considère que, dans le profil de 1951 d'Olivier le niveau oxygéné à 80 m est erroné, l'anomalie disparaît. Les dosages d'oxygène par la méthode de Winkler ne sont pas fiables à 100 %. Les profils de Wurtz et d'Olivier ne sont faits que tous les 10 m, au mieux ; ceux de Delebecque sont encore plus espacés. Les géochimistes considèrent que la méromicticité est acquise depuis longtemps, sans doute depuis plus de deux siècles,

d'après les modèles de bilan chimique de la couche profonde, très différente du mixolimnion, qu'on ne peut expliquer que par des apports de sources profondes, invoqués dès les premières recherches géochimiques (voir ci-après). Il est très difficile de concevoir une accumulation de sels dissous, de fer et de manganèse dans le monimolimnion en 10 ou 20 ans seulement, de 1940 à 1960. Les chercheurs actuels se tournent sur de nouveaux traceurs des conditions redox archivés dans les sédiments pour reconstituer le fonctionnement géochimique et hydrologique du Pavin avant la période de 1951 à 1962.

A partir de 1963, la méromicticité est en tout cas bien permanente et va faire l'objet de l'intérêt croissant des chercheurs attirés au Pavin, à commencer par les géochimistes.

3.4. Le Pavin et les premières études isotopiques sur les lacs (1964-1985)

Dans les années 1960, les premières analyses d'isotopes dans les milieux aquatiques, sur l'eau et les sédiments, se développent rapidement. De 1964 à 1985, le Pavin est un des sites privilégiés pour ces recherches pionnières en ce qui concerne le tritium (^3H), le plomb (^{210}Pb), le silicium (^{32}Si) et le plutonium (Pu).

Le 17 décembre 1965, le premier profil de tritium, exprimé en unités tritium (UT), est réalisé sur le Pavin par P. Lévêque hydrologue à l'IGBA, Faculté des sciences de Bordeaux, et ses collègues (Alvinerie *et al*, 1966). C'est une des toutes premières études en Europe. Cet isotope radioactif de l'eau a vu ses teneurs naturelles dans les pluies de l'hémisphère nord, multipliées par cent et plus, entre 1950 et 1962, à la suite des premiers tests thermonucléaires effectués dans l'atmosphère. Cet isotope a été alors utilisé partout pour tracer les trajets de la molécule d'eau dans les eaux de surface et souterraines et en proposer des âges respectifs. Ce premier profil de tritium du Pavin, effectué tous les 10 m, confirme tout de suite l'observation de Pelletier : contrairement aux eaux de surface riches en tritium (180 à 220 UT), les eaux profondes n'en contiennent presque pas (< 20 UT) et sont donc âgées d'après les auteurs d'une douzaine d'années au moins.

Avec des collègues de la Faculté des sciences de Paris (Crouzet *et al*, 1969 ; Meybeck *et al*, 1975), nous confirmons cette particularité sur

des profils réalisés en septembre 1969 et décembre 1970 : de 70 m à 90 m, les teneurs sont inférieures à 20 UT. Mais les prélèvements à quelques cm de l'interface eau-sédiment à 92 m, pris par le carottier Mortimer-Jenkins, présentent aussi des teneurs en tritium anormales plus fortes jusqu'à 50 UT, illustrant la grande complexité de l'origine et de la dynamique des eaux profondes, toujours à l'étude. Des apports profonds de sources sous-lacustres sont de plus en plus envisagés (Krishnaswami *et al*, 1971 ; Martin, 1985; Viollier *et al*, 1997 ; Aeschbach-Hertig *et al*, 2002). Le dernier modèle géochimique se base sur une arrivée d'eau profonde de 1,6 l/s avec une composition proche de celle de la source de la Fontaine Goyon, située à 1 km du lac (Assayag *et al*, 2008).

D'autres analyses isotopiques sont des premières françaises et même mondiales. Elles sont réalisées sur le Pavin de 1969 à 1985 par notre équipe de Biogéochimie Marine de l'ENS-Paris Ulm dirigée par Jean-Marie Martin. En 1970, une carotte de 20 cm de vase superficielle est prise à 92 m, elle est envoyée au Tata Institute for Fundamental Research d'Ahmedabad (Inde) au Laboratoire de géochimie isotopique dirigé par D. Lal. La décroissance radioactive du ^{210}Pb , un isotope naturel nouvellement dosé, est comparée avec le profil du ^{137}Cs (Césium) qui provient alors des retombées des explosions nucléaires atmosphériques. Avec une autre carotte prise sur le Léman, la méthode de datation des sédiments au ^{210}Pb , aujourd'hui universelle, est ainsi validée (Krishnaswami *et al*, 1971).

Le Pavin est alors de plus en plus reconnu comme un pluviomètre géant. Il fait l'objet d'autres études pionnières sur les isotopes cosmogéniques, ainsi le silicium 32 (Nijampurkar *et al*, 1983 ; Martin *et al*, 1992), qui permet aujourd'hui de dater les glaciers himalayens.

Au Pavin, les apports atmosphériques de poussières et d'aérosols ne sont presque pas dilués, donc masqués, par des apports détritiques en provenance du bassin versant. Déjà dans les années 1960, T. Grjebine du Centre des Faibles Radioactivités du CNRS y a recherché des traces de poussières cosmiques (Grjebine *et al*, 1964). Il était donc tentant de rechercher dans les sédiments récents l'évidence d'une contamination par des retombées atmosphériques, bien qu'*a priori* improbable au Pavin en raison de son éloignement de sources de pollution. Catherine Jeandel, océanographe au CNRS aujourd'hui, y

trouve en effet des ultra- traces de plutonium, un élément chimique très toxique, qui n'existe pas dans la nature mais qui est émis à des centaines de km de là par l'industrie nucléaire de la vallée du Rhône (Jeandel, 1981). A son tour, Françoise Elbaz-Poulichet met en évidence pour la première fois en France plusieurs types de contamination de l'atmosphère en plomb, identifiés par les isotopes stables ^{207}Pb et ^{206}Pb : une première contamination d'origine industrielle qui apparaît vers 1900, puis celle liée au trafic automobile à l'Après-guerre (in Martin, 1985).

Le Pavin garde ainsi dans ses archives sédimentaires l'évolution du bruit de fond général de la contamination atmosphérique en France depuis 150 ans et plus, pour d'autres contaminants volatiles comme les diphényles chlorés (PCB), les hydrocarbures aromatiques cycliques (HAP) et des métaux comme le plomb et le mercure. Le cycle lacustre de ce dernier a ainsi fait l'objet d'une analyse poussée par une équipe internationale menée par l'Ifremer (Cossa *et al*, 1994).

3.5. Le Pavin, une reconnaissance internationale

Depuis la fin des années 1960, le Pavin attire les chercheurs étrangers (Persoone *et al*, 1968 ; Flik *et al*, 1973). En 1971, il est sélectionné, avec les lacs de Tazenat, Aydat, Chauvet et Godivelle d'En-Haut, pour la première fois dans un programme international de surveillance des eaux continentales sous l'égide de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), grâce à Nicole Omaly-Lair. Les autres groupes de lacs sont nordiques et nord-américains (Restituto et Lair, 1975-1976). Cet important programme vise à établir des critères universels d'eutrophisation. Il est piloté par Richard Vollenweider, le premier limnologue à avoir reçu le prestigieux prix international en environnement, le Tyler Price. Les suivis normalisés effectués au Pavin permettent d'étudier les successions écologiques des populations de phytoplancton et de zooplanctons, essentiellement dans le mixolimnion (Lair, 1975-1976 ; Devaux et Lair, 1976 ; Devaux, 1980 ; Devaux *et al*, 1983).

En 1985, une recherche pluridisciplinaire est initiée au Pavin par Jean Devaux dans le cadre

d'un programme national du CNRS (GRECO-lacs) dirigé par Roger Pourriot (Ecologie, ENS-Ulm). Dans les eaux de surface, l'accent se porte sur les domaines nouveaux comme la biogéochimie du phosphore (Devaux, 1980 a et b ; Amblard, 1986), les acides gras (Bourdier et Amblard, 1988). Ce programme aboutira dix ans plus tard à un ouvrage collectif de limnologie générale dans lequel le Pavin a toute sa place (Pourriot et Meybeck, éditeurs, 1995). Le Pavin fait alors partie des quelques dizaines de lacs, sur deux millions et plus, qui sont les mieux étudiés au monde, mais d'autres surprises attendent encore les scientifiques.

Un observatoire international des processus d'oxydoréduction en milieu aquatique (1985-2010)

De 1968 à 1985, l'étude géochimique des eaux profondes, monimolimnion et mésolimnion, reste limitée. Les campagnes de terrain effectuées par nous-même pour l'équipe de l'ENS se font une ou deux fois par an et les profils verticaux se font à profondeurs fixes, par exemple 55, 60, 65, 70, 90 m. Dès ces premières études, des couples oxydo-réducteurs de fer, de manganèse et d'arsenic présentent des gradients de concentration énormes, d'un facteur mille, entre les eaux du mixolimnion - mélangées deux fois par an - et celles du monimolimnion profond, confirmant les toutes premières analyses de Fe^{2+} et Fe^{3+} (fer) faites par Pelletier (Figuères, 1978 ; Seyler, 1985). On y effectue aussi des profils d' ^{18}O (oxygène), un isotope stable, et de tritium qui seront précieux pour étudier sur le long terme la stabilité du monimolimnion (Martin, 1985 ; Aeschbach-Hertig *et al*, 2002; Olive et Boulègue, 2004).

A partir de 1987, des spécialistes de la chimie de l'eau de l'université de Paris 7 (Michard, Sarazin, puis Jézéquel et Violier) et de la limnologie physique (Poulin, Ecole des Mines de Paris) rejoignent, grâce au GRECO-lac, les équipes travaillant sur le Pavin (Michard *et al*, 1994 ; Viollier *et al*, 1995, 1997). Ils y apportent progressivement des avancées techniques considérables qui permettent d'analyser à des résolutions spatiales (tous les 10 cm) et temporelles (quelques minutes) les profils *in situ* d'un nombre croissant de paramètres : température, conductivité, pH, oxygène dissous, etc. Parallèlement, leurs analyses chimiques de

l'eau sont de plus en plus poussées et fréquentes. Le mésolimnion, couche de transition, est ainsi progressivement redivisé entre l'oxycline, pour l'oxygène dissous, et de nombreuses chemoclines - couches de forts gradients chimiques - qui se succèdent : sels dissous, nitrates, manganèse, sulfates, enfin CO₂, mettant en évidence les transformations progressives des couples redox.

Les suivis en continu et *in situ* révèlent aussi une dynamique inconnue du mésolimnion : des ondes internes d'une période de 5 heures sont mises en évidence (Bonhomme, 2008). Ces travaux sont dans la continuation de ceux de Bruyant (1903) qui a mis en évidence les seiches (oscillations de la surface des lacs sous l'effet d'une perturbation atmosphérique) du Pavin. Les derniers travaux suisses qui prennent en compte les bilans hydrochimiques et des profils thermiques très précis pour localiser la profondeur des sources invoquent une source vers 45 m (Aeschbach-Hertig et al., 2002). Le fond du Pavin que l'on croyait très stable révèle une dynamique propre, même si l'âge théorique des eaux profondes excède le siècle. On trouvera dans ce volume les articles de synthèse d'E. Violier et de D. Jézéquel et al. contenant d'autres résultats sur la géochimie unique des eaux profondes.

Dans les années 1990, une découverte majeure est faite par les microbiologistes de Clermont-Fd conduits par Christian Amblard et Gérard Fonty : des communautés bactériennes exceptionnelles sont mises en évidence par leurs caractéristiques génétiques dans le mésolimnion et le monimolimnion. Les Archées y dominent les eubactéries et la variété des bactéries est à la hauteur de leur densité (Lehours *et al.*, 2010). Les phylotypes varient avec la profondeur et reflètent la grande complexité du mésolimnion. Ces recherches en écologie bactérienne sont prometteuses particulièrement sur les bactéries du méthane qui fait l'objet d'un autre programme à l'échelle nationale, METANOX. Environ 70 % des espèces procaryotes trouvées dans la couche anoxique n'ont pas encore été décrites ni identifiées dans d'autres écosystèmes (Lehours *et al.*, 2010) ! (voir aussi Fonty *et al.*, ce volume)

Il est impossible d'aborder ici toutes les innovations techniques ni les résultats phares des recherches menées de 1990 à 2010, comme ceux du programme national METANOX, et qui sont encore en cours.

Pourquoi le Pavin attire-t-il de plus en plus de scientifiques ? Il cumule des caractéristiques limnologiques très rares, dont la méromicticité (tableau 1). Mais d'autres lacs de cratère méromictiques sont trouvés en Europe dans l'Eifel (Gemündenermaar), au Latium (lac Albano) et au Mont Vulture (lacs de Monticchio). Le Pavin est de dimension très réduite, demeure très peu contaminé, et reste très accessible, grâce à la Station biologique de Besse. Il bénéficie de plus d'une attention particulière des chercheurs depuis longtemps : ils disposent ainsi de longues chroniques. Ses sédiments (Gasse, 1969 ; Schettler *et al.*, 2007), son mésolimnion et son monimolimnion sont exceptionnels, peut-être uniques par leur développement, leur stabilité et leur complexité. De grands lacs tropicaux sont méromictiques, comme le Tanganyika et le Kivu, mais leur dynamique est beaucoup plus difficile et coûteuse à étudier.

