

Membres excusés : Mmes et MM., H. BRULÉ, A. CHOMARD-LEXA, P. CRUSSARD-DRUET, T. FEUGA, C. GAULTIER-PEUPION, M. – H. GROJEAN-RENNER, F. HERRIOT, P. HOCH, J. – P. JOLAS, Mme LEONIDES-LESAGE, J.-L. NOIRÉ, G. SCHUTZ, G. SCHWALLER.
Invités : C. BRAZILLET, R. CHALLAMEL, Aur. FEUGA, B. NOIRE.

Le président rend compte des dernières activités de la Société :

Deux personnes non découragées par le temps maussade ont participé à la sortie ornithologique du 6 novembre sur les plans d'eau du nord de Metz. Les hôtes habituels étaient présents mais en faible effectif : grèbes huppés et castagneux, hérons cendrés et grandes aigrettes, canards colverts et chipeaux, fuligules milouins et morillons, garrots à œil d'or.

Nous avons reçu les remerciements de François Grosdidier, maire de Woippy pour notre participation à la semaine de l'écologie qui s'est tenue à la salle Saint Exupéry.

Des représentants du Conservatoire des herbiers du Jardin botanique de Nancy sont venus visiter les herbiers de la Société déposés au local de la rue Pfister. Des travaux seront entrepris au printemps ; avis aux botanistes.

Yves Albertus a fait don à la Société d'une musette de notre regretté collègue Théo Bertrand.

Notre collègue Bernard Feuga, ingénieur géologue, nous entretient d'un problème géologique étudié par plusieurs organismes internationaux dont le BRGM.

Les fuites du barrage du Lar (Iran) par Bernard Feuga

Le barrage sur le Lar est situé à environ 150 km au nord-est de Téhéran, dans les montagnes de l'Elbourz, au pied du volcan Damavand, point culminant de l'Iran. Ce grand barrage en terre à noyau argileux de 105 m de hauteur et de 1100 m de longueur en crête, dont la construction a été achevée en 1980, devait permettre de constituer une retenue de 960 millions de m³ destinée à l'alimentation en eau de Téhéran (où les précipitations ne sont en moyenne que de 150 mm par an) et à l'irrigation des plaines agricoles situées au nord de l'Elbourz, le long de la mer Caspienne.

Le remplissage de la retenue a débuté en mai 1980. Dix ans plus tard, la retenue n'était toujours pas remplie, en raison de fuites dans le sous-sol : la cote de l'eau dans le lac n'a jamais dépassé 2508 m, pour une cote maximale prévue de 2531 m (et une crête du barrage à 2538 m).

Les fuites observées à l'aval, se traduisant par des résurgences très éloignées du barrage, pouvaient atteindre 10 m³/s.

Le Tehran Regional Water Board, propriétaire du barrage, a commandité de nombreuses expertises en vue de résoudre le problème. Ces expertises ont mis en lumière la nécessité de mieux connaître le massif de fondation du barrage. Les sondages réalisés à cette fin ont révélé la présence de cavités importantes dans le sous-sol. Des injections de grande ampleur ont été pratiquées pour combler ces cavités, sans résultat. Devant cet échec, il a été fait appel à de nouvelles expertises, qui ont mis en avant la nécessité de mieux connaître le sous-sol non seulement dans la fondation du barrage, mais dans toute la retenue. Les études géologiques menées à cette fin font l'objet de l'exposé présenté.

L'état de la question avant les études relatives dans cette présentation

Le site du barrage avait été choisi, au confluent du Lar et de son affluent de rive gauche le Dalichaï, qui sont tous deux des torrents de montagne, sur la base de critères topographiques (étranglement, taille du bassin versant déterminant les apports d'eau) mais aussi géologiques. Le site retenu, situé pour l'essentiel dans un contexte de dépôts fluvio-lacustres et de coulées du Damavand, a semblé plus sûr qu'un autre, situé plus à l'amont dans un contexte de calcaires susceptibles de présenter des vides karstiques (cavités de dissolution) et donc d'occasionner des fuites.

