

RECOMMANDATIONS POUR L'ETUDE GEOLOGIQUE D'UN SITE DE BARRAGE

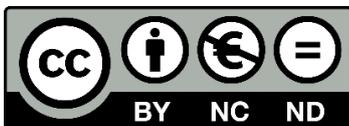


Barrage des Olivettes
© Bernard COUTURIER

Pierre ANTOINE (ancien membre du CTPBOH)
Bernard COUTURIER (membre actuel du CTPBOH)

Recommandations pour l'étude géologique d'un site de barrage

ISBN 979-10-96371-10-5 – dépôt légal 1^{er} trimestre 2020



Cette œuvre est sous licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 3.0 France. Pour accéder à une copie de cette licence, merci de vous rendre à l'adresse suivante

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr>.

En couverture : Barrage des Olivettes

© Bernard COUTURIER

RECOMMANDATIONS POUR L'ETUDE GEOLOGIQUE D'UN SITE DE BARRAGE

Pierre ANTOINE (ancien membre du CTPBOH)
Bernard COUTURIER (membre actuel du CTPBOH)

Ces réflexions font suite aux enseignements que nous avons reçus de notre prédécesseur au Comité technique permanent des barrages de l'époque, le Professeur Reynold Barbier. Il nous avait, en son temps, initié à la Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques, par de nombreux exemples qu'il avait vécus à travers le monde. A la suite de Maurice Gignoux, contemporain de Maurice Lugeon, il fonda une « Ecole grenobloise de Géologie appliquée » laquelle a formé bon nombre de géologues intéressés par le Génie civil.

L'évolution des idées dans le domaine des études préalables à l'édification des barrages, conduit actuellement, dans l'esprit de certains, à minimiser la part de la géologie dans les dossiers. Les causes en sont probablement de deux ordres :

- actuellement, faute d'une formation universitaire adaptée et du fait de la prédominance de l'informatique dans tous les domaines (il existe des logiciels pour tout) la nécessité de l'approche géologique, naturaliste, d'un site de barrage à tous les stades des études et de la construction n'est plus perçue comme essentielle car bien trop « artisanale » ;
- l'emprise croissante de considérations financières (problème actuellement général dans toutes les activités humaines) pousse dans le même temps à considérer que, pour le résultat que l'on peut en espérer, les études géologiques représentent du temps et de l'argent perdu...d'autant plus qu'il s'agit en fait de l'avis d'experts et non pas de calculs nets et précis.

Cette opinion se manifestait il y a déjà longtemps. Au début des années soixante, Jean Biarez introduisait son cours de Mécanique des sols aux étudiants de l'Ecole d'Hydraulique et de l'Université de Grenoble à peu près en ces termes : « ... Jusqu'à maintenant ni les maîtres d'œuvre, ni les maîtres d'ouvrage ne ressentent le besoin d'études géologiques et géotechniques, vu que ce sont des assurances qui les couvrent vis-à-vis des aléas de la construction. Toutefois, le coût des sinistres augmentant, les assurances recherchent maintenant le service d'experts pour limiter les remboursements de difficultés relevant plutôt de l'insuffisance d'études.». Il concluait en annonçant aux élèves qu'un besoin croissant de leur savoir était prévisible avec l'augmentation des besoins d'études. Ce fut amplement vérifié par la suite.

A la même époque R. Barbier, avait coutume de dire qu'il était très difficile de faire reconnaître la qualité d'une étude géologique dans le cas d'un barrage. Si tout se passe bien, on ignore généralement la part que le géologue a pris à la réussite constatée, car elle ne se manifeste nulle part, à la différence de la conception des ouvrages, lesquels, eux, sont très visibles. Pour une raison un peu similaire, lors du projet de barrage de Sélingué au Mali, tributaire de fonds extérieurs, les généreux donateurs internationaux ne se battaient pas pour financer les travaux se passant en fondation (et dans le cas particulier les vrais problèmes se tenaient là), car cela ne se voyait pas et ne permettait pas l'affichage de leur générosité.

Actuellement une tendance pire se dessine, en filigrane, dans quelques appels d'offre récents (hors de France). Les décideurs qui gèrent les dépenses des maîtres d'ouvrage ont une tendance marquée à préférer, et imposer, les solutions « clés en main » pensant ainsi faire des économies. Cela signifie que lors d'un appel d'offre pour un suivi de travaux par exemple, le marché « prévoit » les aléas

susceptibles de se révéler en cours d'exécution lesquels, seuls, seront considérés comme recevables au titre de réclamation. Les travaux et dépenses correspondantes seront uniquement rétribués (on se demande alors qui a fait les choix et aux termes de quelles négociations !). Pour la géologie il en va ainsi, du nombre de visites d'experts, de forages complémentaires, des essais et de leur nature etc. En cas de demandes imprévisibles, fréquentes en conséquence des aléas classiques d'un chantier de construction, la réponse est imparable : non ce n'est pas prévu au marché ! ***C'est certes un bon moyen de faire des économies mais également de faire bon marché de la sécurité du public en aval du barrage.***

C'est bien parce que de telles dérives nous paraissent dangereuses que nous avons décidé de contribuer à un effort de réhabilitation de la Géologie des barrages. Nous aimerions que ce souci puisse atteindre les responsables des enseignements universitaires. Les applications de la géologie ont en effet disparu des programmes depuis de nombreuses années, sous prétexte qu'il ne s'agit pas de science fondamentale selon les concepts du CNRS. « C'est tout juste bon pour des ingénieurs » comme l'a dédaigneusement prononcé un futur ministre lors d'une réunion à Grenoble, à laquelle l'un de nous deux participait et présentait les recherches appliquées de son équipe.

Si nombre de personnes attendent généralement que l'université inculque un savoir professionnellement utilisable, dans le même temps les bâtisseurs et aménageurs regrettent de recevoir des candidatures de diplômés qui ne correspondent pas à leurs besoins. Les sectaires de la Science se cramponnent à la conception que le but de l'enseignement supérieur est d'apprendre à apprendre, alors que les utilisateurs potentiels des diplômés n'ont ni la vocation, ni le désir, ni le temps d'apprendre à ces jeunes gens à travailler concrètement.

I – REMARQUES GENERALES EN GUISE DE PREAMBULE

Un premier point est de préciser clairement ce qu'est la géologie appliquée au Génie civil et ce qu'un maître d'œuvre doit en attendre.