Le Pavin permet d'observer de très nombreux processus fondamentaux tant physiques, chimiques, biogéochimiques que microbiologiques, qui y sont souvent simplifiés et/ou amplifiés naturellement. Dans le mésolimnion, les processus chimiques et microbiologiques d'oxydoréduction sont dilatés dans la colonne d'eau sur plus de cinq mètres, avec une interaction avec des particules très réduite, alors que les études classiques, pratiquées au fond des lacs, à l'interface eau/sédiments, se font parfois sur quelques centimètres seulement. Dans le monimolimnion, les processus de formation et de libération du CO₂ et du méthane, les deux principaux gaz à effet de serre, sont beaucoup plus lisibles que dans d'autres milieux naturels. *Le métabolisme du Pavin, qui imite les toutes premières formes de la vie, nous offre ainsi un regard sur les plus anciens processus de l'histoire du vivant* (Fonty, com. pers., 2009).

En plus de son statut reconnu de « **lac unique** », le Pavin a acquis ainsi un statut de « **laboratoire naturel** » disponible en permanence pour des études fondamentales dans de nombreuses disciplines. Avant d'aborder les résultats des derniers travaux effectués sur le Pavin et liés aux risques naturels, présentons aussi le Creux de Soucy, compagnon du Pavin et site unique en son genre.

3.6. Le Creux de Soucy, un petit monstre géologique et limnologique

Situé à 1,3 km au Sud du Pavin, le Creux de Soucy est une grosse cavité de 35 m de haut qui perce la coulée de lave du Montchal par un étroit oculus de 3 m de diamètre, et au fond de laquelle se trouve un petit lac. Ce lieu était aussi connu que le Pavin et faisait jadis l'objet de croyances de la part des populations locales : un animal perdu au Soucy était réputé réapparaître au Pavin (de La Porte *et al*, 1765-1795 ; Lecoq, 1835 ; Jaloustre, 1884). Jusqu'au XIX^e siècle, la coulée n'était pas recouverte de végétation ainsi que l'attestent les cartes les plus anciennes et la description de Martel (1894) : « *au milieu d'un véritable désert appelé Les Fraux, le Creux de Soucy se trouve au fond d'un petit cirque en forme de cratère. Aucun point de repère ne le distingue* ». Le gouffre n'en était que plus terrifiant.

Après le premier sondage du gouffre par Chevalier en 1770, plusieurs tentatives d'exploration furent pratiquées au XIX^e siècle, comme celle de Berthoule père, vers 1860. Mais celui-ci fut arrêté par « *l'extinction des bougies, suffocations, céphalées et étourdissements* » ; il y reconnaît la présence de CO₂ bien identifié dans d'autres cavités de la région. Plus tard, Amédée Berthoule, maire de Besse, naturaliste et propriétaire des lacs Pavin et Chauvet, contacte alors Edouard-Alfred Martel, le père de la spéléologie française (1859-1938). Martel explore les gouffres français depuis quatre ans déjà et possède un matériel bien rodé - escarpolette, bateau - et une équipe aguerrie. Il réunit en juin 1892, en plus de son cousin Gaupillat, A. Delebecque, venu travailler sur les lacs d'Auvergne, E. Ritter étudiant en chimie chez Duparc à Genève, et deux Bessards L.A. de Peyreleau et Nougine père. Ils installent leur potence au bord du gouffre mais leur descente reste bloquée à nouveau à 4 m au dessus du lac à cause du CO₂. Ce n'est qu'en juillet que Berthoule peut enfin descendre jusqu'au lac. Il répètera cette exploration encore trois fois : août et novembre 1892 puis encore en août 1893.

La cote du lac est établie à 1 242 m, soit 45 m au-dessus du Pavin, ce qui confirme les relevés précis de Chevalier. La cavité est mesurée, elle fait 60 m par 40 m. Les eaux du lac sont

profondes de 9,5 m, et Martel y mesure 1,2°C (Martel, 1892). Berthoule est le premier à établir, sur 4 mesures, la constance de la température de l'eau autour de 2°C, alors que celle de l'air, à l'extérieur du gouffre, peut varier sur plus de 30°C (Gautier et Bryant, 1896). Cette moyenne est d'au moins 2 °C plus basse que la moyenne annuelle en surface du gouffre. Il signale encore que le 10 août 1893, il atterrit sur « *une montagne de neige... qui recouvre l'îlot central* ». Enfin, il remarque sur la voute une « *tache phosphorescente* » de 12 m², jusqu'ici restée inexpliquée : « *autant de problèmes étranges posés par le Creux-de-Soucy* » (Martel, 1892). Le lac du Creux de Soucy est classé comme « polaire » par Delebecque (1898), un type thermique seulement rencontré au dessus de 3 000 m en France. Sa régulation thermique, qu'on peut qualifier de sténothermie, est vraiment exceptionnelle si on la compare aux régimes thermiques connus (Touchard, 2002).

Après cette période, pendant laquelle de grandes fluctuations de la couche riche en CO₂ - elle peut atteindre l'oculus - sont remarquées, le Creux de Soucy passe du statut de lieu redouté à celui d'objet scientifique et d'attraction spéléologique. Dans les années 1960, il fait l'objet de relevés précis par Michel Bakalowicz du spéléo-club de la faculté des sciences d'Orsay (Bakalowicz, 1971). Le futur hydrogéologue karstique du CNRS complète ainsi la description du site et du lac : (i) il y a une double alimentation par la neige et la pluie, et par une nappe souterraine à la limite de la coulée et des sédiments détritiques sous-jacents, qui ressort de la cavité à un rythme de 2 à 3 m³/h, (ii) le marnage annuel à interannuel du lac est très prononcé et peut atteindre 8 m, (iii) la cavité est une glacière naturelle : l'eau y reste à une température constante de 1,8°± 0,3°C en toutes saisons, sans que le lac ne gèle jamais, (iv) la teneur en CO₂ dans la cavité fluctue autour de 2 % entre 1965 et 1967, (v) la communication avec le Pavin, déjà mise en doute par Lecoq et par Martel, est impossible au vu du pendage des couches orientées au Sud vers le Montcinéyre.

En ce qui concerne la biodiversité de Creux de Soucy, les travaux de Gautier et Bruyant (1896) et d'Omal (1967) ne signalent rien de particulier à part l'abondance très élevée de la diatomée *Asterionella formosa* Hass, de la présence

du rotifère *Notholca longispina* Kell. et du copépode caractéristique des milieux souterrains, *Diacyclops languidoïdes* Lilljeborg. Ils remarquent aussi que, dans ce lac plongé dans une obscurité complète, la production primaire est très limitée.

Le Creux de Soucy n'est pas encore totalement exploré. Le Groupe spéléologique d'Auvergne (GSA) visite et assure l'entretien du Creux de Soucy depuis plus de quarante ans (Olivier Pigeron, com.pers., 24 février 2011). Il a trouvé et exploré progressivement une galerie oblique partant du fond du lac avec un pendage à 80°. En 1999, le plongeur André Fromant y atteint la profondeur de 43 m sous la surface de l'eau, ce qui correspond à peu près à la cote du plan d'eau du Pavin. Les dernières plongées de 2010 montrent que la galerie se prolonge au-delà de la cote - 46 m ; les films bactériens recueillis sont en cours d'analyse par les scientifiques. Les observations du marnage du lac par le GSA donnent 3 m. La température de l'eau peut descendre jusqu'à 0,5°C mais n'excède guère 2°C. La population de chauves souris y est suivie régulièrement. L'origine exacte de cette cavité reste inconnue.

Le Creux de Soucy est un site unique qui n'a pas encore révélé tous ses mystères plus de cent ans après la première exploration par Martel, Berthoule et Delebecque.

4. L'histoire mouvementée du Pavin et les éruptions limniques : un débat ouvert

La nouvelle en 1986 du dégazage brutal du lac-maar Nyos, au Cameroun, qui a fait 1 700 victimes humaines, a été une surprise totale chez les limnologues et les volcanologues du monde entier, même si les effets de catastrophes similaires avaient été rapportés sur deux autres sites. Aussitôt le débat fut ouvert et dure encore : d'autres lacs-maars également méromictiques peuvent-ils ainsi se dégazer donnant lieu à ce qu'on appelle désormais des « éruptions limniques » ?

Au Pavin, comme pour d'autres lacs-maars méromictiques, cette question est depuis lors prise au sérieux par les autorités, passionne les médias et, parfois, enflamme la communauté scientifique. Nous comparons ici des sources de nature très différentes : des nouvelles observations

paléosédimentologiques tant dans le Pavin qu'aux alentours de celui-ci, les témoignages sur l'éruption de Nyos notées, les descriptions faites par les naturalistes sur les lacs de Monticchio vers 1800-1820, les observations de 1566 à 1831.

Ceci nous amène à émettre ici la question suivante : **le Pavin a-t-il déjà eu par le passé (XIV-XVII^e siècle ?) une activité de dégazage récurrente allant peut-être jusqu'à l'éruption limnique ?** Cette hypothèse éclaire les risques actuels différemment et nous amène aussi à analyser sous un jour nouveau les premiers miracles de Vassivière (1547-1609).

4.1. Nouvelles données scientifiques sur la stabilité de la zone du Pavin

Depuis 2005, plusieurs événements géologiques passés de type catastrophique ont été mis en évidence et exposés au colloque de Besse en 2009 ; ils remettent en cause l'impression de stabilité du Pavin acquise sur le court terme depuis un ou deux siècles :

- (i) des coulées de boue découvertes vers 2005 dans le thalweg de la Couze Pavin allant du Pavin jusqu'au-delà de Besse par Pierre Lavina et Thierry Del Rosso (Lavina, Del Rosso, 2009 ; Del Rosso, 2010). Les coulées sont datées à 730 et à 2460 BP par le ¹⁴C sur différents niveaux de tourbe, elles sont interprétées comme déclenchées par des surverses catastrophiques du lac.
- (ii) Il existe au fond du lac, la trace d'un grand glissement très ancien daté à 616 ± 21 après J.-C., découvert par carottages et par cartographie sismique. La base de ces carottes est par ailleurs datée à 6971 ans BP ce qui correspond à la datation la plus précise de la mise en eau du lac (Chapron, 2010).
- (iii) Un second glissement de sédiments subaquatiques est observé par bathymétrie multifaisceaux, sur les flancs et au centre de la cuvette du Pavin (Stebich *et al.*, 2005). Un travail plus récent (Chapron, 2010) place cet événement environ avant l'an 1300, une période synchrone avec la datation de la plus récente coulée de

- boue de la Couze Pavin.
- (iv) Enfin des émanations de CO₂ sont mises en évidence par Lavina et Del Rosso (2009) aux alentours du Pavin ; elles sont parfois élevées comme au lieu-dit de l'Escarot au pied de Vassivière, ainsi que le confirme une étude du BRGM.
 - (v) Le dégazage du CO₂ de la région Pavin-Montchal peut être variable. Nous avons vu qu'au Creux de Soucy, on a observé de larges fluctuations des niveaux de CO₂ depuis 150 ans, en partie liée à des fluctuations de pression atmosphérique. En reconsidérant les travaux d'Olivier et les observations de Pelletier sur la chimie du monimolimnion entre 1962 et 1968, l'existence et/ou la stabilité du monimolimnion, donc du stock de CO₂ du Pavin avant 1962, peut être questionnée.

Le Pavin et sa région sont donc beaucoup moins stables qu'on ne le croyait jusqu'à il y a dix ans, ce qui implique une surveillance renforcée et une recherche maintenue.

4.2. Les éruptions limniques contemporaines (Nyos, 1986, Monticchio, 1800-1820)

4.2.1. Nyos (Cameroun)

Dans la nuit du 21 août 1986, plus de 1 700 personnes et un grand nombre d'animaux périrent asphyxiés par la nappe de CO₂ se répandant depuis le lac-maar de Nyos dans les vallées situées en contrebas. Les équipes de chercheurs du monde entier furent dépêchées aussitôt sur place, dont celle de François Le Guern du CFR (Centre des faibles radioactivités) de Gif-sur-Yvette, à l'initiative de Renaud Vié le Sage alors en charge des risques naturels.

Les recherches sur Nyos sont synthétisées lors d'une conférence internationale à Yaoundé en 1987, publiée dans un volume spécial du Journal of Volcanic and Geothermal Research (Le Guern et Sigvaldason, 1989, vol 39). Jean Claude Sabroux y propose le terme d'*éruption limnique* (Sabroux, 2007). D'après cette synthèse (Sigvaldason, 1989) et les observations directes de François Le Guern

et de Jean Claude Sabroux rapportées au colloque de Besse en 2009, les caractéristiques de l'éruption limnique de Nyos, rapportées par ses témoins, portent sur les points suivants :

- (i) *Tempête*. La surface du lac bouillonne de jets d'eau. Au vu des traces d'érosion remarquées sur les rives, ils ont atteint 80 m. Deux jours après la catastrophe, des vagues de plusieurs mètres sont encore observées.
- (ii) *Atmosphère environnante*. Le dégazage du CO₂ profond entraîne la mort des oiseaux, des animaux et des hommes situés sur le passage de la nappe de gaz.
- (iii) *Qualité de l'eau et de l'air*. L'eau de Nyos est devenue de couleur rouille en raison de sa teneur élevée en hydroxyde ferrique contenu dans les eaux profondes ramenées en surface. L'air ambiant a une odeur de soufre caractéristique
- (iv) *Tonnerre et éclairs*. D'après F. Le Guern, Rose-Marie Chevrier, professeur de chimie des eaux au CNAM, observe 48 heures après la catastrophe, des « *grondements de tonnerre* » et « *un éclair bref accompagné d'un jet lumineux blanc* ». D'autres témoins camerounais attestent de « *coups de fusil* », ce qui peut être expliqué par la détente à 20 m/s du CO₂ (J.C. Sabroux, 2007).
- (v) *Flottabilité*. La flottabilité est très réduite en raison de la faible densité de l'eau dans la colonne de bulles qui peut descendre à 0,1 (J.C. Sabroux, 2007).
- (vi) *Perte de vue des riverains*. Chez de nombreux survivants de la catastrophe, on a observé une perte momentanée de la vue, peut-être due à une inflammation oculaire liée au dégazage (Sigvaldason, 1989), à moins qu'elle ne soit liée au « *jet lumineux blanc* » observé par R.M. Chevrier.
- (vii) *Poissons*. En raison de l'absence d'oxygène dissous après l'éruption, on observe une mortalité massive des poissons. « *Avant la catastrophe c'était un lac déserté par les poissons...* ». (Sabroux, 2007)
- (viii) *Cultures*. Les cultures dans les vallées sont totalement « grillées » et/ou détruites par le souffle de la nappe de gaz. Ce dommage est comparable à celui causé par la « grêle » cité par Jouan et par Münster.