La carte géologique régionale a été établie dans les années 1960, à l'échelle de 1/100 000, par un géologue italien, Riccardo Assereto, pour la zone située à l'ouest du futur barrage et par Peter Allenbach, de l'université de Zurich, pour la zone située à l'est. Une cartographie plus détaillée de la zone du barrage a été établie ultérieurement par les géologues iraniens.

L'Elbourz, haute montagne orientée E-W qui borde la côte sud de la mer Caspienne, est une chaîne plissée de type jurassien comportant des terrains sédimentaires allant du Primaire au Quaternaire, au sein desquels

on distingue en particulier une très importante série marine allant du Trias au Crétacé. Il existe ensuite une lacune entre le Crétacé et l'Éocène. La structure de la chaîne est marquée par de nombreux chevauchements du nord vers le sud. Plusieurs épisodes volcaniques ont affecté l'histoire géologique de l'Elbourz, notamment à l'Éocène inférieur, période au cours de laquelle se sont constituées des tuffites, roches volcano-sédimentaires déposées en milieu marin. Ces tuffites, localement d'une belle couleur verte (« Green Beds »), sont largement utilisées dans la construction des villas des quartiers aisés du nord de Téhéran. Mais l'épisode volcanique le plus important se situe au Quaternaire, avec l'apparition et le développement du Damavand, qui culmine à 5671 m. Si les dernières émissions de lave du Damavand sont datées de - 40 000 ans, ce volcan continue d'émettre des fumerolles et est donc toujours considéré comme actif. Le type d'activité du Damavand a varié au cours du temps. Si, à ses débuts, il a produit notamment des nuées ardentes donnant lieu à d'importants dépôts d'ignimbrites, il a par la suite émis de nombreuses coulées de laves proches de trachy-andésites, que les spécialistes nomment « banakites ». Ces coulées ont obturé les vallées existantes, créant des barrages naturels derrière lesquels se sont constitués des lacs. Dans ces lacs se sont déposés des sédiments, avant que, l'érosion faisant son œuvre, les barrages ne soient entaillés par les cours d'eau et que les lacs ne se vident. De nombreux épisodes de ce type se sont fait suite, laissant leur marque dans la succession des couches géologiques qui remplissent les creux du relief préexistant à l'apparition du Damavand. À quelque distance à l'amont du barrage, des sondages ont montré que l'épaisseur des terrains fluvio-lacustres pouvait dépasser 450 m.

De manière simplifiée, on peut dire que dans la zone même du barrage on trouve pour l'essentiel des dépôts fluvio-lacustres récents qui surmontent une coulée récente qui, elle-même, repose sur d'autres alluvions qu'on peut qualifier eux aussi de récents. Plus en profondeur on trouve une coulée plus ancienne qui surmonte d'autres alluvions. En rive droite, toutefois, le barrage s'appuie sur un massif calcaire d'âge crétacé. Ce calcaire, qui plonge en profondeur vers la rive gauche, fait partie de l'épaisse série de terrains de même nature, jurassiques et crétacés, qui constituent le substratum sur lequel reposent les terrains quaternaires qui forment l'essentiel des terrains de fondation du barrage. Ces calcaires, dont l'épaisseur cumulée représente plusieurs centaines de mètres, reposent quant à eux sur des couches du Lias très argileuses, et donc imperméables.

Les sondages profonds ont mis en évidence, sous le barrage, la présence d'un lambeau d'Éocène, à une profondeur telle qu'on pouvait se demander s'il ne témoignait pas d'une structure locale en graben (fossé d'effondrement délimité par des failles). Comme on le sait, les failles constituent souvent des cheminements privilégiés pour les écoulements d'eau souterraine et il était légitime de se demander si une telle structure ne pouvait pas expliquer les fuites du barrage.

La réalisation du barrage a été précédée par celle de nombreux sondages, jusqu'à une profondeur de 100 m. Ces sondages ont mis en évidence la nécessité de réaliser localement des rideaux d'injections en sondages pour améliorer l'étanchéité du massif de fondation. Ces injections ont été pratiquées dans les laves et dans les alluvions, mais non dans le massif calcaire, d'apparence très compacte, constituant l'appui du barrage en rive droite.