Le terme de Géologie recouvre en fait un ensemble de disciplines variées qui contribuent à la description et à la compréhension du milieu naturel minéral. La plupart de ces disciplines, par ex. : minéralogie, pétrographie, stratigraphie, sédimentologie, analyse structurale, tectonique, géomorphologie ... peuvent intervenir à des degrés divers dans une étude de site de barrage.

Toutes sont susceptibles d'être mises à contribution pour comprendre les caractéristiques d'un site et mettre en évidence celles qui concernent directement la conception même du projet de Génie civil.

Un géologue de barrages peut être amené à intervenir n'importe où dans le monde et notamment hors des régions dont la géologie lui est familière. Dans bien des cas, il ne sait pas à l'avance quels types de problèmes géologiques il va rencontrer. Sa culture géologique et son savoir-faire doivent donc lui permettre de se débrouiller dans n'importe quel contexte géologique sans risquer de commettre de grosses erreurs. Il ne peut évidemment pas être un spécialiste de toutes les disciplines mentionnées ci-dessus, mais il est préférable qu'il en ait une connaissance suffisante, ou que sa méthode de travail lui permette, au moins dans un premier temps, de reconnaître et de surmonter ses éventuelles lacunes. Quand des collègues géologues universitaires posaient à l'un de nous la question : quelle est votre spécialité ? La réponse était donc invariablement et volontairement : ***je suis un spécialiste de la généralité***, ce qui faisait forcément très mauvais effet.

Un second point est essentiel : le géologue de barrage doit être un partenaire de l'étude de même que l'hydrologue, le spécialiste des bétons, celui (ou ceux) du calcul des ouvrages, ou celui de la construction des ouvrages et de l'organisation des chantiers... Comme généralement il ne peut être envisagé, pour la géologie, de faire intervenir un spécialiste de toutes les disciplines de cette science il est nécessaire que le géologue ait une culture suffisante afin de décider, si nécessaire, de recourir à des spécialistes, de les choisir, de contrôler leurs résultats. Sa position est alors un peu comparable, dans le cadre de la géologie du site, à celle du chef de projet lequel doit être « un chef d'orchestre » assurant une coopération optimale des divers intervenants dans un but unique : la réussite du projet.

Le géologue doit donc normalement être le seul interlocuteur du chef de projet, en matière de géologie. Il faut qu'il puisse répondre à toutes ses interrogations concernant la connaissance des terrains et leurs caractéristiques. Il y a une contrepartie évidente à tout cela : le géologue doit avoir une connaissance suffisante des études et des ouvrages pour dialoguer avec le chef de projet et ses collaborateurs. Par contre, il faut bien savoir que les mécaniciens des roches, des sols ou les géophysiciens n'ont pas généralement la formation nécessaire pour la compréhension globale du terrain. Il y a là un point délicat pour le futur, puisqu'il n'est pratiquement plus donné de formation géologique de terrain dans l'enseignement supérieur français et que la confusion s'établit souvent entre ces spécialistes (géotechniciens ou géomécaniciens) et le géologue. Pour cette raison il est arrivé que des bureaux d'études aient fait appel à des géologues compétents, formés à l'étranger ! Ceci est un comble quand on pense à la diversité des contextes géologiques que l'on rencontre dans notre pays, particulièrement propice à la formation de géologues de terrain.

Pratiquement donc, il est souhaitable que le géologue chargé de l'étude fasse lui-même l'interprétation de tous les travaux de reconnaissance jugés indispensables pour affiner la connaissance géologique du site. Cela est absolument essentiel pour une raison bien simple : ***seul le géologue de terrain qui s'est imprégné de toutes les subtilités du site et en a compris l'importance vis-à-vis du projet, est à même de tirer le meilleur parti des travaux des sous-traitants et d'orienter les reconnaissances complémentaires. Lui seul sait ce qu'il convient de rechercher.*** Son étude

préalable du terrain lui a en effet permis de découvrir les points cruciaux vis-à-vis du projet, que l'on peut qualifier d'inconnues, qu'il faut absolument lever à l'aide de moyens appropriés. ***Les sous-traitants, quelle que soit leur valeur et la qualité de leur travail et de leur matériel, n'ont pas la connaissance géologique d'ensemble du site leur permettant une interprétation valable et complète de leurs travaux.***

Par ailleurs il faut bien voir qu'à l'heure actuelle où matière à contentieux peut être recherchée à tous les niveaux (le plus souvent dans le but d'esquiver par avance toute responsabilité), le fait suivant paraît admis : ***dès l'instant que telle ou telle étude prévue au marché, a été faite, dans les conditions techniques généralement acceptées, et a fait l'objet du rapport attendu, rien ne peut être reproché à l'entreprise. Elle a respecté le marché lequel, ne définit évidemment pas ce qu'est un résultat jugé valable. Si un représentant du maître d'ouvrage ou un expert extérieur découvre des erreurs, on risque la réponse suivante : cela est votre interprétation, ce n'est pas la nôtre...***

En conséquence et pour être clair : l'étude géologique d'un site ne devrait faire l'objet d'une rubrique isolée dans un marché sans que son contenu et ses objectifs ne soient définis. Mais comme de toutes façons la qualité de l'étude ne pourra être jugée qu'après mise en eau de l'ouvrage...

Le troisième point constitue en fait la justification de l'étude : son objectif est de parvenir à la compréhension géologique d'ensemble du site, laquelle relève d'une démarche très particulière développée ci-après.

II – CE QU'IL FAUT SAVOIR

Que doit apporter l'étude géologique ?

La construction d'un barrage modifie profondément l'équilibre des conditions naturelles qui font que le site est ce qu'il est. Il conviendra bien sûr de jouer avec ces données naturelles pour la meilleure adaptation de l'ouvrage au site, gage d'économie et de sécurité.

Auparavant il faut bien définir *ce que signifie le terme de site* pour le géologue. Il dépasse en fait, très largement, l'échelle de l'ouvrage prévisible (qui sera celle de l'ingénieur projeteur), atteignant parfois, une échelle régionale. Cela se comprend aisément en considérant, par exemple, l'existence de la future retenue, laquelle va modifier les conditions aux limites des écoulements souterrains sur des surfaces et des distances parfois considérables par rapport aux dimensions de l'ouvrage (un cas extrême est celui des terrains karstiques). Sans aller jusque-là, il est fréquent que des détails structuraux (failles ou plis) ne puissent être détectés, étudiés et compris que très au large du barrage. Dans ce cas la carte géologique, ou une carte proprement structurale du site, doit figurer de tels détails .