4.2.2. Monticchio (Basilicate, Italie du Sud)

Examinons maintenant les observations directes des éruptions limniques de Monticchio en Italie en 1800-1820, mais qui n'ont été reconnues comme telles que très récemment par quelques volcanologues italiens (Chiodini *et al*, 1997 ; Caracausi *et al*, 2009).

Les deux lacs de Monticchio (Piccolo et Grande), situés dans le cratère du Mont Vulture, sont moins profonds que le Pavin (38 et 36 m). Leurs rives sont parfois abruptes. Tous deux sont actuellement méromictiques et le CO₂ est également présent en-dessous de 15 m de profondeur à 5,5% et 7,5% de saturation. Une augmentation de température au fond du lac est également observée : elle est beaucoup plus forte qu'au Pavin (+1,1°C/10 m sur plusieurs dizaines de mètres). D'après les chercheurs de l'Institut de géophysique et de volcanologie de Palerme, le CO₂ est nettement d'origine mantélique et non biologique.

Les observations scientifiques à Monticchio sont anciennes et datent déjà de 1770 (Abbé D. Tata). En 1838, Tenore, le directeur du Jardin botanique de Naples, et Gussone effectuent un inventaire scientifique du Mont Vulture. Celui-ci a été transcrit et annoté par Ciarallo et Capaldo (1995). Ils font état d'une source bouillonnante et même jaillissante en reprenant les observations d'un témoin, le père Paolino Tortonella, au bord du lac et d'une eau de goût et d'odeur très spéciale : « *le phénomène le plus curieux que l'on pu jamais admirer dans des lacs volcaniques semblables, vint combler l'observateur autant d'émerveillement que de plaisir. L'énorme source jaillit là depuis le fond du lac (Piccolo), à tel point qu'un **bouillonnement incessant** agite et mélange toute la masse de la surface de l'eau. En même temps il y a un gros gargouillis de l'air, dont Brocchi a fait l'analyse correcte qui montre que cela provient du gaz hydrogène soufré et de gaz carbonique...* (Lors d'un autre voyage) *des naturalistes romains avaient vu l'air s'enflammer et senti l'odeur pénétrante du soufre*. Plus loin : *A cause de cette activité considérable **tous les poissons du Petit Lac mourraient*** » (souligné par nous ; traduction de C. Siroux).

En 1852, Luigi Palmeri et Archangelo Scacchi publient une monographie sur la géologie du Mont Vulture et signalent à leur tour la source bouillonnante, mais non plus jaillissante. La synthèse et l'interprétation de ces relations n'est faite qu'après la catastrophe de Nyos par les

spécialistes de l'INVG, l'institut de surveillance des volcans en Italie, le premier au monde.

Chiodini *et al* (1997) analysent les observations ainsi : « *une série d'émission gazeuse s'est produite au lac Piccolo du 1^{er} au 23 juin 1810 et encore le 31 juillet. Une crue (flood) le 31 mai a probablement déclenché la première série décrite comme **une pyramide d'eau de courte durée s'élevant à 5,5 m** ... Le 31 juillet un **grondement profond et fort** a été perçu pour la première fois par les gens du coin. En acceptant la fiabilité de ces chroniques ces événements pourraient être des éruptions limniques d'un gaz constitué principalement de méthane.* »

A leur tour, Caracausi *et al* (2009) considèrent que ces lacs ont eu des éruptions limniques jusqu'en 1800-1820, et en font l'analyse suivante (original en anglais) :

« *Il y eut des éruptions limniques (gas bursts) dans les deux lacs de Monticchio jusqu'à il y a deux cents ans, ce qui indique qu'elles ont un caractère récurrent même si les intervalles de temps n'ont pas été constants. Une activité paroxystique s'est produite le 1^{er} juin 1800 quand une colonne d'eau de 6 m de haut s'est formée dans le Lago Grande. Un nouvel événement a été observé deux mois plus tard, le 31 juillet, quand un grondement intense a été entendu ; la colonne d'eau a alors atteint une hauteur de 3 m. Dix ans plus tard un événement paroxystique similaire s'est produit au Lago Piccolo. Les fontaines d'eau y atteignirent une hauteur de 5 m. Il n'y a pas eu de pertes humaines mais de nombreux poissons morts furent trouvés à terre, à plusieurs mètres de la rive, témoignant de la **nature explosive du gaz** pendant cet événement* » (traduction et soulignage par nous-même).

On retrouve bien à Monticchio plusieurs caractéristiques de l'éruption limnique de Nyos : fontaines d'eau, grondement intense, mortalité de poissons. En revanche, Tenore et Gussone ne mentionnent pas de pertes humaines dans cet endroit retiré qui ne comprend à l'époque aucun riverain dans un rayon de plusieurs kilomètres, à l'exception du monastère de San Michele situé à 80 m au-dessus du lac Piccolo, sous le mont du même nom. Au début du XIX^e siècle, ces phénomènes sont décrits comme « **merveilleux** », de la même façon que le Pavin est décrit de 1575 à 1804.

4.3. Le dégazage passé et les légendes du Pavin

En comparant le récit de Jouan (1566), la description de Münster (1544, pour la première édition en allemand, 1628 pour la dernière

édition), le Manuscrit Godivel vers 1650, les « croyances locales » rapportées avec force détails par le Chanoine Audigier (vers 1720), Legrand d'Aussy (1788), l'Abbé Delarbre (1798), Prudhomme (1804), et Lecoq (1835), avec les observations des éruptions limniques de Nyos et de Monticchio, comment ne pas être frappé par une concordance très forte entre les trois sites : fontaines d'eau et tempête déclenchées par des pierres « jetées avec force » (Prudhomme), tonnerre et éclairs, absence d'oiseaux, eau riche en fer, absence ou mortalité des poissons, exhalaisons, brouillards, absence de flottabilité des bateaux (le premier fut amené par Lecoq).

La description du Pavin par Sébastien Münster, le grand humaniste Bâlois, vers la moitié du XVI^e siècle - voir section 2.1 - dans sa *Cosmographie Universelle* qui couvre tous les continents et traduite en cinq langues, est particulièrement précise et édifiante. La présence du Pavin dans cet ouvrage, presque autant lu de 1554 à 1628 - date de sa dernière édition - que la bible, atteste de la renommée extraordinaire du lac chez les érudits de cette époque.

Il est donc très vraisemblable que le Pavin ait eu jusqu'à la fin du XVII^e au moins une activité de dégazage récurrente, plus ou moins forte, rapportée par des témoignages très précis puis transmise de générations en générations. Ceci doit amener à une ré-analyse approfondie des « légendes du Pavin ». En 1925, Eusébio, directeur de la Station biologique, et Reynouard, érudit local et ancien maire de Besse, produisent en effet un guide très documenté du touriste et du naturaliste consacré au lac Pavin dans lequel ils distinguent la « légende des tourbillon et tempêtes » et celle de la « ville engloutie ».

La « légende du tourbillon et de la tempête », particulièrement développée par Lecoq, nous apparaît ainsi comme un corpus de récits faits par des témoins, de phénomènes qualifiés tantôt d'*ordinaires* (Jouan), d'*admirables et épouvantables* (Fodéré, in Domaïron), de *merveilleux* (Münster). A la fin du XVIII^e siècle, les symptômes d'activité de dégazage avaient sans doute disparu au Pavin puisqu'ils n'ont été rapportés ni par Domaïron en 1760 ni par Chevalier en 1770 ni par les naturalistes visiteurs du Pavin, mais ces phénomènes, terrifiants ou merveilleux, marquaient encore fortement la mémoire collective. Les esprits rationnels de Delarbre et de Lecoq ne pouvaient croire en leur

existence, encore moins imaginer le processus qui en était la cause, seulement décrit en 1987. Ainsi Legrand d'Aussy et Delarbre essaient d'expliquer les grondements et coups de tonnerre entendus par le craquement de la glace en hiver ou par l'écho des rives du lac après un coup de fusil mais ils ne proposent aucune explication pour les autres phénomènes. En 1833, Eugene Scribe, bientôt à l'Académie Française, se distrait de ses chagrins en visitant l'Auvergne. Depuis le « Mont d'Or », son guide Michel Garnier l'emmène au Pavin, « *ce lac mystérieux et magique sur lequel personne n'oserait s'aventurer, car à l'instant ses eaux tournoyantes auraient fait chavirer la barque...* » : en fait une description fameuse dans sa nouvelle, *Le Roi de carreau* (Scribe, 1910). Mais déjà l'esprit cartésien s'oppose à ces récits.

Lecoq, lors de sa première visite au Pavin à partir du Mont d'Or en 1831, n'observe aucun de ces caractères « merveilleux », ni lors de ces visites successives, il les réfutera donc en bloc. En 1871, dans sa remarquable monographie sur les eaux du Massif central, il parlera de « *légendes inventées par la peur et transmises par la crédulité* ». Pour l'ensemble de la communauté scientifique et des autorités, jusqu'à aujourd'hui, c'est dès lors le qualificatif qui est utilisé. En 1898, le guide Michelin d'Auvergne cite dans sa description du Pavin la « légende » détaillée du tourbillon et de la tempête telle que rapportée par Lecoq et Scribe.

« Ville engloutie », « pierre au trésor » et développement touristique du Pavin

A partir de la fin du XIX^e siècle se développe une autre légende, celle de la « ville engloutie ». En effet, au tournant du XIX^e siècle, on remarque aussi un nouveau développement des légendes du Pavin par des érudits locaux comme A. Berthoule, maire de Besse qui utilise un des premiers la légende de la cité engloutie, *nouvelle Sodome* (Berthoule, 1896), des conteurs et des romanciers, tels que, H. Pourrat, P. Bourget qui développent l'aspect terrifiant, voire maléfique du site, en rajoutant ici un château et des bacchanales, là une ville entière engloutie. Les légendes favorisent aussi le développement touristique du lac qui vient de s'ouvrir aux visiteurs grâce à la construction par la ville de Besse, en 1909, du chemin de ronde, avec l'aide financière du Touring Club de France (La Montagne d'Auvergne, 1910).

La Station biologique de Besse, fondée à la fin du XIX^e siècle par le Pr Paul Girod de la Faculté des sciences de Clermont-Fd, «puissamment aidé» par A. Berthoule, maire de Besse mais aussi limnologue érudit et pisciculteur, *pour attirer les naturalistes dans cette région, vierge hier encore*, (Eusebio, 1896) joue aussi un rôle dans la promotion du Pavin et des lacs des environs. En 1910, elle est dirigée par C. Bruyant qui la présente à son tour comme «fondée par J. Reynouard», maire de Besse à l'époque (Bruyant, 1910). Il semble donc que l'essor touristique de Besse ait été intimement lié au Pavin et aux scientifiques dès cette époque.

Roux-Parassac (1874-1940) est poète, écrivain, journaliste et surtout l'infatigable promoteur des vallées des couzes Chambon et Pavin. Il est ainsi rédacteur en chef de La Montagne d'Auvergne (1910), revue publiée à Issoire et soutenue par les syndicats d'initiative de ces vallées où le tourisme commence à se développer. Il écrit la même année un petit guide bien illustré (Roux-Parassac, 1910), destiné au touriste en automobile. Cet ouvrage et la revue jouent ainsi un rôle important dans la promotion du site du Pavin. La légende du Pavin, «lac d'épouvante» y est développée en restant dans le registre du tourbillon et de la tempête, y mêlant Lucifer et les larmes de l'Eternel, à l'origine du lac.

C'est Reynouard lui-même qui se charge dans La Montagne d'Auvergne (28 Août 1910, pp. 1-4) de la promotion des légendes en y rajoutant la ville engloutie et le clocher de la ville morte. Il signale que Rico chercha bien le clocher mais ne le trouva point. En revanche, les pêcheurs y découvrent sur la rive ouest une «pierre cylindrique extraordinaire» par 2 à 3 m de profondeur : «dès lors le batelier ne manqua pas, lorsqu'il promenait les touristes sur le lac, de leur faire voir, à défaut de la ville engloutie insaisissable, du moins la fameuse **pierre au trésor**, très visible et très déconcertante », il en fit un relevé très précis, voir figure 3).

Cette pierre remarquable fut enfin retirée du lac lors du creusement du chemin de ronde en 1909 : elle fait 70 cm de diamètre, 54 cm de haut et pèse environ 300 kg (Reynouard, 1910). On découvrit également en plusieurs points, généralement près des sources d'alimentation, un certain nombre de pierres taillées, la plupart

brisées, de forme cylindrique. Eusebio et Reynouard (1925), dans leur guide du Pavin et du Creux de Soucy, les décrivent comme étant des meules et en donnent une localisation précise (figure 3). La Pierre au Trésor, en roche volcanique, avait donc une notoriété certaine il y a un siècle. Entreposée depuis 1909 à la mairie de Besse, elle a été oubliée jusqu'en 2010. Depuis 2011, elle est exposée au Pavin. Il semble qu'elle ne figure pas non plus dans les inventaires archéologiques du Puy-de-Dôme.