Suite à la mise en eau du barrage, deux résurgences sont apparues en aval de celui-ci, dans des terrains calcaires : la résurgence de Haraz, la plus importante (débit moyen de $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$), est située à une quinzaine de km du barrage et existait en fait déjà avant la construction de celui-ci. La mise en eau du barrage a entraîné un accroissement important de son débit. Celle de Galooghah (débit moyen de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$), distante du barrage d'une dizaine de km, ne coule que quand le niveau de la retenue dépasse une certaine cote. Des traçages, réalisés par le Centre d'Études Nucléaires de Grenoble (CENG), devaient montrer que ces fuites prenaient naissance dans la retenue.

Par ailleurs sont apparus, dans la partie de la retenue recouverte par l'eau en période de hautes eaux, de nombreux effondrements de type « fontis », intéressant les terrains fluvio-lacustres et témoignant de la présence, dans les calcaires situés sous ces terrains, de vides de grande taille dans lesquels les matériaux alluvionnaires, non cohérents, ont été entraînés du fait de la charge hydraulique de l'eau de la retenue.

Une recherche des vides proches de la surface situés à l'amont immédiat du barrage a été effectuée. L'obturation de ces vides n'a donné aucun résultat. Il en est allé de même des très importants travaux d'injection, réalisés dans de nombreux sondages forés à partir de plusieurs niveaux de galerie sous le barrage et dans son appui calcaire de rive droite : non seulement ces injections n'ont aucunement réduit les fuites, mais on retrouvait même du coulis injecté dans les sondages dans l'eau des résurgences à l'aval du barrage. Ces travaux, et les sondages de reconnaissance profonds qui les ont accompagnés ont mis en évidence la présence de cavités karstiques dans les calcaires, jusqu'à des altitudes inférieures à 1900 m. À cette profondeur, les cavités recoupées sont de petite taille, mais à des profondeurs plus faibles, elles peuvent atteindre des tailles considérables (plusieurs dizaines de mètres). Cette découverte a nourri l'idée

que les fuites du barrage étaient dues à un réseau karstique récent qui se serait développé du fait du barrage de la vallée du Lar par le volcan.

C'est à ce moment, à la fin des années 1980, que les autorités iraniennes ont lancé un appel d'offres d'études, et éventuellement de travaux, dans l'espoir de résoudre définitivement le problème.

Cet appel d'offres a été remporté par un groupement français piloté par le bureau d'études Hydratec-Setec, auquel étaient associés le BRGM et le bureau d'études ISL, spécialiste des barrages. Les études géologiques relatives dans la suite de cette présentation ont été réalisées par le BRGM dans le cadre du travail confié à ce groupement.

Les études réalisées par le BRGM et leurs résultats

Les études entreprises par le BRGM ont eu pour objectifs d'une part la délimitation, dans le sous-sol, des terrains pouvant se prêter aux fuites et d'autre part la caractérisation et si possible la localisation, au sein de ces terrains, des cheminements empruntés par ces fuites.

Il est tout de suite apparu que, pour atteindre ces objectifs, il fallait s'intéresser à toute la retenue, et même au-delà.

Dans une première étape, on a examiné les potentialités qu'offraient, pour ce qui est des circulations d'eau souterraine, les différents terrains présents dans la région. Cette étape a permis d'éliminer très vite les laves et les alluvions pour se concentrer sur les calcaires, seule formation susceptible de se prêter à des fuites de l'importance de celles auxquelles on était confronté.

Pour délimiter la zone du sous-sol susceptible de se prêter aux fuites, il fallait donc identifier et localiser les limites imperméables du massif calcaire. Ces limites sont de deux natures : le substratum liasique imperméable d'une part ; et l'ancien niveau de base du karst ayant pu se développer dans les calcaires d'autre part. On sait en effet que, dans un système karstique, la dissolution se développe essentiellement dans la zone noyée de manière permanente. Le niveau de cette zone noyée en permanence est déterminé par le niveau de l'exutoire principal du karst (on en a de beaux exemples avec les sources de la Loue ou du Lison en Franche-Comté, pour ne parler que des plus proches). La dissolution ne se développe toutefois pas de manière importante au-delà de quelques dizaines de mètres sous le niveau de saturation. Il suffit donc de déterminer quel a pu être, au cours de l'histoire du karst, le niveau le plus bas qu'a connu son exutoire pour connaître l'altitude en dessous de laquelle le calcaire n'a pas été dissous. Dans le cas du barrage du Lar, ce niveau est déterminé par l'emplacement où le cours ancien du Lar (antérieur à l'apparition des premiers barrages dus au volcan) quittait les terrains calcaires solubles pour gagner les terrains imperméables du Lias.