Une contrainte fondamentale de l'étude géologique est partagée avec les géotechniciens : il s'agit de l'effet d'échelle. On sait que les caractéristiques mécaniques de résistance d'une masse rocheuse varient selon le volume considéré. Dans le cas d'un appui de barrage ***on ne peut raisonner uniquement en termes de roches*** (échelle de l'échantillon), mais il faut passer à une échelle supérieure (celle du barrage, voire celle de la retenue), c'est-à-dire qu'il faut considérer globalement ***le massif rocheux***. Celui-ci est un ensemble complexe qui associe la roche (c'est-à-dire le ***faciès rocheux***), ses ***altérations*** (elles en minorent les caractéristiques de résistance mécanique) ainsi que les ***discontinuités*** de toute nature qui l'accidentent (du litage sédimentaire aux fractures d'origine tectonique, à la schistosité et/ou foliation métamorphique).

Il ne faut jamais perdre de vue qu'un massif rocheux, considéré sous l'angle de ses réponses possibles aux sollicitations exercées par un barrage, est l'association de ces composants, sans oublier l'eau qui en imprègne les vides. La déformabilité du massif dépend donc de la réponse de ces quatre composants (trois fixes et un mobile) que l'étude géologique devra nécessairement mettre en évidence.

Bref rappel des méthodes de travail du géologue

D'une façon générale, on peut considérer que le site étudié résulte d'une somme d'actions qui se sont exercées sur des matériaux variés, d'origine minérale, au cours de périodes de temps extrêmement longues. Le géologue est donc contraint de rechercher parmi d'innombrables facteurs (éventuellement accessibles à des calculs ou à des constructions géométriques) ceux qui expliquent au mieux la constitution du site tel qu'il est. Il sait toutefois qu'il en ignorera beaucoup d'autres. Le modèle naturel de terrain qu'il proposera au projeteur ne sera jamais qu'une version simplifiée du réel. Son objectif principal est, dans la mesure du possible, d'identifier les facteurs critiques relatifs au projet puis, les connaissant, d'esquisser la représentation en volume des constituants du site conditionnant le jeu de ces facteurs.

Une telle approche, probabiliste dans son esprit, doit finalement permettre au projeteur d'adapter au mieux son propre modèle à ce modèle géologique naturel simplifié et d'en tirer les conséquences constructives les mieux adaptées.

La réussite de l'établissement d'un modèle géologique du site permettant d'aboutir à cette convergence repose sur :

- **la culture et l'expérience du géologue en matière de travail sur le terrain.** Il lui faut faire preuve de connaissances très générales en géologie, car les projets peuvent intéresser n'importe quel type de terrains, dans n'importe quelles conditions structurales et n'importe quelles conditions climatiques ;
- **une capacité (et une volonté) d'observation allant, si nécessaire, jusqu'au niveau du détail,** laquelle ne peut s'acquérir qu'avec une longue pratique et une bonne connaissance des ouvrages et de leur construction. Elle ne peut être remplacée par aucun savoir théorique, même « pointu ». Au niveau de la formation initiale du géologue, **la pratique des levés de terrain est par conséquent absolument indispensable** si l'on a en vue des applications à des travaux, quels qu'ils soient. Une adaptation sera toutefois nécessaire pour passer des techniques de levé aux petites échelles habituelles (1/25 000), à ceux à plus grande échelle courantes en génie civil (1/5000 à 1/200) ;
- **une idée très claire de la contribution décisive apportée par la cartographie géologique** lorsqu'elle est bien faite, à la mise au point du modèle naturel du site. Ceci peut s'exprimer en disant que la carte géologique est de très loin le meilleur document synthétique possible par la masse d'informations dont elle rend compte sous une forme extrêmement condensée. Document à deux dimensions, elle permet en fait de passer facilement à trois dimensions pour qui sait la lire et par le biais de coupes ;
- **la conscience que l'un des objectifs principaux de la carte, dans l'optique de l'établissement d'un modèle géologique du site, est de définir les inconnues d'ordre géologique ou géotechnique,** qui conditionneront certains détails pour la bonne réalisation de l'ouvrage projeté. Il faudra généralement les déterminer par des moyens complémentaires appropriés (travaux de reconnaissance au sens large lesquels devront répondre aux questions posées et ne pas être systématiques). Par inconnue, on entend tout détail géologique, anodin en apparence ou qui échappe à l'étude de surface, mais qui conditionne un aspect incontournable de la stabilité ou de l'étanchéité de l'ouvrage ;
- **le caractère forcément évolutif de la connaissance géologique de la phase des études à la construction de l'ouvrage.** Les inconnues à lever deviendront généralement moins nombreuses, plus précises et mieux définies à mesure que le projet ou le chantier progresseront, mais il en surgira souvent d'autres plus ou moins attendues. Ceci implique donc une adaptation des reconnaissances complémentaires jusqu'à ce que le degré de fiabilité et de précision recherché soit atteint ou estimé tel. Ceci impose un phasage de l'évolution de la connaissance géologique du site. Il ne faut jamais perdre de vue que la phase de construction sera, nécessairement, la plus riche en informations géologiques nouvelles à cause de la mise à jour du terrain. Elle devra donc être particulièrement suivie sur le plan géologique (un sommet d'absurdité dans le genre est atteint lorsque des financiers fixent préalablement au démarrage des travaux, une limite budgétaire au coût de cette phase de réalisation en imposant un marché se voulant exhaustif en prévoyant **à l'avance** le détail **qualitatif et quantitatif** de tous les travaux et suivis d'experts, promis à rétribution. Ceci

conduit à la stupidité suivante qu'à chaque situation nouvelle révélée par l'avancement des travaux (et cela est très fréquent), des reconnaissances complémentaires seront généralement nécessaires mais elles seront alors refusées puisqu'elles ne peuvent évidemment pas figurer explicitement au marché préétabli. Nous avons connu cela récemment.