D'après Eusebio et Reynouard, la « légende de la ville engloutie » pourrait être liée (i) au « pavage naturel », lié aux roches basaltiques immergées trouvées sur le pourtour du lac, déjà signalé par Domaïron, et surtout (ii) à cette « *pierre au trésor* ». Aucune explication récente n'a été donnée à ces objets qui ont marqué les esprits de l'époque.

Pour Thierry Del Rosso, dans sa communication sur les légendes du Pavin au colloque de Besse de 2009, la légende de la « ville engloutie » pourrait être aussi liée à l'importante coulée de boue découverte par P. Lavina et lui-même dans la Couze Pavin datée de 730 ans BP. Il faut remarquer qu'une telle coulée pourrait aussi être générée par un orage catastrophique comme il s'en observe de temps en temps dans le massif du Sancy, dans la Couze Chambon par exemple (Equipement du Puy-de-Dôme, 2008).

Dans son analyse des risques naturels dans laquelle il traite des légendes du Pavin, Philippe Reyt (2000, 2002), spécialiste de la géographie des risques naturels, mélange celle du Tourbillon et la tempête et celle de la ville engloutie : « *quiconque s'approche du lac Pavin en entendant la cloche est happé par un tourbillon* ». Il a répertorié cette légende de la Ville engloutie dans une quinzaine d'autres lacs en France dont les lacs-maars de Servières, Bouchet, Tazenat et l'attribue « *au mythe de Sodome et Gomorrhe qui donne un sens et une dimension aux paysages lacustres* ». Pour les autres lacs de cratères, on peut avancer ici une hypothèse différente : les phénomènes observés au Pavin étaient si terrifiants qu'un pouvoir maléfique identique leur a été attribué, ainsi à la Godivelle d'En-Haut ou au volcan de Bar (Ardèche), comme signalé par Annette Lauras-Pourrat (1989). De plus, certains de ces lacs pouvaient être méromictiques : la même auteure rapporte que l'eau retirée du lac du

Bouchet avec une corde et une marmite était « retirée pleine de sang » ; Lecoq (1871) y signale donc les « mêmes superstitions qu'au Pavin » concernant le Tourbillon et la tempête.

La légende du Tourbillon et de la tempête, qui a duré un à deux siècles, est aujourd'hui complètement occultée et remplacée par celle de la ville engloutie. Très répandue par les médias et les autorités (Cassan, 1998), elle figure aujourd'hui sur les bornes d'information offertes aux visiteurs sur le sentier du tour du lac. L'avis général de la communauté scientifique et des autorités suit celui de Reyt : « Il s'agit tout simplement, extraite de la Bible, de la transposition auvergnate du mythe de Sodome et Gomorrhe » (PNRVA 2004).

L'Auvergne maintient d'autre part depuis 450 ans une foi très ancrée dans un deuxième corpus de croyances locales, les « miracles de Vassivière » qui se produisent dans la région du Pavin à partir de 1547. La comparaison des légendes, des miracles et de certaines observations faites à Nyos, suggèrent que les deux corpus de croyances pourraient être deux représentations des phénomènes inexplicables liés au Pavin. Certains contes locaux font d'ailleurs la relation entre Pavin, Vassivière et Creux de Soucy.

4.4. Les premiers miracles de Vassivière (mi-XVI^e siècle) sont-ils en relation avec des éruptions limniques ?

Le site de Vassivière est situé en pleine montagne sur une petite hauteur à moins de 3 km en amont du Pavin sur le chemin reliant, au Moyen Âge, Besse et La Tour d'Auvergne (figure 1). A côté d'une source proche du sommet, donc exceptionnelle, un petit oratoire marial est installé dès le XIV^e siècle au lieu-dit le *Seignadou*, l'endroit où il convient de se signer (Ajalbert, 1896). Une série de miracles, intervenus à partir de 1547, sont attribués à cette Vierge de Vassivière. Une chapelle est alors édifiée très rapidement, de 1550 à 1555, et un pèlerinage marial est organisé. Le pèlerinage devient un des plus fréquentés de tout le Massif central : la procession réunit depuis, chaque année, les fidèles qui accompagnent au printemps la Vierge, de Besse à Vassivière et retour à la fin de l'été. En 1608, elle réunit 6 000 fidèles (Ajalbert, 1896 ; Pourreyron, 1935). On peut se demander l'origine d'une telle dévotion

dans un endroit aussi isolé à l'époque, aujourd'hui très proche de la station de Super-Besse.

Les tout premiers miracles sont soigneusement recensés en 1609 par un notaire de Besse et détaillés par le père Coissard en 1615, puis remis à jour par Jacques Branche en 1647. Dom Cladière (1837), un anonyme ecclésiastique (1910) et surtout Pourreyron (1935) les rapportent avec précision et dans l'ordre chronologique, depuis 1547, dans leurs monographies sur les pèlerinages du diocèse de Clermont. Nous n'analysons ici que le corpus des premiers miracles d'avant 1608. Certains font référence à des phénomènes météorologiques et limniques proches du corpus du Tourbillon et de la tempête décrit au Pavin, d'autres font état de dommages corporels très semblables à ceux relevés après la catastrophe de Nyos :

- (i) le miracle fondateur du site de Vassivière est relaté de façon extrêmement précise avec le lieu, la date, la personne, la nature du miracle : « *en juin 1547 quelques marchands de Besse allant aux foires de la Tour suivent le chemin qui, à travers la montagne, passe tout près de Vassivière. Ils s'arrêtent devant l'image vénérée pour lui rendre hommage. L'un d'entre eux toutefois se tient à l'écart... Pierre Guelf continue sa route et arrive au ruisseau qui, tout proche de là, coule au fond d'un ravin ; mais arrivé à cet endroit, il ne peut plus aller plus loin. Soudain il a perdu la vue. Ses compagnons s'empressent autour de lui, essayent de le secourir mais en vain. Pierre comprend, revient sur ses pas jusqu'à l'image de Notre Dame et là, dans un mouvement de foi et repentir, il crie sa misère, avoue sa faute et promet de réparer. Aussitôt il voit.* » (Pourreyron, 1935).
- (ii) d'autres miracles d'avant 1608 font état que le « *malin esprit est exorcisé dans une tempête de tonnerre et d'éclairs où le temps s'est remis au beau* » (Ajalbert, 1896).
- (iii) ailleurs, l'enquêteur ecclésiastique rapporte que « *la puanteur ensouffrée de l'air demeura prou au nez de plusieurs personnes* » (relaté par Jean Cladière, in Ajalbert, 1896).
- (iv) Beaucoup des premiers miracles concernent des pertes simultanées de

vue, d'ouïe, de parole et des perclusions multiples (Dom Cladière 1837, chap.V et VII).

Dès lors que la Vierge de Vassivière acquiert son pouvoir miraculeux, d'autres miracles, qui n'ont aucun lien avec le Pavin, sont aussi relatés.

Le miracle fondateur de Vassivière se produit alors que le Pavin est déjà décrit par Münster (voir section 2.1) comme effroyable, avec tous les signes d'activité observés à Nyos.

Les similarités entre certains de ces premiers miracles de Vassivière, les descriptions du Pavin de cette époque (Jouan, Godivel) et les « histoires du vieux temps » relatées ultérieurement par de très nombreux auteurs sont grandes : des phénomènes identiques se produisent au même lieu (entre Besse et Vassivière) et à la même époque. Ils ont en commun le tonnerre, les éclairs, l'odeur de soufre. Les pertes/recouvrement de vue, d'odorat, les perclusions sont aussi signalés à Nyos en 1986 (Leguern et Sigvaldason, 1989).

D'après Philippe Reyts qui étudie les risques naturels sous l'angle de la géographie culturelle à l'université de Saint-Etienne : « *par les fêtes périodiques, la société analogique entretient une conscience collective du risque avant son occurrence, là où la société rationaliste se laisse surprendre et n'entreprend d'expliquer le phénomène qu'a posteriori, moins dans le but de l'intégrer que de panser ses plaies* ». Il cite de très nombreux exemples de processions destinées à panser ces plaies, sécheresses extrêmes ou crues de fleuves, voire avalanches (Reyts, 2000 et 2002). On peut se demander si l'établissement du pèlerinage ne serait pas ici une mise sous protection de la Vierge de la zone Vassivière-Besse à une époque où elle était effectivement dangereuse. Le lien entre Pavin, Vassivière et Soucy est présent dans un conte de veillée, évoqué plus loin.

Dans l'hypothèse d'éruptions limniques ordinaires du Pavin, de leurs manifestations merveilleuses, de leurs dommages aux récoltes et aux populations, il semble nécessaire de réexaminer le Pavin et sa zone, de Vassivière aux Fraux, d'une façon transdisciplinaire.

4.5. Vers une analyse transdisciplinaire du Pavin

Thierry Del Rosso a été le premier à considérer que « *l'analyse des légendes du Pavin conduit à leur attribuer une grande valeur patrimoniale... dans des domaines variés : sciences, histoire, archéologie, ethnologie* » (2009). Cette opinion, bien peu partagée au colloque de Besse, nous semble de plus en plus fondée. L'analyse historique de la zone du Pavin doit être reprise et complétée par des recherches en sciences humaines qui viendront en complément de celles pratiquées à ce jour sur le Pavin par les chimistes, les physiciens, les microbiologistes et les géologues.

Pour y contribuer, nous donnons ici un récit de veillée lié au pèlerinage, au Pavin et au Creux de Soucy, et non relevé par Eusébio et Reynouard (1925). Il était encore conté en 1930-40 dans notre famille à Egliseneuve d'Entraigues, commune située à quelques kilomètres du Pavin.

« *Vingt quatre enfants partaient de Besse en pèlerinage à Vassivière. En chemin (là où se trouve le Pavin ?) ils rencontrent un petit homme noir monté sur un cheval, qui les invite à monter derrière lui. Comme ils étaient fatigués, ils montent mais le dernier de la file s'aperçoit que le cheval s'allonge au fur et à mesure, alors il fait le signe de croix. A ce moment le cavalier éclate d'un rire terrifiant en disant « Sans ton nomme patri (le signe de croix) j'en emportais vingt quatre ». Le cheval frappe la terre de son sabot en soufflant du feu et la terre l'engloutit. Le trou qu'il fait, c'est le Creux de Soucy* ». (Rapporté par G. Mouillaud-Fraisse, maître de conférences à l'université d'Aix-Marseille, qui le tient de sa tante Marie Maret-Papon). La phrase du diable était en patois auvergnat que le témoin ne sait transcrire. On note l'importance du signe de croix, déjà rencontré au site de Vassivière.

De nombreuses questions demeurent en suspens : (i) pourquoi la zone autour du Pavin comprise entre le Montcineyre et le Gelat (montagne des Fraux) a fait l'objet dès 1208 et 1270 de « très curieuses franchises » (Jaloustre, 1884) ; elle ne comporte pas de fermes sur les cartes précises du début du XIX^e siècle, est-ce une absence de peuplement, comme au lac Nyos, en raison de craintes suscitées par la zone du Pavin ? (ii) quelle est l'origine des toponymes Montchal, Fraux, Pavin et Gelat ? (iii) pourquoi existait-il un oratoire, le Seignedou, à Vassivière au XIV^e siècle. Comment les miracles ont-ils été exactement recueillis ? (iv) comment le Pavin, une curiosité

auvergnate célèbre depuis le XVI^e siècle au moins, est-il présenté dans d'autres écrits que la Cosmographie Universelle de Münster, le manuscrit Godivel et le récit d'Abel Jouan? (v) d'après le manuscrit du Chanoine Audigier en 1720, le père jésuite Athanasius Kircher (1602-1680), le grand savant du XVII^e siècle, cite le Pavin et lui attribue aussi « tourbillon et tempête » : lequel, parmi ses 730 correspondants, lui a communiqué cette description ? A-t-il seulement repris la description antérieure de Münster ? (vi) qu'elle est l'origine, l'âge et la fonction de la *pierre au trésor* trouvée dans le lac et conservée à la mairie de Besse, possiblement à l'origine de la légende de la ville engloutie ? (vii) les coulées de boues de la Couze Pavin, datées de 730 ans BP, le glissement de sédiment observé dans le lac daté d'avant 1300, la possible surverse et/ou dégazage sont-elles liées à un séisme comme celui qui s'est produit en Limagne vers 1250-60 ?

Sur le lac Nyos, de telles recherches ont été prises au sérieux par la communauté des volcanologues et publiées dans leur synthèse (Le Guern et Sigvaldason, 1989). Une recherche approfondie sur les légendes locales a été menée sur le terrain, après l'éruption, par Eugenia Shanklin, anthropologue américaine formée à Princeton. Elle analyse les légendes et mythes locaux transmis oralement : ils parlent effectivement de lacs maléfiques, d'eaux dangereuses et destructrices, et mettent également en évidence que l'installation des populations autour de Nyos n'a été que récente, au XIX^e siècle (Shanklin, 1989).

Les sciences naturelles et l'étude des risques ont déjà fait appel aux sciences humaines avec un impact inattendu dans notre région. La reconstitution des séismes historiques de 1490 et de 1590 a été faite par Francine Mallot (1995), d'après les archives ecclésiastiques, à la demande du BRGM. Cela a finalement abouti à l'abandon d'un projet de centrale nucléaire, en raison des surcoûts liés à la sécurité. Les archives ecclésiastiques de Besse, ville très religieuse, contiennent-elles aussi des mentions du lac Pavin ?