Les études menées pour délimiter la partie du sous-sol potentiellement karstifiée ont donc comporté deux grands volets :

- un volet faisant appel aux techniques de la stratigraphie et de l'analyse structurale, pour cartographier en particulier le substratum liasique sur lequel reposent les calcaires. Ce volet, qui a comporté beaucoup de travail de terrain, s'est aussi appuyé sur l'examen des carottes des sondages carottés qui avaient été réalisés avant l'intervention du BRGM, qui lui-même a fait forer un petit nombre de sondages complémentaires pour élucider certains points que le travail de terrain et les sondages existants ne permettaient pas d'éclaircir ;
- et un volet visant à reconstituer la paléogéographie de la région, pour déterminer l'ancien niveau de base du karst. Ce second volet s'est appuyé sur l'étude des produits émis par le volcan et sur un examen des terrains fluvio-lacustres, au sein desquels on a notamment recherché les terrasses successives, correspondant à autant d'épisodes alluvionnement - reprise d'érosion.

Ces deux volets ont eux-mêmes bénéficié de l'apport d'une campagne de géophysique visant à préciser la structure du sous-sol dans la zone du barrage et en amont de celui-ci, et notamment à cartographier l'altitude du toit du substratum secondaire (jurassique et crétacé) sous les terrains quaternaires.

L'étude géologique qui, au passage, a rectifié certaines affectations stratigraphiques erronées, a permis notamment de comprendre la structure des terrains anté-quaternaires sur le site du barrage. Il est ainsi apparu que la présence du lambeau d'Éocène découvert sous celui-ci s'expliquait par une structure en pli-faille, conforme au style tectonique régional, et non pas par un mini-graben. On a également montré qu'il n'y avait pas de grands accidents cassants sous le barrage, et que la zone de fuites identifiée dans le massif calcaire (zone de densité particulièrement élevée de cavités recoupées en sondages) correspondait à un axe de pli. On a également démontré la continuité dans la direction est-ouest, de part et d'autre du volcan, des

cœurs d'anticlinaux liasiques constituant la limite inférieure des calcaires potentiellement karstifiés. Enfin, en ce qui concerne les terrains quaternaires, il est apparu que le volcan était beaucoup plus ancien qu'on ne le pensait jusqu'alors, qu'il avait connu une activité polyphasée et que cette activité s'était déplacée progressivement en direction de la zone du barrage. Plusieurs lacs successifs, créés par les coulées du Damavand, ont été identifiés et leurs contours approximatifs dessinés. En ce qui concerne les cours d'eau, le Lar avait, avant l'apparition du volcan, un cours très différent de son cours actuel et s'écoulait approximativement sous ce qui constitue aujourd'hui la zone la plus élevée de l'édifice volcanique. De très importants dépôts alluviaux situés sous les premières émissions du Damavand, observables à l'opposé du site du barrage par rapport au centre de celui-ci, témoignent de la présence à cet endroit d'un paléo-lit du Lar. Enfin, beaucoup plus près du barrage, à l'aval de celui-ci, on a identifié un ancien lit du Lar très proche de son lit actuel.