Ceci étant le travail sur le terrain du géologue s'organise autour des points suivants :

- ***analyse de la morphologie du site*** : l'observation et l'analyse des formes du terrain constitue sans doute la démarche la plus importante au début de l'étude du site. La morphologie du site est en fait la réponse la plus visible des constituants géologiques aux actions érosives subies au cours de son histoire géologique (dans ce cas il s'agit bien entendu de l'histoire récente – en France, par exemple, elle sera le plus souvent, limitée aux phases glaciaires et post glaciaires du Quaternaire). L'analyse de la morphologie (lecture de paysage) est donc la toute première étape de l'étude géologique car elle met généralement sur la piste de la nature des différents terrains (les durs en relief, les tendres en creux) et éventuellement des instabilités ou des circulations d'eau souterraine. Cette phase est évidemment essentielle lors des études préliminaires lorsque l'on recherche l'emplacement le plus favorable pour l'ouvrage parmi plusieurs options. R. Barbier était très apprécié à ce stade préliminaire, lequel conditionne souvent l'économie future du projet (nous-même avons pu éliminer d'emblée des sites à partir de ce simple examen). La morphologie peut en révéler des vices cachés comme l'existence de vallées fossiles ou de glissements de terrain très anciens, d'apparence anodine, car stabilisés, voire la présence en profondeur de terrains solubles très perméables ;
- ***identification des divers faciès rocheux*** ainsi que de leurs variations possibles (altérations, écrasement tectonique) avec, en arrière-plan, leur résistance mécanique, leur sensibilité aux tassements, et leur perméabilité ;
- ***étude de la fracturation des massifs rocheux*** à diverses échelles pour juger de son incidence sur leur stabilité sous les forces exercées par l'ouvrage, ainsi que sur sa conductivité hydraulique, notamment une fois la retenue remplie ;
- ***estimation de l'importance de l'altération et de la décompression naturelle*** des versants afin de déterminer le volume des fouilles (en fonction évidemment du type d'ouvrage prévu) et prévoir les reconnaissances appropriées dans ce but ;
- ***détermination des possibilités de circulation de l'eau souterraine*** en fonction des nouvelles conditions aux limites imposées par la retenue et les modifications que vont nécessiter la conception du traitement des fondations et du massif rocheux. L'accent est généralement mis sur les circulations aux abords immédiats du barrage là où les gradients sont les plus élevés. Il faut, selon les cas, considérer dans son ensemble, le territoire de la future retenue pour estimer la possibilité de fuites au large vers des vallées adjacentes, s'il y en a ;
- ***examen des versants sous l'angle de leur stabilité***, notamment pour l'estimation des conséquences du marnage de la retenue ;
- ***repérer les gisements possibles de matériaux de construction avant toute étude géotechnique.***

De l'importance de la connaissance approfondie de la géologie d'un site

Une part importante de la compréhension des caractéristiques géologiques d'un site vis-à-vis d'un projet donné consiste en une interprétation correcte des faits, éventuellement inattendus, établis par les campagnes de reconnaissance. Ceci n'est pas à la portée d'un géologue sous-traitant qui n'intervient que ponctuellement sur un (ou des) sondages particuliers. Cette observation ne met aucunement en cause la qualification des techniciens en question (géotechniciens ou géomécaniciens) lesquels, n'intervenant qu'à un stade déjà avancé des études et n'étant pas formés pour cela, ne peuvent avoir la connaissance détaillée de l'ensemble des conditions géologiques du site, puisque cela ne relève pas de leurs attributions.

Un exemple intéressant nous est fourni par un site de barrage établi sur le flysch (formation géologique généralement schisteuse) nord-pyrénéen. Ce dernier était lithologiquement très homogène, sous un faciès quasi-ardoisier. L'examen du terrain ne montrait pas grand-chose, à cause de la végétation. Les sondages de reconnaissance furent alors établis, par le géologue chargé de l'étude du site, sans ligne directrice particulière, en les espaçant régulièrement selon l'axe du futur barrage. Le premier de ces sondages, avec essais d'eau, était situé en haut de la rive gauche. La première coupe envoyée au bureau d'études était conforme à ce que l'on attendait, c'est-à-dire qu'elle montrait des schistes ardoisiers pratiquement indemnes de fractures et parfaitement étanches. Toutefois une « anomalie » de taille apparaissait sur la coupe : une passe de l'essai était indiquée comme donnant une « perte totale », ce qui était impensable dans ce type de terrain. Renseignement pris, ni le matériel, ni le mode opératoire ne pouvaient être incriminés. On passa donc au sondage suivant situé un peu plus bas. Et là, rigoureusement même configuration avec de nouveau l'étanchéité de toutes les tranches d'essai, sauf une. Le phénomène se répéta à l'identique sur les deux derniers sondages de la rive gauche ! L'explication s'esquissa en dessinant une coupe de l'appui : tous les niveaux en « perte totale » étaient rigoureusement alignés avec la même pente que les couches du flysch. Il devenait évident que la perte relevait d'une caractéristique d'une couche particulière. L'examen des carottes donna la clef de l'anomalie. Dans les flyschs les matériaux constitutifs des strates sont très souvent **granoclassés** c'est-à-dire qu'à la base de certaines d'entre elles se trouvent des séquences de granulométrie plus grossière, décroissant de la base vers le haut. Ceci est un effet des courants de turbidité à l'origine du dépôt. Ici le responsable de la perte était un niveau, de 3 à 5 cm d'épaisseur, d'un grès fin, rougeâtre (oxydation par les circulations d'eau souterraines naturelles), témoignant de la perméabilité de cet unique niveau au sein d'un ensemble imperméable, aggravée par de fines fissures verticales dues à la fragilité du niveau gréseux par rapport aux schistes noirs encaissants. Il était donc hors de question d'envisager la réalisation d'un écran d'étanchéité sous l'ouvrage (de faible hauteur). A la rigueur il restait toujours possible, en cas de manifestation de sous-pressions dans le terrain de fondation, de réaliser quelques puits de décompression pour régler le problème. Il ne fut pas nécessaire d'aller jusque-là puisque le projet ne fut pas réalisé pour de toutes autres raisons.

III - LA CARTOGRAPHIE GEOLOGIQUE

L'étude géologique d'un site de barrage doit fournir au projeteur une vision d'ensemble des données proprement géologiques qui lui permettront de choisir les partis techniques les mieux adaptés au terrain. Le meilleur document qui puisse présenter d'une façon synthétique ces données, sous un volume restreint et facile à consulter, est la carte géologique et nous allons expliquer pourquoi et comment.