5. Quel avenir pour les lacs d'Auvergne ?

Le lecteur aura sans doute été convaincu du caractère très particulier des lacs de la région du Pavin et du caractère unique de certains d'entre eux comme le Pavin lui-même, le Creux de Soucy, voire le Chambédaze et la Godivelle d'En-Haut. Cet ensemble a, sur bien des critères, histoire des sciences, biodiversité, état préservé des milieux et du paysage, risques potentiels, culture, tourisme, une valeur patrimoniale qui dépasse largement le niveau régional pour atteindre un niveau européen.

Le futur de ces lacs est envisagé ici sous trois angles : les risques de dégazage, le maintien des recherches scientifiques sur le Pavin et ses voisins, la conservation concertée de cet ensemble limnique.

Prise en compte d'un risque dégazage

A la suite de la catastrophe de Nyos en août 1986, le Délégué aux risques majeurs (R. Vié le Sage) s'émeut et commande à plusieurs équipes scientifiques une étude des risques de dégazage. Cette étude pluridisciplinaire pilotée par le Laboratoire de volcanologie de Clermont-Fd est réalisée en 1987 (Camus *et al*, 1993). Elle conclut que « *le Pavin ne présente aucun danger limnique du fait qu'il reçoit peu de CO₂ d'origine endogène, et que l'essentiel du CO₂ formé dans le monimolimnion résulte de la dismutation en CO₂+CH₄ de la matière organique formée sur place* ».

Il y a quelque siècles, le dégazage au Pavin était peut-être généré par une simple « pierre qu'on jette dans le lac » comme on pouvait encore l'observer à Monticchio jusqu'en 1820. Le risque actuel de dégazage continue d'être étudié par les spécialistes de la géochimie des eaux du Pavin : il est considéré comme nul en conditions normales. Mais il peut aussi être généré d'un seul coup par « un éboulement massif des berges du lac » (Michard, 2010) ou par des glissements de sédiments sur les pentes très fortes du cratère, c'est pour cela que la topographie du pourtour du lac est aujourd'hui très surveillée. Tous deux peuvent être générés par de forts séismes déjà observés dans la région : plusieurs séismes d'intensité entre 7 et 8 se sont produits à Issoire et à Riom entre 1490 et 1892, comme ceux qui ont détruits l'Abbaye de Mozac au XV^e siècle.

Le Pavin et sa région n'en finissent donc pas de nous interroger. Le risque de catastrophe limnique était inconnu des scientifiques il y a 30 ans, ce n'est plus le cas aujourd'hui. Ce risque, improbable en conditions normales, n'est pas nul en conditions exceptionnelles. Ainsi nos collègues volcanologues italiens qui suivent les lacs de Monticchio concluent : *« nous attirons l'attention sur les lacs de cratère situés dans des régions volcaniques qui ne sont apparemment plus actives, spécialement dans des régions peuplées touristiques où les risques gazeux sont probablement sous-estimés ou même ignorés »* (Caracausi et al, 2009). Certains chercheurs allemands évoquent également des risques volcaniques latents dans la région de l'Eifel.

Compte tenu de la catastrophe de Nyos, les découvertes récentes faites au Pavin ont alerté les autorités sur une instabilité possible des eaux du lac. Celles-ci ont fait procéder ces dernières années à de nombreux travaux de consolidation des falaises rocheuses entourant le lac, et à une surveillance topographique très précise des flancs du cratère : le Pavin est depuis lors placé sous surveillance topographique étroite. Elle doit être complétée par une surveillance géochimique au Pavin, au Soucy et dans la région Pavin. Les effets potentiels d'un dégazage soudain sur les populations, sur les visiteurs du site et sur l'environnement doivent être établis. Une surveillance en continu des eaux et des gaz du lac et un système d'alerte devraient aussi être mis en place.

Poursuite des recherches limnologiques

Les recherches très productives sur le Pavin et les autres lacs doivent se poursuivre dans tous les domaines, tant pour affiner notre connaissance des risques que pour profiter de cet ensemble exceptionnel, déjà reconnu au niveau mondial. Le Pavin est à parité avec les quelques lacs qui sont renommés dans le monde entier pour la qualité et l'historique des recherches qui y sont menées tels que : Windermere (Angleterre), Ladoga (Russie), Majeur (Italie), Tahoe et Mendota (USA). Le Pavin, le Chambédaze et même la Godivelle d'En-Haut sont cités dans les ouvrages internationaux, au même titre que le Léman et le lac d'Annecy.

Pour les spécialistes du monde entier, le Pavin est devenu un véritable laboratoire naturel. Il est important que les pouvoirs publics, du

niveau local au niveau national, en aient conscience, en facilitent l'étude et en pérennisent la conservation. Les recherches futures comprendront peut-être des directions nouvelles. Par exemple, dans le contexte du Changement Global, les lacs-pluviomètres comme les lacs-tourbières, apparaissent comme des sites exceptionnels pour étudier l'évolution des climats, des impacts humains, la pollution atmosphérique (Stebich et al, 2005). Le Pavin apporte déjà des éclaircissements sur la formation du CO₂ et du méthane, les deux principaux gaz à effet de serre.

Prise en compte de la valeur patrimoniale du Pavin et des lacs voisins

La valeur patrimoniale des lacs est difficile à établir et impossible à chiffrer. Jusqu'ici les principaux critères de classement patrimonial des milieux aquatiques ont pris en compte la biodiversité faunistique et floristique des milieux humides tels les tourbières, en excluant le compartiment microbiologique.

Les classements actuels ont été faits à des titres divers, depuis le niveau communal jusqu'au niveau national. Ils restent peu coordonnés et concernent de nombreuses administrations et institutions en charge de la protection des ressources en eau potable (DDASS, Agences de l'eau), de celles des zones humides (ZNIEFF) et de la biodiversité (Natura 2000), de l'application de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE) ou de la surveillance des lacs (Aquaref). De plus, les lacs forment les têtes de bassin de la Dordogne et de l'Allier et sont à cheval sur deux Agences de l'eau (Loire-Bretagne et Adour-Garonne) (figure 1), ce qui ne favorise ni leur visibilité ni l'harmonisation de leur gestion.

Jusqu'à présent les mesures de conservation de ces lacs ont surtout été faites à la suite d'inventaires de biodiversité (ZNIEFF, Natura 2000). Les sites sont donc classés pour leur richesse floristique et faunistique par des arrêtés préfectoraux de protection de biotope depuis 1996 et/ou mis en sites Natura 2000. Dans la réserve nationale des Sagnes de la Godivelle, 1 500 espèces ont déjà été répertoriées dont 80 sont protégées au niveau régional à européen. D'autres lacs-maars (Pavin, Chauvet, Godivelle d'En-Haut, la Fage) et le lac de la Landie sont également dans les zones Natura 2000 du Cézallier Nord, du Cézallier Sud et de l'Artense. Mais la richesse exceptionnelle en micro-organismes des eaux profondes du Pavin n'est pas

prise en compte. Néanmoins, il est classé Natura 2000 malgré les profondes modifications de sa faune originelle de poissons, mammifères et oiseaux.

Le SEQ-Lacs initié par le Ministère de l'Environnement et auquel nous avons participé (Aquascop et Gay-Environnement, 2003) prenait en compte la valeur patrimoniale des lacs. Mais il n'a jamais été mis en œuvre du fait de la directive cadre sur l'eau (DCE). Celle-ci fait maintenant obligation aux Etats-membres de faire un inventaire des lacs et de leur qualité. Notons que Delebecque considérait parfois des lacs de seulement quelques hectares alors que la DCE ne s'applique qu'aux lacs supérieurs à 50 ha, sauf dérogation. Les critères retenus par la DCE sont limités, correspondent plutôt à un usage général des lacs (eau potable, récréation, etc.) et l'oxygénation y est un critère essentiel : sur cette base, tous les lacs situés au-dessus de 1050 m (figure 1) seraient d'excellente qualité, cependant le Pavin aurait un très mauvais score en raison de l'anoxie profonde !

Le Cemagref, en charge de la sélection de « lacs de référence » au niveau national, a bien intégré dans la base Aquaref de 29 lacs, la Godivelle d'En-Haut, le Montcineyre et le Bourdouze mais laisse de côté le Chauvet et le Chambédaze, pourtant tous deux dans un état de conservation remarquable. Cent ans après les premiers inventaires de Berthoule (1890) et de Delebecque (1898), le suivi régulier des lacs d'Auvergne n'est pas encore assuré. Enfin le Creux de Soucy, bien trop petit pour la DCE, ne fait nulle part l'objet de suivi ni de classement officiels.

Mais aucune de ces approches ne prend en compte l'objet limnique lui-même dans toutes ses composantes y compris culturelle ou symbolique. Nous proposons à titre d'essai deux analyses préliminaires l'une sur la valeur patrimoniale, l'autre sur le caractère naturel du paysage établi par le SEQ-Eau du plateau d'Auvergne en suivant la méthodologie de Machado (2004).

Nous essayons d'abord d'en établir la *valeur patrimoniale limnologique* sur cinq critères (tableau 1)

- (i) *Rareté des caractères limnologiques* : origine et morphologie, bilan hydrique, thermique, chimie, écologie, Etat naturel du lac et de son

bassin,

(ii) *Biodiversité*,

(iii) *Suivi scientifique actuel*,

(iv) *Place dans l'histoire des sciences et de la limnologie et particularités culturelles et historiques*,

(v) *Valeur économique*.

Les usages économiques sont également signalés mais non pris en compte dans la valeur patrimoniale.

Ces critères sont notés sur cinq niveaux, de 0 à + 4 (tableau 1), depuis une valeur patrimoniale régionale ou nationale très faible tel que : caractéristique limnologique très commune, milieu très anthropisé ou contaminé, suivi scientifique absent, usages très limités ou nuls, valeur culturelle absente,... jusqu'à un niveau exceptionnel au plan européen sur tous ces critères. Cette méthodologie est similaire à celle développée pour l'établissement du système d'évaluation de la qualité des lacs, SEQ-Lacs, (Aquascop, Gay-Environnement, 2003), basée sur l'état du lac, la rareté, l'origine, le fonctionnement : elle doit être mise en œuvre par une expertise collective car ces critères sont peu quantifiables. Elle est ici illustrée sur la base des connaissances de l'auteur sur le Léman (Meybeck, 1970), le lac d'Annecy (Benedetti-Crouzet et Meybeck, 1974), les lacs auvergnats, et en limnologie générale (Pourriot et Meybeck, 1995).

La combinaison des scores pour chaque critère montre le caractère limnologique unique du Pavin et celui, exceptionnel, du Creux de Soucy, du Chambédaze et de la Godivelle d'En-Haut. Sur la base du seul patrimoine limnologique naturel les autres lacs - Servièrès, Esclauzes, Bourdouze, Montcineyre, Godivelle d'En-Bas et Tazenat - ont des valeurs équivalentes à celles du Léman ou du lac d'Annecy.

Si on considère la valeur culturelle (valeur esthétique, historique et/ou archéologique, enfin symbolique ou religieuse), le Léman et le lac d'Annecy l'emportent sur les lacs d'Auvergne, sauf sur le Pavin, « merveilleux » depuis cinq siècles.

La valeur économique n'est ici présentée qu'à titre indicatif : les critères d'usage pour l'eau potable, valeur touristique, valeur halieutique, devant être quantifiés de façon à pouvoir être

comparés d'un lac à l'autre. Malgré les 200 000 visiteurs annuels annoncés au Pavin, les lacs subalpins l'emportent largement.

L'autre essai d'évaluation porte sur le caractère naturel du paysage – naturalness - tel qu'établi par Machado (2004) sur la base de six critères : l'introduction d'espèces, l'addition d'énergie ou de flux de matériaux, l'altération physique du paysage, l'extraction de matériaux et/ou d'espèces, la présence d'artefacts (routes, bâtiments), la fragmentation du continuum naturel, enfin la modification de la couverture végétale. L'index ne prend pas en compte des valeurs subjectives comme l'isolement et la beauté du paysage. Dans une application préliminaire à la région des lacs telle que délimitée sur la figure 1, on arrive à une note proche de 8, sur un maximum possible de 10, ce qui correspond à un « système sub-naturel », avec environ 1/3 du territoire vierge (lacs et zones humides). La principale dégradation de la note provient des introductions d'espèces, plantations de conifères des années 1960 et salmonidés dans les lacs de cratère. Un tel score est rarement atteint pour la moyenne montagne.

Les lacs auvergnats, qui peuvent parfois sembler ordinaires à ceux qui les fréquentent quotidiennement, sont des systèmes limnologiques remarquables, voire exceptionnels au niveau européen. Il convient d'harmoniser et de compléter leur conservation. La première voie de classement est celle d'un *parc national* ou d'une prolongation du projet d'inscription de la chaîne des Puys au *patrimoine mondial Unesco*. Dans de nombreux pays des ensembles ou des lacs isolés remarquables ont été classés depuis longtemps en parc nationaux : le Crater Lake National Park (Oregon) créé en 1902, le parc des lacs de Plitvice en Croatie (1949), le Lake District National Park créé en Angleterre (1951), le lac Skadar entre le Montenegro et l'Albanie (1968), le lac Malawi (Malawi), le lac Nelson (Nouvelle Zélande). Ici, le territoire à protéger serait à cheval sur cinq communes (Picherande, Egliseneuve d'Entraigues, Besse-et-Saint-Anastaise, Compains, La Godivelle) et comprendrait dans un même ensemble contigu et de pressions humaines très faible, tous les lacs et leurs bassins situés sur la ligne de partage des eaux : Pavin, Creux de Soucy, Chauvet, Montcineyre, Bourdouze, les Bordes, Chambédaze, la Fage, Godivelle Haut et Bas, et

possiblement l'Esclauzes et la Landie (figure 1). Il pourrait se prolonger au Cézalier-Sud, dont le paysage est encore très préservé avec un index de Machado sans doute proche de 8.