La campagne de géophysique s'est appuyée essentiellement sur de la sismique-réfraction et des sondages électriques. Son objectif était de cartographier le substratum rocheux sous les dépôts fluvio-lacustres et d'élucider la structure du sous-sol sous les coulées de lave. Cet objectif a été parfaitement atteint puisqu'il a été possible de tracer une carte du substratum, donnant en tout point sa nature et son altitude. C'est ainsi que la limite, constituée par un chevauchement, entre les calcaires du Jurassique et du Crétacé d'une part et le Lias imperméable d'autre part a pu être tracée. Ce tracé confirme, tout en le précisant, celui qui avait été déduit des seules observations géologiques. Par ailleurs, la position de l'ancien lit du Lar, marqué par une gorge très marquée dans le substratum, a pu être localisé. Cet ancien lit recoupe la limite entre les calcaires solubles et les terrains imperméables à une altitude de 1950 m. Cette altitude constitue donc l'altitude du point de déversement le plus bas (c'est à dire le niveau de base) qu'ait connu le système karstique au cours de son histoire. Elle est à mettre en rapport avec les observations faites dans les sondages profonds, qui n'avaient pas recoupé de vides de dissolution importants en dessous de la cote de 1900 m (on se rappellera que la dissolution ne se développe plus au-delà de quelques dizaines de mètres sous le niveau de base).

Pour vérifier la cohérence des conclusions tirées de toutes les observations faites, une reconstitution de l'histoire géologique du site depuis l'apparition du volcan a été effectuée. Pour que toutes les données recueillies puissent y trouver leur place, cette reconstitution paléogéographique a montré qu'il fallait faire appel à au moins huit coulées successives intervenant dans la structuration du secteur du barrage et de sa retenue.

La caractérisation et la localisation, dans le sous-sol, des cheminements empruntés par les fuites de la retenue se sont bien entendu appuyées sur les acquis de l'étude géologique, qui en constituent la base indispensable, mais elles ont également fait appel aux méthodes de la karstologie (la science du karst) et de l'hydrogéologie.

Il a été montré que les vides karstiques se prêtant aux fuites étaient anciens et correspondaient à un karst antérieur au volcanisme du Damavand. Si les manifestations actuelles de ce réseau karstique (les résurgences de Haraz et de Galoogah, où l'eau s'écoule par le réseau de fractures) sont typiques d'un karst peu évolué (rien à voir avec les exutoires majestueux cités ci-dessus), c'est que les exutoires primitifs ont été recouverts par les produits volcaniques. Dans la zone de la retenue, ce karst ancien, qui avait été progressivement colmaté par les dépôts lacustres fins qui se sont déposés dans les lacs successifs dus aux coulées volcaniques, a été réactivé par le début de mise en eau de cette retenue : la charge hydraulique due à l'eau a produit un débouillage d'au moins une partie des conduits karstiques colmatés, offrant un « boulevard » aux fuites en provenance de la retenue. Les effondrements observés dans celle-ci témoignent de ce décolmatage.

L'analyse du régime des résurgences (c'est-à-dire la relation entre leur débit et le niveau du lac) a montré que, pour ce qui est de la principale, celle de Haraz, elle correspondait tout simplement à un mécanisme de vidange du lac, ce qui n'est pas pour surprendre. Par contre, le régime de la résurgence temporaire de Galoogah est caractéristique d'un mécanisme de trop-plein : le conduit alimentant cette source est donc de type « siphon ».

L'étude des temps de transit dans le réseau alimentant les résurgences, fondée sur les traçages évoqués plus haut, a montré que ce réseau comportait des cavités de grande taille réduisant la vitesse moyenne d'écoulement, ce qui ne fait que confirmer ce que les sondages ont montré.

Enfin, la comparaison du régime de la source de Haraz avant et après la mise en eau du barrage (cette source coulait déjà avant la réalisation du barrage) a montré que le réseau qui l'alimente avait subi des modifications géométriques, ce qui peut s'expliquer par le décolmatage évoqué ci-dessus.

Pour finir, l'étude hydrogéologique s'est appuyée sur les mesures piézométriques disponibles. Le niveau piézométrique, mesuré en sondage, n'est autre que l'altitude à laquelle s'établit le niveau de l'eau