Celle-ci, parfois absente des dossiers, n'est rien d'autre que la représentation sur un fond topographique approprié, de la distribution en plan des divers types de terrains et des détails structuraux qui en assurent l'architecture en volume (plis, failles...). Il est évident que le passage de la représentation plane à la représentation en volume nécessite un savoir-faire et un bon entraînement. Dans le cas des ouvrages de Génie civil, ce passage est fondamental car il sous-tend le choix du parti que fera le projeteur selon la représentation en volume et en qualité des terrains de fondation qui lui est proposée. L'importance économique est évidente.

Outre l'expérience du géologue, la qualité du levé géologique dépend de facteurs évidents et souvent perdus de vue :

- **La précision du levé** est avant tout influencée par la qualité du fond topographique. Ce dernier doit être à la fois **fidèle** et **précis**. La fidélité caractérise la représentation correcte de la morphologie du terrain (reliefs de toute nature, réseau hydrographique...) et des détails planimétriques (routes, chemins, constructions, arbres...). Ceci est essentiel car il ne faut pas oublier que le levé géologique se fait (sauf exception) à vue, sans autre instrument que la carte et la boussole, voir l'altimètre. Le géologue a donc besoin de repères de terrain nombreux et fiables afin de pouvoir déterminer précisément, à chaque instant, où il se trouve afin de reporter exactement ses observations sur la carte. Ceci est actuellement facilité par l'agrandissement de photos aériennes (mais le relief n'y apparaît pas) et, dans certains cas, par des mesures GPS. Ceci n'est toutefois pas le cas général. Quant à la précision du fond topographique, c'est celle des mesures du topographe et elle est généralement assurée.
- **Le choix et la nature des éléments géologiques figurés**. Sans entrer dans ce qui ressort du savoir-faire professionnel du géologue, nous insisterons sur ce qui caractérise les applications au Génie civil. Il s'agit en fait de toutes les observations qui faciliteront le passage de la vue en plan à la vue en volume. Ainsi les limites de terrains différents doivent être figurées avec la plus grande précision. Les indications de pendage doivent être nombreuses et figurées en direction et en inclinaison. Elles concernent généralement les strates du terrain ou la schistosité des formations métamorphiques. Les plans de fractures susceptibles de conditionner l'architecture du site feront l'objet d'une attention particulière. Il ne faut jamais oublier qu'à l'échelle des travaux il est souvent possible de procéder, sur un fond topographique correct, à des constructions géométriques simples qui permettent d'accéder très économiquement à la troisième dimension. Il est souhaitable de figurer toute fracture susceptible d'être prise en compte sans toutefois surcharger inutilement la carte.
- **La représentation de détails spécifiques** tels que les sources, les suintements ou sorties d'eau temporaires, les cavités, les indices de mouvements de terrains, la délimitation des terrains meubles de couverture et du substratum rocheux, les blocs éboulés (d'une taille suffisante), les zones de roche altérée et celles écrasées tectoniquement... seront soigneusement notées. Seront également indiqués les points de prélèvement d'échantillons et les travaux de reconnaissance (s'il y a lieu).

Présentation finale de la carte en vue de publication dans un rapport

Au bout du compte, comme déjà dit, la carte géologique est le document synthétique principal de l'étude géologique. C'est donc comme telle qu'elle doit apparaître dans les rapports géologiques ou les dossiers de projet. Elle ne doit pas être considérée comme un simple document contractuel qui doit nécessairement figurer dans un dossier, sous quelque forme que ce soit, ou destiné, si son esthétique le permet, à décorer quelque bureau...

Elle doit avant tout, être lisible et comprise, que ce soit par le projeteur, par des membres de services de contrôle ou par des experts extérieurs. Il n'est rien de plus agaçant pour un lecteur occasionnel que d'être obligé de déchiffrer un document sur lequel on ne trouve pas très rapidement des détails mentionnés dans le texte, essentiels à la compréhension de celui-ci.

Ceci impose que le graphisme soit clairement lisible. La nature des terrains doit être représentée par des teintes « à plat », claires et suffisamment légères pour ne pas masquer le fond topographique. Le lecteur avisé doit pouvoir passer de la vue en plan à la perception des volumes sans avoir besoin d'une loupe ou de déchiffrer la topographie parmi un fouillis d'autres figurés. A ce propos, la représentation de la nature des terrains par des figurés graphiques tels que hachures de toutes sortes, petites croix, pointillés et autre fantaisies que permettent les ordinateurs, doivent être absolument proscrites.

Le format de la carte doit, au moins, être celui utilisé pour la représentation globale des ouvrages. Elle doit figurer en annexe, pliée et jointe au dossier. Toute réduction à un format A3 voire A4 ! pour insertion dans un dossier (si facile actuellement avec la numérisation des documents), la rend illisible et publier un tel document n'est pas respectueux du lecteur. Cela doit donc être prohibé. Lorsque ce genre de réduction est utilisé, cela signifie que les auteurs du dossier manifestent clairement qu'ils ne pensent pas que ce document sera lu (et peut-être qu'à leurs yeux, il n'en vaut pas la peine).

Il n'est pas superflu de rappeler qu'une carte géologique comporte une légende complète des couleurs et des figurés ainsi que la mention d'une échelle graphique et du Nord géographique.

Quelques techniques permettant d'enrichir l'apport de la carte géologique

La géologie est une science naturaliste. Ce terme n'est pas péjoratif mais indique simplement que la géologie privilégie l'observation. La portée des mesures et du calcul y est souvent limitée, notamment aux échelles des études régionales classiques. Dans le cas présent toutefois, il est nécessaire d'adopter un point de vue différent puisque la géologie est mise au service d'un projet de Génie civil. Celui-ci recherche un optimum de connaissance dans un but économique et sécuritaire. La quantification est donc nécessaire. Ceci s'applique à certaines données de la géologie et le géologue n'échappe pas à ce souci. Il dispose pour cela de quelques techniques qu'il convient de rappeler. Certaines sont utilisées couramment dans les études géologiques de sites de barrage et leurs principes et limites doivent être connus.