La seconde voie serait un classement de sites sélectionnés au titre de *réserves géologiques* et de leur valeur patrimoniale naturelle. Ce type de classement existe déjà en France (De Wever *et al*, 2006) et dans le monde pour préserver les stratotypes, les gîtes de minéraux (île de Groix) ou des gisements fossilifères, mais les lacs n'en font pas encore partie. Ces classements sont basés sur la singularité des types à classer, le caractère régional à global des processus observés, la valeur paysagère et les possibilités réelles de conservation. Sur ces bases, le Pavin, le Creux de Soucy et la Godivelle d'En-Haut sont indiscutables, Chauvet et Chambédaze pourraient prétendre au classement, mais le caractère unique des biotopes du Pavin (monimolimnion) et du Creux de Soucy, ne seraient guère mis en valeur dans ce type de classement.

La reconnaissance internationale de la valeur exceptionnelle du Pavin est ancienne, mais elle est restée inaperçue des pouvoirs publics, en des temps où le Ministère de l'Environnement n'était même pas créé. En 1969, après dix ans de travail, l'Association Internationale de Limnologie (SIL), le Programme Biologique Mondial de l'Unesco (IBP) et l'Union pour la Conservation de la Nature (IUCN) sélectionnent pour leur Projet Aqua (Luther et Rzoska, 1969 et 1971) les plans d'eau du monde entier que les pays devraient protéger au titre de leur valeur limnologique, des recherches menées et à des fins d'éducation et de formation. Sur les six cents lacs listés, il n'y a que six lacs français dont le Léman, Annecy et le Pavin. Les particularités uniques de ce dernier y sont déjà reconnues (voir tableau 1), sauf la biodiversité des microorganismes, découverte vingt ans plus tard. Les auteurs britanniques et finlandais du Projet Aqua et leur collègue français de la SIL, sans doute Bernard Dussart, souhaitent une procédure de conservation patrimoniale semblable à celle utilisée pour les Parcs nationaux ou pour les Réserves biologiques, peut-être seront-ils un jour entendus ?

Remerciements

L'idée de cet article résulte d'une conférence donnée à Clermont-Fd à l'invitation de Didier Jézéquel, Christian Amblard et Gérard Fonty. Les informations et publications anciennes sur les lacs de Monticchio ont été transmises par Antonio Caracausi, Istituto Nazionale Geofisica Vulcanologia, à Palerme et Giovanni Chiodini, Osservatorio Vesuviano, INVG, à Naples et traduites par Catherine Siroux (Ingénieur au LESC, CNRS). Les descriptions de Nyos ont été confirmées par le regretté Jean-François Le Guern ; celles du Creux de Soucy ont été recueillies auprès d'Olivier Pigeron du Groupe Spéléologique d'Auvergne. Les échanges avec Michel Bakalowicz, Jean Devaux, Jean-Pierre Pelletier et Nicole Lair, qui ont été des pionniers dans l'étude de ces lacs, Stéphane Gomis, maître de conférences en histoire à l'université Blaise-Pascal, Jean Labbaye des Archives diocésaines de Clermont-Ferrand, Pierre Cassan, ingénieur à l'ONF de Lempdes, Jacques Bernard, ancien maire d'Egliseneuve-d'Entraigues, Francine Mallot, archiviste de la Ville de Riom, Elisabeth Cartoux, responsable du fonds documentaire du Muséum Henri-Lecoq et Pierre Boivin, volcanologue (Université Blaise-Pascal) ont été très appréciés, ainsi que la relation de la légende du Creux de Soucy par Geneviève Fraisse-Mouillaud (Université d'Aix-Marseille). Les premières versions du manuscrit ont fait l'objet de commentaires poussés de Didier Jézéquel et de l'intérêt constant de Nathalie Vidal. Qu'ils trouvent tous ici l'expression de ma gratitude pour leur aide et leur intérêt pour ce travail, même s'ils peuvent ne pas en partager toutes les conclusions.

Références bibliographiques

- Aeschbach-Hertig W., Hofer M., Kipfer R., Imboden D.M., Wieler R.,** 1999. Accumulation of mantle gases in a permanently stratified volcanic lake (Lac Pavin, France). *Geochimica Cosmochim. Acta*, 63, pp. 3357-3372.
- Ajalbert J.,** 1896. *L'Auvergne. Ancienne maison Quentin*, Paris, 362 p.
- Albignat J.P.,** 1978. Estimation du bilan thermique d'un lac profond à l'aide de données météorologiques de routine. Thèse de troisième cycle, Univ. Clermont-Ferrand II, 160 p.
- Alvinerie J., Begot B., Levêque P., Vigneaux M.,** 1966. Activité en tritium et caractéristiques chimiques des eaux du lac Pavin. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 262, pp. 846-849.
- Amblard C.,** 1986. A study of spatial and temporal variability in the adenosine nucleotides of lake phytoplankton. *Hydrobiol.* 137, pp. 159-173.
- Anonyme,** 1910. Histoire du pèlerinage de Notre-Dame de Vassivière, Clermont-Ferrand. Imprimerie Moderne, 156 p. (Bibliothèque Historique, Clermont-Ferrand, A39 027 bis).
- Aquascop,** Gay-Environnement, 2003. Le SEQ plans d'eau, tomes I à IV. Ministère de l'Environnement.
- Assayag N., Jézéquel D., Ader M., Viollier E., Michard G., Prévot F., Agrinier P.,** 2008. Hydrological budget, carbon sources and biogeochemical processes in lac Pavin : constraints from delta ^{18}O of water and delta ^{13}C of dissolved organic matter. *Applied Geochemistry* 23, pp. 2800-2816.
- Audigier P. (Chanoine),** 1899. Histoire d'Auvergne. (transcription d'un manuscrit de 1720 environ). Edition P. Bellier, Clermont-Ferrand, 562 p.
- Bakalowicz M.,** 1971 Le Creux de Soucy. *Ann. Spéléo.* 26, 2, pp. 387-409.
- Belis C.A., Ariztegui D.,** 2004. The influence of biological and environmental factors on the stable composition of ostracods. The late Pleistocene record from lake Albano (Central Italy). *J. Limnol* 63 (2), pp. 219-232.
- Berthoule A.,** 1890. Les lacs d'Auvergne. Orographie, faune naturelle, faune introduite. *Rev. Soc. Nationale d'Acclimatation. Paris*, 136 p.
- Berthoule A.,** 1896. Les lacs de Besse en Chandesse. In : *L'Auvergne. IV Congrès Int. Hydroclimatologie Géologie*, Clermont-Ferrand, pp. 298-308.
- Bogaard P. (van den), Schmincke H.U.,** 1995. Laacher See tephra: a widespread isochrones late Quaternary tephra layer in Central and Northern Europe. *Geol. Soc. Am. Bull.* 96, 2, pp.1554-1571.
- Bonhomme C.,** 2008. Turbulence des ondes en milieu naturel stratifié. Deux études de cas : - étude du mélange turbulent et des ondes internes du lac Pavin (Auvergne, France), - influences des ondes de Rossby sur la concentration en chlorophylle de surface dans l'upwelling du Pérou. Thèse soutenue le 15 février 2008 à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 220 p.
- Bourdier G., Amblard C.,** 1988. Variabilités verticale et temporelle des acides gras d'un phytoplancton lacustre au cours d'un cycle nyctéméral. *Hydrobiologia*, 157, pp. 57-68.
- Brunhes J., Francez A.J., Mollet A.M., Villepoux O.,** 1982. Etude botanique et zoologique du site de Chambédaze. Rapport DRAE Auvergne, Clermont-Ferrand, 103 p.

- Bruyant C.**, 1903. Les seiches du lac Pavin. Revue d'Auvergne, XX, pp. 81-97.
- Bruyant C.**, 1910. La station de Besse, La Montagne d'Auvergne, 2, pp. 3-4.
- Bruyant C., Eusebio J.B.**, 1904. Matériaux pour l'étude des rivières et des lacs d'Auvergne. Louis Bellet, Clermont-Ferrand, 162 p.
- Bruzen de la Martinière A.-A.**, (1739-1741). Le grand dictionnaire géographique, historique et critique. Paris, 6 volumes.
- Büchel G.**, 1993. Maars of the Eifel. In J.F.W. Negendank, B. Zolitschka (eds) ,Paleolimnology of European Maar Lakes Springer, Lectures Notes in earth Sciences, 49, pp. 1-13.
- Camus G., Michard G., Olive P., Boivin P., Desgranges P., Jézéquel D., Meybeck M., Peyrus J.C., Vinson J.M., Viollier E., Kornprobst J.**, 1993. Risques d'éruption gazeuse carbonique en Auvergne. Bull. Soc. Géol. France, 164, pp. 767-781.
- Caracausi A., Nuccio P.M., Favara R., Nicolosi M., Paternoster M.**, 2009. Gas hazard assessment at the Monticchio crater lakes of Mt Vulture, a volcano in Southern Italy. Terra Nova, 21, pp. 83-87.
- Cassan P.**, 1998. Le lac Pavin. Besse et Saint-Anastaise . Office National des Forêts, Fontainebleau, 48 p.
- Chapron E.**, 2010. Age et stabilité du cratère-lac Pavin. Eruption, 23, pp. 36-39
- Chiodini G., Cioni R., Marini L., Principe C., Braco B.**, 1997. Water and gas chemistry of the Lake Piccolo of Monticchio (Mt Vulture, Italy). Current Research on Volcanic Lakes, IAVEI Newsletter, 10, pp. 3-9.
- Chondrogianni C., Ariztegui D., Guilizzoni P.**, 1996. Lakes Albano and Nemi (Central Italy), an overview. In : P. Guilizzoni and F. Oldfield (eds), Palaeo-environmental analysis of Italian crater lakes and Adriatic sediments. Mem.Ist, Ital.Idrobiol, 55, pp. 17-22.
- Ciarallo A., Capaldo L.**, 1995. Viaggio al Vulture (transcription des publications de Tenore et Gussone, 1838 : *Peregrinazioni effettuate nelle state del 1838 dai Signore Tenore e Gussone ...in Principitato Citeriore e di Basilica*). Ed. Osanna Venosa, 157 p.
- Cladière [Dom, attribué à]** vers 1687. Histoire de la Sainte Chapelle de Notre-Dame de Vassivière, près du Mont d'Or en Auvergne, célébrée par les miracles que Dieu y fait continuellement par l'intercession de sa très-pure et glorieuse mère. Réimprimé en 1837 à Clermont-Ferrand, 266 p.
- Cossa D., Mason R.P., Fitzgerald W.F.**, 1994. Chemical speciation of mercury in a meromictic lake. In: CJ Watras and JW Huckabee (eds). Mercury pollution, Lewis Publ., pp. 58-67.
- Crouzet E., Hubert P., Meybeck M., Olive P.**, 1969. Etude de la dynamique des lacs par des mesures isotopiques. Ann. Stat. Biol. Besse-en-Chandesse, tome 4, pp. 367-376.
- Crouzet E., Meybeck M.**, 1971. Le lac d'Annecy et son bassin versant, Archives des Sciences, 4, 3, pp. 1-76.
- De Wever P., Le Nechet Y., Cornée A.**, 2006. Vade-mecum pour l'inventaire du patrimoine géologique national. Société Géologique de France, Mémoire 92, 162 p.
- Delarbre A. (abbé)**, 1795. Flore d'Auvergne ou recueil des plantes de cette ci-devant province. Suivi de la Description du lac Pavin. B. Beauvert et L. Deschamp, Clermont-Ferrand, 337 p.
- Delarbre A. (abbé)**, 1805. Notice sur l'Auvergne et en particulier sur la ville de Clermont. Clermont-Ferrand, 260 p.
- Delbecq A.**, 1898. Les lacs français. I vol., 153 fig., 22 pl., Chamerot et Renonaire, Paris, 436 p.
- Del Rosso T.**, 2009, Les légendes du Pavin. Mythes ou réalités ? Eruption, pp. 44-45.
- Del Rosso-d'Hers T.**, 2010. Montchal-Pavin, mise au point sur les travaux récents (2004-2010). Eruption, 23, pp 41-43.
- Devaux J., Lair N.**, 1976. Production primaire et biomasse des populations algales dans un petit lac oligotrophe du Massif Central français. Hydrobiol. 50, 3, pp. 209-220.
- Devaux J.**, 1980a. Contribution à l'étude limnologique du lac Pavin (France) II. Relation entre paramètres abiotiques, phyto et zooplancton dans la zone 0-20 mètres. Hydrobio. 68, pp. 17-34.
- Devaux J.**, 1980b. Structures des populations phytoplanktoniques dans trois lacs du Massif central : successions écologiques et diversité. Acta Ecologica 1, 1, pp. 11-26.
- Devaux J., Lair N., Amblard C.**, 1983. Un écosystème lacustre profond : le lac Pavin. In M. Lamotte et F. Bourlière : problèmes d'écologie, structure et fonctionnement des écosystèmes limniques, Masson, Paris, pp. 1-49.
- Dupont P.**, 1999. Faune entomologique de la réserve naturelle des Sagnes de la Godivelle. Office Pour la Protection Entomologique Languedoc-Roussillon, 51 p.
- Dussart B.**, 1952. Contribution à l'étude des lacs de Savoie : le lac de la Girotte. Ann. Stat. Centr. Hydrobiol. Appliquée, 4, pp. 379-391.