souterraine. Il représente ce que les hydrauliciens appellent la charge hydraulique (ou potentiel hydraulique), qui n'est qu'une façon d'exprimer l'énergie de l'eau à l'endroit où elle se trouve. Les écoulements, quels qu'ils soient, et donc en particulier les écoulements d'eau souterraine, se font toujours dans le sens des charges hydrauliques décroissantes (ce qui est normal puisque, du fait des frottements liés à l'écoulement, l'énergie de l'eau diminue au cours de celui-ci). La connaissance de la distribution du niveau piézométrique dans le sous-sol permet donc de déterminer la direction et le sens des écoulements dans celui-ci. L'analyse des quelques données piézométriques antérieures à la réalisation du barrage a ainsi montré que l'écoulement se concentrait alors suivant un tracé proche du lit actuel du Lar. On peut penser que cela correspondait au chenal karstique principal. Alors que les pertes de charge étaient très faibles le long de la majeure partie de ce chenal, ce qui n'est pas étonnant s'agissant d'un chenal qui devait posséder une section importante, minimisant les frottements, elles augmentaient considérablement à proximité de la résurgence de Haraz, ce qui confirme que, l'exutoire antérieur étant obturé, l'eau avait dû se trouver un autre exutoire en s'écoulant dans le réseau de fractures du calcaire, dans lequel les frottements étaient beaucoup plus importants. Mais à proximité immédiate du barrage, l'axe principal de l'écoulement s'écartait significativement du tracé du Lar pour pénétrer profondément dans le massif calcaire contre lequel allait s'appuyer le barrage. Le chenal karstique principal ne se trouvait donc pas à l'emplacement où des vides de grande taille ont été recoupés en sondage sous le barrage, mais nettement plus loin, à l'intérieur du massif calcaire. Les mesures piézométriques effectuées après la mise en eau du barrage n'ont fait que confirmer cette observation. Elles ont montré en outre que les zones de « départ » des fuites, donnant lieu à de véritables « entonnoirs » piézométriques, étaient situées très à l'amont dans la retenue, à une distance importante du barrage. Une relation a pu être mise en évidence entre certaines d'entre elles et les effondrements déjà évoqués à plusieurs reprises.

L'ensemble des observations et études karstologiques et hydrogéologiques effectuées a permis de proposer un schéma, en trois dimensions, du réseau karstique, depuis la retenue jusqu'aux résurgences. Bien que simplifié, ce schéma, qui prend en compte et explique toutes les observations réalisées, mais rien de plus, n'en est pas moins déjà assez complexe. Malheureusement il situe, comme on l'a dit, le chenal karstique principal au sein du massif calcaire de rive droite, à distance du barrage, sous une zone montagneuse qui n'a fait l'objet d'aucun sondage pour des raisons d'accessibilité et n'est donc pas connue dans le détail.

Conclusion

Le réseau karstique responsable des fuites du barrage du Lar s'étend, dans le plan vertical passant par l'axe du barrage, sur une largeur de 2000 m et une profondeur de 600 m. Cela représente une surface six fois plus grande que celle de la plus grande zone karstique jamais traitée au monde auparavant dans une fondation de barrage.

Devant un problème d'une telle ampleur, toute solution envisageable aurait coûté nettement plus cher que le barrage lui-même.

Les autorités iraniennes ont donc renoncé à mettre un terme aux fuites du barrage.

Celui-ci est utilisé, très en dessous de la capacité pour laquelle il avait été conçu, pour l'irrigation de la province de la Caspienne.

~~~~~

Quelques précisions concernant la découverte de *Matteucia struthiopteris* nous sont apportées par Jean-Yvon Picard.

« Depuis de nombreuses années, mes parties de pêche sur la Haute Vezouze m'avaient amené à m'interroger sur un peuplement de fougères, presque pur sur plusieurs centaines de m<sup>2</sup> de surface, installé sur la rive droite de cette rivière, à Haute Seille, à mi-chemin entre Frémonville et Cirey-sur-Vezouze. C'est la lecture de Willemetia n°63, p. 7 qui m'a apporté une réponse sur la nature de cette fougère découverte par G. Chevallier, mais dont l'indigénat semble douteux. Dans le n° 66 de la même revue, p. 6, Gaye et Lecaye la signalent à Val-et-Châtillon c'est-à-dire à quelques kilomètres en amont de la station de Haute Seille. Je précise que la station est de toute beauté, notamment en fin de printemps lorsque les frondes sont épanouies et que les rameaux fertiles ne sont encore pas développés. Il est étonnant que cette fougère ne se retrouve pas en aval sur la même rivière. Plus de biotope compatible ?? »