Les constructions graphiques. Il s'agit de méthodes très simples qui permettent de tracer géométriquement l'intersection d'objets géologiques plans avec la surface topographique, tels que faille, couche sédimentaire, plan de schistosité. Cela permet donc de tracer, si nécessaire, le contour cartographique probable de l'objet en question, c'est-à-dire l'intersection du plan considéré et de la surface topographique, à partir d'un unique point d'observation cartographiquement bien localisé (en x,y,z). Cela permet d'orienter ou de vérifier le travail de terrain. Dans certain cas, cela peut même aller jusqu'à économiser des reconnaissances plus coûteuses. Deux conditions sont essentielles : le fond topographique doit être fidèle et à relativement grande échelle, et l'objet géologique doit être plan sur tout l'espace du tracé. Ces deux conditions sont très souvent remplies à l'échelle des

ouvrages de Génie civil. La méthode est particulièrement utile pour construire, par exemple, sur la carte, le tracé théorique d'une faille observée en un point de la surface, puis de construire son intersection avec un plan de coupe relatif à un ouvrage.

Une fois le principe connu, il en découle toutes sortes d'applications qui peuvent économiser des reconnaissances ou faire gagner du temps.

Les relevés de fracturation et la représentation stéréographique.

En roches homogènes (granites, gneiss, calcaires massifs...) la stabilité des massifs rocheux d'appuis de barrage est conditionnée majoritairement par les fractures (discontinuités) qui les affectent. On peut n'avoir qu'une seule fracture, très critique, comme le plan aval du dièdre de Malpasset. Sa détection ne sera pas forcément évidente et l'on pourra être grandement aidé par la méthode précédente, si la fracture est visible en un point facilement localisable. A Malpasset par exemple, parmi les reconnaissances réalisées après la catastrophe, l'unique sondage carotté réalisé à l'amont du barrage a recoupé quatre plans enduits de mylonite tout à fait comparables à celui responsable de la catastrophe. Il était évidemment facile d'identifier après-coup lequel correspondait au plan aval du dièdre, puisque son existence et ses caractéristiques géométriques avaient été révélées par la catastrophe. Cela eut été totalement impossible lors des études préliminaires.

Un tel cas se rencontre souvent à ce stade des études. Lorsque l'on doit traiter de la stabilité d'un appui on est le plus souvent confronté à l'existence de nombreuses discontinuités parmi lesquelles l'identification de la plus critique est généralement très délicate. Recenser sur le site et mesurer (direction et pendage) un grand nombre de fractures et les représenter de façon symbolique (méthode statistique) est alors tout à fait insuffisant si des observations de surface ne mettent pas sur la piste de la plus dangereuse. La méthode la plus courante pour représenter la fracturation d'un site est en effet d'utiliser des canevas de projection stéréographique (canevas de Wülf, hémisphère supérieur, qui est le plus parlant). Chaque fracture est représentée, dans un plan équatorial d'une sphère de référence, par un point dont la position est fonction de la direction et du pendage d'une normale au plan.

On obtient alors un semis de points parfois homogène (s'il n'y a pas de direction de fracture privilégiée) mais au sein duquel on observe fréquemment des regroupements (nuages de points) indiquant l'existence de familles de fractures distinctes dont les rapports géométriques (intersections notamment) peuvent être facilement mesurés.

Le canevas permet donc une quantité d'opérations de géométrie dans l'espace très rapides et très précises que tout géologue doit maîtriser, comme la détermination de la direction et de l'inclinaison de la ligne d'intersection de deux plans (par exemple l'arête du dièdre de Malpasset). Ceci est le premier pas de la démarche de modélisation de volumes rocheux en vue de l'application de la méthode du coin rocheux par exemple. Il est également possible de représenter sur le canevas les cercles de frottement inhérents à certains plans pour diverses valeurs de l'angle de frottement et d'y positionner la résultante de plusieurs forces en vue d'études de stabilité.

La détermination de la plus critique d'entre elles du point de vue de la stabilité, ne peut alors résulter que d'une approche graphique inspirée de la méthode du « coin rocheux de Londe », mais ne nécessitant pas le recours à l'ordinateur. Il faut d'abord s'assurer que le « coin rocheux » identifiable d'après le canevas existe bien sur le terrain. On n'oubliera pas à ce propos que les points d'un canevas ne représentent jamais que la projection de l'intersection de la normale à un plan avec la sphère de référence, sur un plan équatorial de celle-ci. Cela ne peut donner aucune indication sur la taille du volume rocheux délimité à partir de points du canevas. En effet, puisque la seule référence est la normale au plan, la disposition des points représentatifs est la même pour un petit volume que pour un gros géométriquement homothétique! Il faudra donc s'assurer sur le terrain que le volume

perceptible sur le canevas correspond bien à une réalité du terrain susceptible d'influencer la stabilité de l'ouvrage.

Sans aller plus loin il faut surtout rappeler que cela ne sert pas à grand-chose de figurer un canevas dans un dossier (ce qui est assez fréquent) sans aucune explication. Le fouillis de points est assez rebutant. Les lecteurs ne savent généralement pas lire ce genre de document ou n'ont pas le temps de s'y intéresser. Il serait bon, tout au moins, de rédiger un petit commentaire qui permettra au lecteur de s'y retrouver.

L'approche des caractéristiques de résistance à la rupture des massifs rocheux.

Pendant longtemps la détermination des caractéristiques à la rupture des massifs rocheux fracturés a été un véritable problème pour les projeteurs. Toutes les méthodes d'essai in situ sont critiquables quant à leur principe. Dans tous les cas l'analyse de la fracturation du massif doit être considérée à différentes échelles :

- ***les mégastructures*** (hectométriques à kilométriques) que sont les failles majeures qui sont souvent la cause de grands désordres quand leur orientation par rapport à l'ouvrage en compromet la stabilité ;
- ***les mésostructures*** (métriques ou décamétriques) peuvent découper des coins rocheux instables, de volumes conséquents, qu'il faut, dans les cas défavorables, renforcer (ancrages actifs ou passifs, injections de consolidation, drainage...). C'est l'échelle la plus fréquente des coins rocheux de Londe.
- ***les microstructures*** (centimétriques ou décimétriques) qui témoignent de la genèse de la roche et sont l'héritage de toutes les déformations qu'elles ont subies.

On met en évidence les méso et microstructures lesquelles déterminent principalement la valeur du module de déformation du massif, par l'analyse structurale (géologie de surface) et par des reconnaissances et essais adéquats.