- Dussart B.**, 1966, 1992. Limnologie, l'étude des eaux continentales. Gauthiers-Villars, Paris, 736 p.
- Elbaz-Poulichet F.**, 1988. Apports fluviaux et estuariens de Pb, Cd et Cu aux océans. Thèse d'état, Université de Paris VI, 288 p.
- Equipement du Puy-de-Dôme**, 2008. Plan de prévention des risques naturels, inondation du bassin de la Couze-Chambon. Annexe.
- Eusebio A.**, 1896. La station biologique de Besse. Rev. d'Auvergne XIII, pp. 457-460.
- Eusebio A., Reynouard J.**, 1925. Le lac Pavin et le Creux de Soucy. Station limnologique de Besse, 55 p.
- Figuères G.**, 1978. Contribution à l'étude géochimique du fer et du manganèse dans les eaux de surface. Thèse 3^e cycle, université Paris 6, 190 p.
- Flick B.J.C., Hallegraeff G.M., Lingeman R.**, 1973. Limnological notes on Lake Pavin (Auvergne). Ann. Station Biol. Besse-en-Chandesse, pp. 119-146.
- Gasse F.**, 1969. Les sédiments à diatomées du lac Pavin (Auvergne). Ann. Stat. Biol. Besse-en-Chandesse, tome 4, pp. 221-238.
- Gautier P., Bruyant C.**, 1896. Le Creux de Soucy. In : L'Auvergne. IV Congrès Int. Hydroclimatologie Géologie, Clermont-Ferrand, pp. 313-320.
- Grjebine T., Lalou C., Ros J., Capitani M.**, 1964. Study of magnetic spherules in three cores of the occidental basin of the Mediterranean Sea. Ann. New York Acad. Sci., 119, pp. 143-165.
- Gobin L.**, 1896. Essai sur la géographie de l'Auvergne. Thèse, Faculté de Clermont, 413 p.
- Gonella J., Martin J.**, 1966. Centrales de mesures océanographiques. Cahiers Océanographiques XVIII, 5, pp. 381-422.
- Guenet P., Reille M.**, 1988. Analyse pollinique du lac-tourbière de Chambédaze (Massif Central, France) et datation de l'explosion des plus jeunes volcans d'Auvergne. Bull. Ass. Fr. étude Quat., 25, pp. 175-194.
- Jacquet J., Mandelbrot L.**, 1966. Etudes nouvelles entreprises par Electricité de France sur l'évaporation des lacs et des réservoirs. Hydrol. Sci. J., 11, 4, pp. 44-60.
- Jaloustre E.**, 1884. Le Beffroi de Besse. Mém. Acad. Sci., Belles-Lettres et Arts, Clermont-Ferrand (BMIU, Clermont A34 425), pp. 113-146.
- Jeandel C.**, 1981. Comportement géochimique des isotopes du plutonium dans les milieux naturels (lacustre, fluvial, estuaire). Thèse de troisième cycle, université de Paris 7, 121 p.
- Jouan A.**, 1566. Recueil et discours du voyage du roy Charles IX. chez Charles Etienne, imprimeur du Roy, Paris.
- Juvigné E.**, 1992. Distribution of widespread Late Glacial and Holocene tephra beds in the French Central Massif. Quat. Int. 13/14, pp. 180-185.
- Juvigné E., Camus G., Goër de Herve A. (de)**, 1993. Maars of the Northern Auvergne, state of knowledge. In: JFW Negendank and B. Zolitschka (eds). Paleolimnology of European Maar Lakes. Lecture Notes Earth Sci. 49, Springer, pp. 81-94.
- Kilian A. J., Piquet C.**, 1823-1833. Dictionnaire géographique universel, Paris, 23 vol.
- Krishnaswami S., Lal D., Martin J.M., Meybeck M.**, 1971. Geochronology of lake sediments. Earth Planet. Sciences Letters, 11, pp. 407-414.
- La Montagne d'Auvergne**, (1910). Revue illustrée, littéraire, artistique, touristique, sportive et liste des étrangers, Issoire.
- Lair N.**, 1975-1976. Projet Alpin OCDE pour la lutte contre l'eutrophisation des lacs du Massif Central français. I protocoles de mesure. Ann. Station Biol. Besse-en-Chandesse, 10, pp. 92-145.
- La Porte J. (Abbé de), Abbé de Fontenay, Domaïron L.**, 1769-1791, Le Voyageur français ou la connaissance de l'Ancien et du Nouveau monde. Le Cellot, Paris, 42 volumes.
- Lauras-Pourrat A.**, 1989, 1998. Guide de l'Auvergne mystérieuse. Tchou, 589 p.
- Lavina P., Del Rosso T.**, 2009. Communication orale. Colloque Lac Pavin et autres lacs méromictiques, Besse, 14-16 mai 2009.
- Lecoq H.**, 1835. Description de l'Auvergne. Le Mont d'Or et ses environs. J.-B. Baillière, Paris, 437 p.
- Lecoq H.**, 1871. L'eau sur le plateau Central de la France. JB Baillière, 394 p.
- Legrand d'Aussy P. J.B.**, 1788. Voyage d'Auvergne. E. Onfroy, Paris, 555 p.
- Leguern F., Sigvaldason G. (eds)**, 1989. The Lake Nyos event and natural CO₂ degassing. J. Volcanology Geothermal Research, vol 39.
- Lehours A.-C., Carrias J.-F., Amblard C., Sime-Ngando T., Fonty G.**, 2010. Les bactéries du lac Pavin. Pour la Science, 387, pp. 30-35.
- Luther H., Rzoska J.**, 1969, 1971. Project Aqua, a source book of inland waters proposed for conservation. Int. Biol. Progr. Handbook 21, Blackwell, 239 p.

- Machado A.**, 2004. An index of naturalness. *J. Nature Conservation*, 12, pp. 95-110.
- Mallot F.**, 1995. Les tremblements de terre en Basse Auvergne aux XVe et XVIe siècles. *L'Histoire en Auvergne*, CREA, Univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, pp. 86-90
- Margaritora F.G.**, 1992. Limnology in Latium: the volcanic lakes. In: P. Guilizzoni, G. Tartari and G. Giussani (eds). *Limnology in Italy*, Mem. Ist. It. Idrobiologia, 50, pp. 319-336.
- Martel E.A.**, 1892. Le Creux de Souci. *La Nature*, pp. 165-167.
- Martin J.M.**, 1985. The Pavin Crater Lake. In: W. Stumm (ed), *Chemical Processes in Lakes*, John Wiley, pp. 169-188.
- Martin J.M., Meybeck M., Nijampurkar V.N., Somayajulu B.L.K.**, 1992. ^{210}Pb and ^{32}Si isotopes in Pavin Lake. *Chemical Geology*, 94, pp. 173-181.
- Mazaud C.**, 1969. Etude hydrologique d'un lac de cratère. Thèse de troisième cycle en hydrogéologie, Université de Montpellier, 58 p.
- Meybeck M.**, 1970. Bilan hydrochimique et géochimique du Léman. Thèse de troisième cycle, Université de Paris 6, 230 p.
- Meybeck M., Martin J.M., Olive P.**, 1975. Géochimie des eaux et des sédiments de quelques lacs volcaniques du Massif Central français. *Verh. Intern. Verein. Limnol.*, 19, pp. 1150-1164.
- Meybeck M.**, 1986. Composition chimique des ruisseaux non pollués en France. *Sci. Geol. Bull.*, 39, 1, pp. 3-77.
- Michard G., Viollier E., Jézéquel D., Sarazin G.**, 1994. Geochemical study of a crater lake : Lake Pavin, France. Identification, location and quantification of the chemical reactions in the lake. *Chem. Geol.*, 115, pp. 103-115.
- Michard G.**, 2010. Le monstre du lac Nyos se cache-t-il au fond du Pavin ? *Eruption*, 23, p. 40.
- Münster S.** (auteur), Belleforest F. (éditeur scientifique), 1575. *Cosmographie Universelle*. 2 t. en 3 vol., chez Nicolas Chesneau, Imprimeur-libraire, Paris. (Bibliothèque Sainte Geneviève-Sorbonne, réserve, cote RXVIB 3=321-1).
- Negendank J.F.W., Zolitschka B. (eds)**, 1993. *Paleolimnology of European Maar Lakes*. Lecture Notes Earth Sci. 49, Springer, pp. 238-275.
- Negrel P., Roy S.**, 1998. Chemistry of rainwater in the Massif Central (France). A strontium and major element study. *Applied Geochem.*, 13, pp. 941-952.
- Niessen F., Lami A., Guilizzoni P.**, 1993. Climatic and tectonic effects of sedimentation in Central Italian volcano lakes (Latium). In: JFW Negendank and B. Zolitschka (eds). *Paleolimnology of European Maar Lakes*. Lecture Notes Earth Sci. 49, Springer, pp. 129-148.
- Nijampurkar N., Meybeck M., Martin J.M.**, 1983. Silicon 32 as a tool for studying silicon behaviour in estuaries. *Limnology Oceanography* 28, pp. 1237-1242.
- Olive P., Boulègue J.**, 2004. Biogeochemical study of meromictic lake : Pavin Lake, France. *Géomorphologie*, 4, pp. 305-316.
- Olivier L.**, 1939. Matériaux pour la connaissance limnologique des lacs Mont Doriens. Imprimerie de Bussac, Clermont-Ferrand, 79 p.
- Olivier L.**, 1952. Sur la présence en été, dans le lac Pavin, d'une couche dépourvue d'oxygène vers 70 m de profondeur, *CR Acad. Sci. Paris (D)*, 234, pp. 743-745.
- Omaly N.**, 1968. Le lac Pavin, historique et hydrobiologie. *Rev. Sci. Nat. Auvergne*, 34, 1 à 4, pp. 7-31.
- Palmeri L., Scacchi A.**, 1852. *Della regione vulcanica del Monte Vulture*. Gaetano Mobile, Naples, 160 p.
- Pelletier J.P.**, 1963. Température et oxygène dissous dans la couche profonde du lac Pavin. *C.R. 88^e Congrès Sociétés Savantes*, 2, pp.653-658.
- Pelletier J.P.**, 1968. Un lac méromictique, le Pavin (Auvergne). *Ann. Stat. Biologique, Besse-en-Chandesse*, 3, pp. 147-170.
- Perreau A.**, 1948. Le lac-cratère de Pavin. *Rev. Sci. Nat. Auvergne*, 14, pp. 103-106.
- Persoone G., Sorgeloos P., Grolière C., Omaly N.**, 1968. Sur la limnologie de quelques lacs du Puy-de-Dôme : physicochimie et plancton de surface. *Ann. Station Biol. Besse-en-Chandesse*, 3, pp. 40-114.
- PNRVA (éd.)**, 2004. *Les lacs des volcans d'Auvergne*. Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne, 31 p.
- Pourrat A.**, 1973. *Guide de l'Auvergne mystérieuse*. Tchou, 574 p.
- Pourreyron C. (Chanoine)**, 1936. *Le culte de Notre-Dame au diocèse de Clermont en Auvergne*, 303 p.
- Pourriot R., Meybeck M.**, 1995. *Limnologie générale*, Masson, 956 p.
- Prudhomme L.M.**, 1804. *Dictionnaire universel de la France*, 5 vol., Laporte, Paris.
- Restituto F., Lair N.**, 1975-76. *Projet alpin OCDE pour la lutte contre l'eutrophisation des lacs du Massif Central français*. III Le lac Pavin. *Ann. Stat. Biologique, Besse-en-Chandesse*, 10, pp. 146-191.

- Restituto F.**, 1984. Study of a layer containing hydrogen sulfide in a meromictic lake, Lake Pavin, France. *Hydrobiologia*, 109, pp. 235-242.
- Reynouard J.**, 1910. La légende du Pavin, La Montagne d'Auvergne, 10, pp. 1-4.
- Reyt P.**, 2000. Les dragons de la crue. *Cahiers de Géographie du Québec*, 44, 122, pp. 127-145.
- Reyt P.**, 2002. Nous et les autres : l'égalité face au risque. *Cahiers de Géographie du Québec*, 46, 127, pp. 7-24.
- Roux-Parassac E.**, 1910. Dans la vallée de la Couze, A.Vessely, Issoire, 202 p.
- Sabroux J.-C.**, 2007. Lac Nyos, le monstre domestiqué. *Eruption*, 14, pp. 31-39.
- Scharf B.W. et Björk S. (eds)**, 1992. Limnology of Eifel Maar Lakes. *Advances in Limnology (Archiv. für Hydrobiol.)* 38, 348 p.
- Schettler G., Schwab M.J., Stebich M.**, 2007. A 700 years record of climate change based on geochemical and palynological data from varved sediments (Lac Pavin, France). *Chem. Geol.*, 240, pp. 11-35.
- Scribe E.**, 1910. Le lac Pavin (extrait posthume du Roi de carreau, nouvelle), La Montagne d'Auvergne, p 4.
- Seyler P.**, 1985. Formes chimiques et comportement de l'arsenic en milieu estuarien. Thèse Doctorat, Université Paris 6, 194 p.
- Shanklin E.**, 1989. Exploring lakes and maleficent water. In: Grassfields, legends and myth. *J. Volc. Geotherm. Res.*, 39, pp. 233-24.
- Sigvaldason G.E.**, 1989. International Conference on Lake Nyos disaster : conclusions and recommendations. *J. Volc. Geothermal Res.*, 39, pp. 96-101.
- Stebich M., Brüchman C., Kulbe T., Negendank J.F.W.**, 2005. Vegetation history, human impacts and climate change during the last 700 y recorded in annually laminated sediments of Lake Pavin, France. *Rev. Palaeobot. Palynol.*, 133, 1-2, pp. 115-133.
- Touchard L.**, 2002. Limnologie physique et dynamique. L'Harmattan, 396 p.
- Truze E., Kelts K.**, 1993. Sedimentology and paleoenvironment from the maar Lac du Bouchet for the last climatic cycle 0-120000 years. In: Negendank J.F.W. et Zolitschka B. (eds), *Paleolimnology of European Maars*, Lect. Notes Earth Sci. 49, pp. 237-275.
- Viollier E., Jézéquel D., Michard G., Pèpe M., Sarazin G., Albéric P.**, 1995. Geochemical study of a crater lake (Lake Pavin, France): trace elements behaviour in the monimolimnion. *Chem. Geol.*, 125, pp. 61-72.
- Viollier E., Michard G., Jézéquel D., Pèpe M., Sarazin G.**, 1997. Geochemical study of a crater lake: Lake Pavin, Puy-de-Dôme, France. Constrains afforded by the particulate matter distribution in the element cycling within the lake. *Chem. Geol.* 142, pp. 225-241.
- Wurtz A.**, 1945. Recherches écologiques sur les lacs, tourbières et étangs d'Auvergne. *Ann. Stat. Centr. Hydrobiol. Appliquée*, 1, pp. 89-166.