Il existe des méthodes d'évaluation des critères de rupture des massifs rocheux, assez empiriques, qui prennent en compte des données géologiques et des essais sur modèles physiques (Hoek – Brown, N.Barton...). Le principe de ces méthodes, définies au départ pour des excavations confinées au sein d'un massif rocheux, a été critiqué par les mécaniciens des roches français car les données géologiques sont alors introduites par le biais de notes « quantifiant » la fracturation naturelle (comme les élèves dans une classe). Celles-ci sont considérées comme trop subjectives (et pour tout dire non scientifiques) par les théoriciens de la mécanique des roches. Il n'en reste pas moins que la méthode de Hoek – Brown, laquelle nous avait été vantée par P. Londe il y a une quarantaine d'années, a évolué depuis. Elle permet d'approcher une courbe intrinsèque du massif rocheux ce qui serait impossible autrement. Mais il faut se méfier car dans le cas des barrages, des effets de versant modifient souvent le comportement du massif rocheux et, de ce fait, la structure régionale l'emporte sur les caractéristiques ponctuelles du massif. Une rive peut être décomprimée et l'autre non, comme au barrage des Olivettes en raison du pendage dirigé d'une rive vers l'autre. Les notes qualifiant le rocher deviennent alors très différentes d'une rive à l'autre. Nous nous bornerons à dire, ayant nous-même fait usage de cette méthode, qu'il y a hélas d'énormes incertitudes pour le choix des notes en fonction des données géologiques accessibles. Dans tous les cas, cela ne pourrait-être fait correctement que par un géologue au courant de la mécanique des roches et connaissant bien le terrain. Un projeteur sans connaissances géologiques devra s'en abstenir. De mauvais choix peuvent en effet influencer totalement les modélisations qui s'en suivraient en faussant le résultat final, lequel ne correspondrait plus à la réalité du site. Ces méthodes restent très aléatoires et trop souvent utilisées sans discernement.

IV – LES TRAVAUX DE RECONNAISSANCE

Nous nous limiterons dans ce qui suit aux travaux qui visent précisément à compléter et améliorer la connaissance géologique d'un site. Ils sont nécessairement définis par le géologue chargé de l'étude et doivent être suivis et interprétés par lui.

La géophysique

Le projeteur en attend deux types de données, les unes relatives à la qualité des terrains de fondation et à leur position dans le sous-sol, les autres relatives au risque sismique et notamment, ce qui est nécessaire au projeteur, l'estimation de l'accélération maximale probable sur le site pour une période de retour donnée.

Le premier cas concerne essentiellement la zonation des terrains de fondation en fonction des vitesses de propagation, lesquelles traduisent la variation avec la profondeur de la qualité mécanique des terrains. A ce titre le géologue est très concerné pour la corrélation de ces données avec celles des forages et des essais divers. Ceci est, en particulier, nécessaire pour un point très important du projet : la définition du profil du fond de fouille et, par conséquent, l'estimation du volume des terrassements.

Le second cas est tombé par la force des choses dans le domaine quasi-exclusif des géophysiciens et, si un avis de géologues est demandé, il s'agit généralement de celui de tectono-physiciens qui considèrent la géologie à l'échelle de la planète et non pas à celle d'un barrage ! Cette optique étant partagée par les enseignants actuels de la géologie, le chapitre géophysique d'une étude de barrage reprend très souvent l'histoire géologique de la terre, sinon depuis le big bang, du moins à la phase de la tectonique des plaques, au sens où nous l'entendons généralement, soit à la fracturation de la Pangée (fin du Trias), pour les époques récentes qui nous intéressent. Tous ces développements, très appréciés par ailleurs, sont totalement hors-sujet dans le cadre d'une étude de barrage. Il ne faut pas oublier que le projeteur attend uniquement une estimation de l'accélération sismique la plus probable pour la durée de vie de l'ouvrage et qu'il fait confiance au géophysicien pour lui donner cette valeur (sans retracer toute l'histoire de la Terre !).

Toutefois il ne faut pas perdre de vue que, dans le processus d'étude généralement suivi à cette fin, ce sont le plus souvent les documents géologiques existants, c'est-à-dire des cartes à diverses échelles, qui sont les documents les plus fiables, malgré leurs nombreuses imperfections, car ils correspondent à des données observables et vérifiables, lesquelles ne résultent d'aucun calcul de probabilité. Les grands accidents géologiques (les failles) y sont généralement représentés, mais leur caractère actif n'est pas facile à établir et peut demander des travaux de reconnaissances spécifiques comme des tranchées sur le tracé de l'accident suspect. Nous n'insisterons jamais assez en affirmant que la recherche d'indices caractéristiques de mouvements passés, généralement récents et parfois très subtils, ne peut être faite que par des géologues de terrain très expérimentés. Ne pas confondre par exemple un contact lenticulaire entre des limons et des cailloutis au sein d'une formation alluviale comme un ressaut de faille récente, alors qu'il ne s'agit que du rebord d'un chenal d'érosion d'origine tout à fait sédimentaire (erreur publiée photographiquement dans une revue sérieuse).

Enfin, à la limite des deux cas précédents se place l'identification des sols liquéfiables. Des critères granulométriques plus que géophysiques, qui ont fait leurs preuves, existent. Ils sont considérés assez justement comme relevant de la mécanique des sols. L'avis du géologue peut toutefois être nécessaire lorsqu'il s'agit de définir la sensibilité d'une formation alluviale avec une alternance serrée de niveaux silteux et plus grossiers. Il convient alors de considérer la texture d'ensemble de la formation dans le but d'estimer la proportion des niveaux reconnus liquéfiables.

En résumé, le géologue chargé de l'étude d'un site, s'il n'est pas associé aux études géophysiques, doit exercer son contrôle et son esprit critique en toute liberté et signaler ou refuser les hypothèses qu'il estime incompatibles avec la géologie régionale.