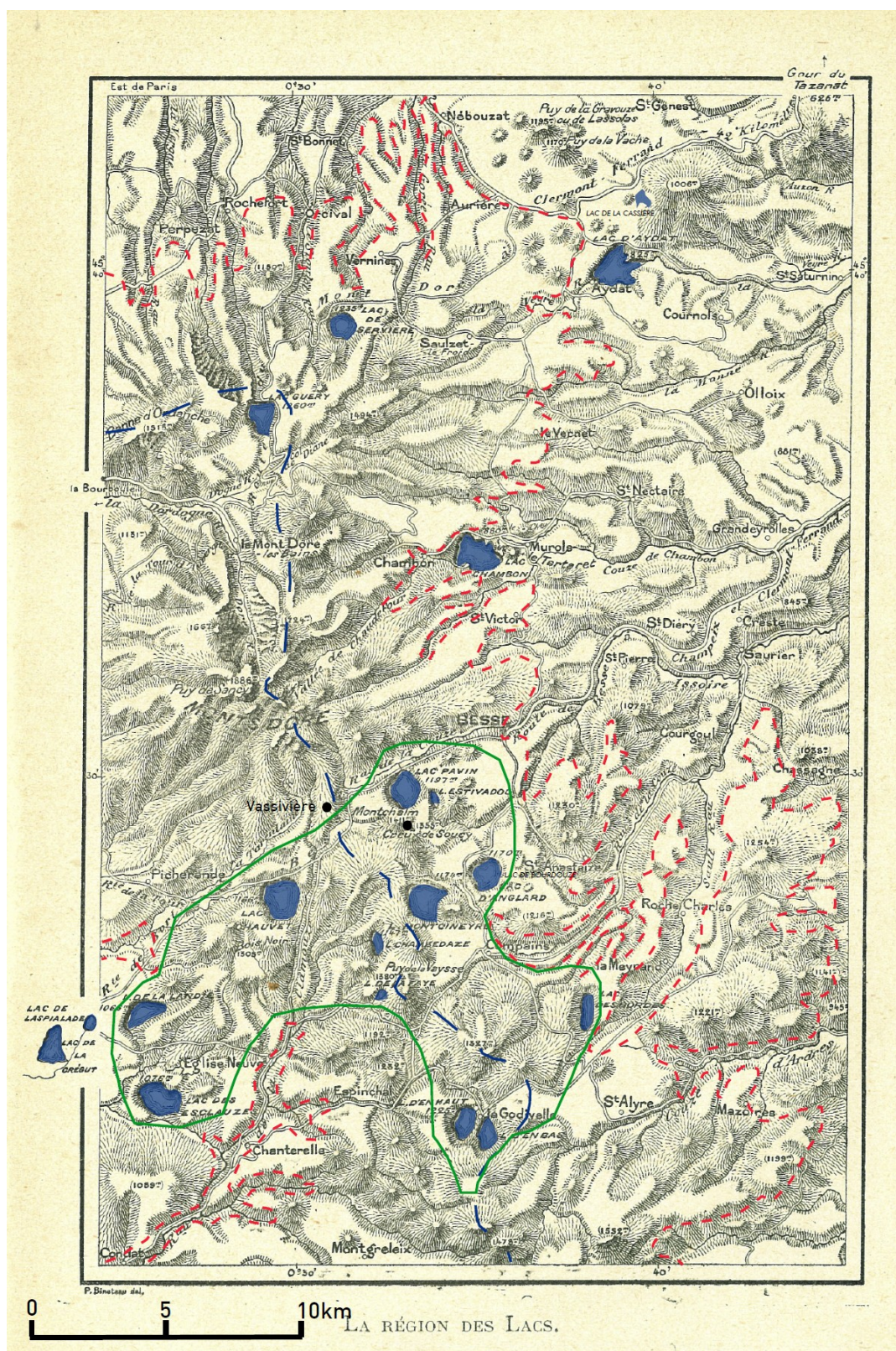


Figure 1. Carte schématique de Berthoulet (1890). Les lacs du plateau d'Auvergne sont à la limite de partage des eaux (bleu tireté) entre la Loire- Allier à l'Est et la Dordogne, à l'Ouest. Les lacs traités ici sont tous situés entre 1050m (pointillé rouge) et 1250m d'altitude. La localisation de Vassivière est rajoutée. La ligne continue verte indique la zone de protection impérative des lacs, qui pourrait être étendue à l'ensemble du Cézalier et à Vassivière.

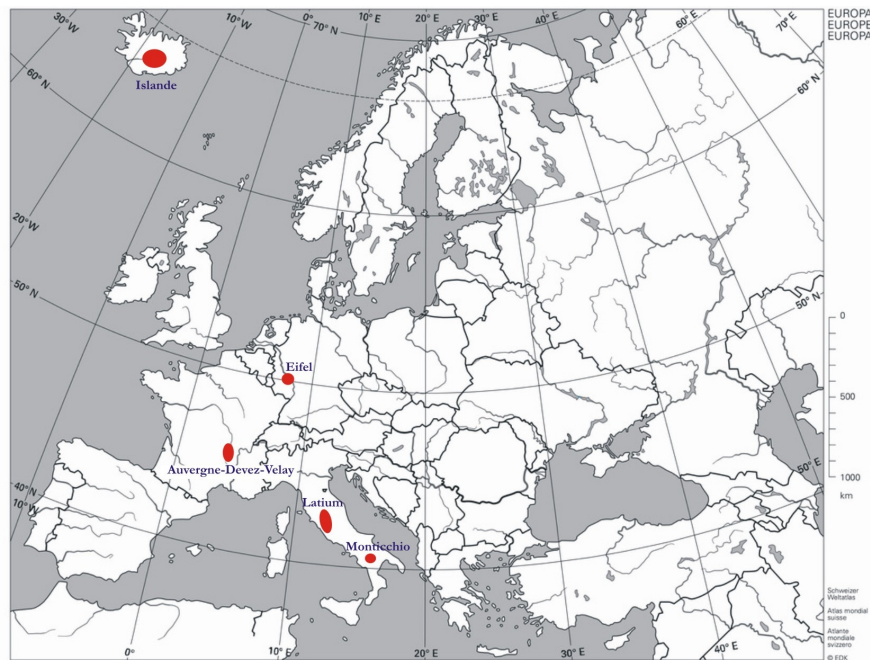


Figure 2. Localisation des principales provinces de lacs volcaniques en Europe.
I-Eifel, II-Latium, III-Auvergne-Devez-Velay, IV-Islande, MTC-lacs de Monticchio.

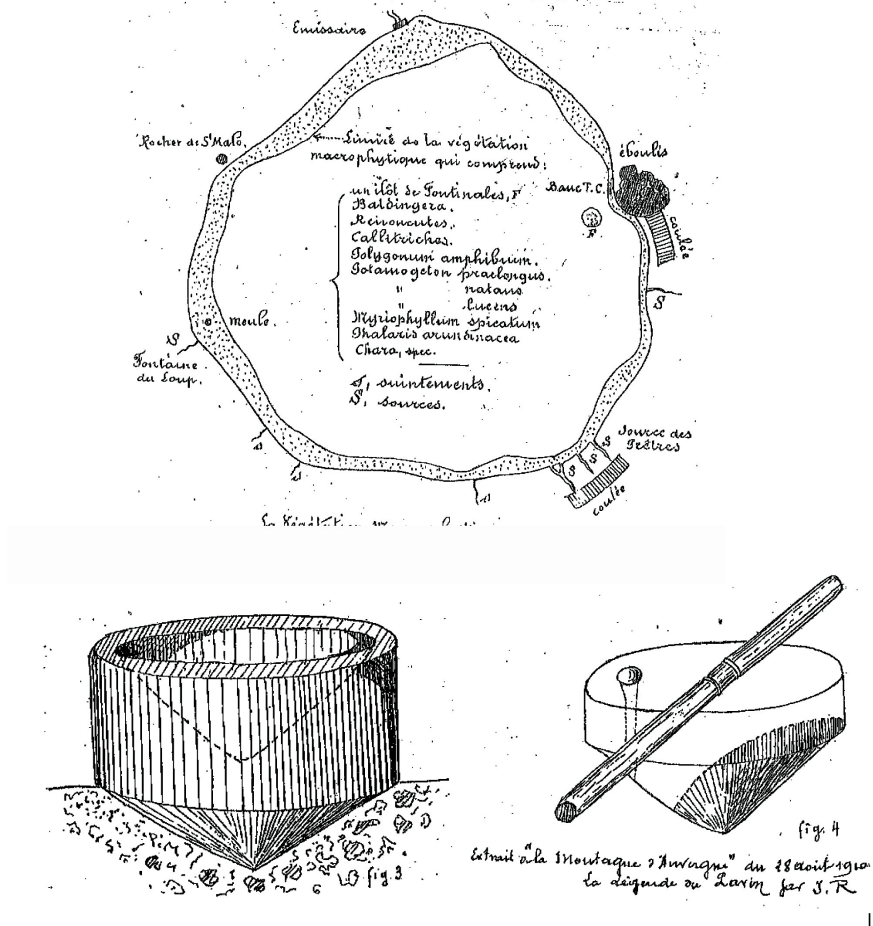


Figure 3. « Pierre au trésor » (en bas à gauche) extraite du lac Pavin en 1909 et conservée à la mairie de Besse-en-Chandesse. Plan de localisation de la trouvaille et autre exemple des pierres taillées trouvées en 1909 près des sources alimentant le lac. Ces pierres pourraient être à l'origine de la légende de la Ville engloutie du XIXe siècle. Dessin original de J. Reynouard (1910) et plan d'Eusebio et Reynouard (1925).

	PARTICULARITE LIMNOLOGIQUE					Suivi Scient Actuel	PATRIMOINE CULTUREL				VALEUR ECONOMIQUE		
	Morphologie	Bilan hydrique	Thermique Dynamique	Chimie eau/sédiment	Etat naturel		Biodiversité	Paysage	Histoire Archéologie	Culture Religion	Eau potable	Tourisme Transport	Pêche
PAVIN	*** (M)	*** (M)	**** (MM)	**** (MM) **** (DT)	***	****	* (1) **** (2)	***	**** (1) (2) (3)	*** (1) (2)		**	* (1) (3)
CREUX DE SOUCY	**** (CV)		**** (ST)	* à **** (DT?)	****		(2)?		** (3)				
GODIVELLE HAUT	*** (M)	**** (LP)		*** (FM)	***	*		***	* (3)		*		* (3)
CHAMBEDAZE	** (1) (GL)	**			****	*	* (LT) (3)						
ESCLAUZES	** (1) (GL)	**			***		* (LT) (3)						
BOURDOUZE	* (1) (GL)	**			****		* (LT) (3)						
CHAUVE	*** (M)	**			***			*					* (3)
MONTCINEYRE	** (B)	*			***			*			*		
GODIVELLE BAS	(GL)				**	*	** (LT) (3)	*					
LANDIE	(GL)				**				* (1)				* (2)
LA FAGE	(M)	*			**						*		
SERVIERES	***	**		*** (FM)	***			**					* (3)
TAZENAT	***	**			?	*	?	**				*	
AYDAT	**				oo	**		*				**	*
CHAMBON	*				oo	*		**				**	*
GUERY					*		?	*					
LEMAN	* (2)				**	****		**	**** (2) (3)		***	***	***
ANNECY	* (3)			* (CL)	**	****		***	** (1) (2)		**	****	** (1)
**** exceptionnel *** très rare ** rare * assez rare oo fortement anthropisé	(1) tourbière flottante, (2) canyon du Rhône, (3) résurgence du Boubloz						(1) éponge, (2) biodiversité microbienne, (3) Natura 2000	(1) archéologie (2) histoire des sciences (3) histoire des sciences	(1) légende, (2) miracles				(1) omble chevalier, (2) salmonidés exotiques, (3) salmonidés introduits

(B) barrage, (CL) craie lacustre, (CV) cavité volcanique, (DT) diatomite, (FM) faiblement minéralisé, (GL) origine glaciaire, (LP) lac-pluviomètre, (LM) lac-maar, (LT) lac tourbière, (MM) méromictique, (ST) sténothermique.

Tableau 1 : Particularités limnologiques des lacs du Plateau d'Auvergne : richesse de la biodiversité, valeur des acquis scientifiques, valeur culturelle et économique par rapport aux lacs européens.