Les sondages

Ils ont pour but de lever certaines inconnues géologiques que l'étude de terrain a révélées. Un sondage est un moyen coûteux mais fondamental de compléter l'étude géologique en permettant l'observation directe du terrain par l'intermédiaire des carottes. Il est indispensable de respecter certaines obligations :

- c'est le géologue responsable de l'étude géologique qui doit fixer les emplacements, les longueurs et le mode d'exécution ;
- sauf exception dûment motivée et autorisée, la totalité du sondage doit être carottée ;
- le géologue doit faire lui-même le relevé du sondage car lui seul connaît le but poursuivi et peut remarquer des détails essentiels qu'un autre géologue (et, a priori, un non géologue) ne remarquerait pas ;
- ceci exclut que figurent dans les dossiers d'étude les relevés effectués par le chef sondeur, voir par un stagiaire n'ayant pas la formation voulue ;
- les coupes de sondage doivent permettre une vue synthétique des connaissances acquises et notamment les résultats des essais d'eau. Ceux-ci apportent en effet des compléments quant à l'hydraulique souterraine des terrains qui doivent être interprétés à la lumière de la coupe géologique. Elles doivent par conséquent être dressées par le géologue en charge de l'étude ;
- il est inadmissible de se borner à joindre comme coupe de sondage, dans un dossier d'étude, des photocopies de notes manuscrites plus ou moins lisibles prise lors d'un relevé de chantier, dont l'auteur est généralement inconnu.

En relation avec le chapitre précédent, les logs (du terme anglais qui veut dire bûche) de sondage doivent rendre de façon visuelle les variations de la fracturation de la carotte tout au long du sondage. La méthode universellement employée actuellement est la mesure du RQD, proposée par Don Deere. Elle permet de figurer facilement la variation de l'intensité de la fracturation le long du sondage. Nous ne nous étendons pas sur ce sujet qui est généralement bien connu. Toutefois il faut relativiser l'interprétation du RQD ainsi que l'a judicieusement signalé Claude Louis. Les caisses de forages faisant généralement 1m de longueur, considérons un cas très fréquent d'une longueur carottée de 99 cm. La carotte peut être divisée en 9 morceaux de 11 cm d'où un RQD de 100% (aucun morceau inférieur à 10 cm) ou bien en 11 morceaux de 9 cm soit un RQD de 0% (que des morceaux inférieurs à 10 cm !). Du point de vue fracturation du massif rocheux un tel écart ne se justifie absolument pas dans ce cas. Il faut donc éviter des interprétations trop catégoriques des chiffres et nuancer son jugement en fonction de l'aspect général des carottes et de la connaissance du terrain.

Un cas particulier de fracturation ne peut être évalué par le RQD. Il s'agit du cas des fractures (en général une seule) parallèles ou sub-parallèles à l'axe du sondage. Le RQD n'a alors plus aucun sens. De plus les passes de carottage présentant des cassures de ce type ne doivent jamais être testées au moyen des essais Lugeon (traités ci-après). Il y a en effet un trop grand risque de contournement du ou des obturateurs.

Une nouvelle technique de relevé de sondage existe à l'heure actuelle et mérite de s'imposer : *la photographie numérique en continu des parois du forage*. Elle donne une vision du terrain complètement affranchie des aléas du carottage et notamment de l'extraction de la carotte du tube

carottier, cause de fragmentation artificielle. Nous avons par exemple pris l'habitude depuis longtemps de comparer les résultats des essais d'eau avec le relevé de la fracturation en sondage. Il arrivait parfois que des longueurs très fracturées ($RQD = 0$) correspondent à des zones étanches. L'interprétation évidente était, qu'en place, tous les fragments étaient en fait jointifs et l'absorption nulle. La photo numérique des parois permet de confirmer cela ainsi que bien d'autres détails par l'image photographique de la paroi du forage. L'ouverture millimétrique de certaines fractures (susceptibles de donner des absorptions d'eau non négligeables) est parfaitement visible. Un autre avantage considérable de cette technique est que l'appareillage permet le relevé en continu des intersections de fractures et de la paroi cylindrique du forage ce qui permet le calcul de leur orientation et de leur pente. Tout ceci est synthétisé à l'aide de canevas stéréographiques donnés par passes tout au long du forage. Une exploitation plus « artisanale » de ces documents photographiques reste possible, car ils présentent le développé de la surface cylindrique de la paroi du forage à une échelle donnée et pour une circonférence de base connue. Ceci est bien commode lorsque l'on est intéressé par une fracture en particulier. Il est facile d'en calculer le pendage et la direction. Mais notre expérience nous a montré aussi que certaines fractures peuvent échapper à cette détection alors qu'elles sont visibles sur les relevés de surface. Toutefois les méthodes de photos numériques peuvent être inopérantes dans certains types de roches à dominante argileuse, l'eau du forage ne pouvant rester claire. Il faut donc bien distinguer ces deux manières de procéder.

Les essais d'eau

Nous ne mentionnerons que l'essai Lugeon toujours très utilisé, et devenu routinier. Il est généralement ignoré qu'il fut imaginé et mis au point par un professeur de l'université de Lausanne, Maurice Lugeon, éminent géologue alpin, lequel fut très consulté, dès le début du XX^e siècle, pour de nombreux projets de barrages (Lugeon 1933). Qualifié depuis, du nom de son inventeur, cet essai est mondialement connu. Le matériel nécessaire à sa pratique ainsi que l'interprétation de l'essai, apparaissent maintenant d'une autre époque. Des améliorations techniques existent mais on n'est pas encore au stade de logiciels d'interprétation probants. La pratique actuelle persistera sans doute quelque temps. Il est donc utile de rappeler quelques données fondamentales.

Historiquement, il convient tout d'abord de dire qu'en tant que géologue de terrain très expérimenté, Maurice Lugeon avait clairement compris le rôle des divers types de fractures au sein des massifs rocheux (alors que la Mécanique des roches n'existait pas), en ce qui concerne la stabilité et les circulations d'eau dans les appuis de barrages. Ceci concernait directement la conception des écrans d'étanchéité nécessaires à la sécurité des ouvrages et à l'économie des projets.

Or ceux-ci représentaient une dépense très importante dont l'estimation était difficile, pour ne pas dire hasardeuse. Lugeon savait que la capacité d'absorption de l'eau par un massif rocheux variait beaucoup en fonction de sa fracturation. Il fallait donc adapter le projet d'écran à la distribution des discontinuités du rocher. Pour ce faire il imagina un essai très empirique (matériel et protocole d'essai), qui permettait de comparer entre elles les capacités d'absorption d'eau par les diverses parties du massif rocheux. Il nous a paru souhaitable de rappeler ici quelques éléments fondamentaux qui paraissent assez souvent oubliés.

Le mode d'essai pose comme principe que la capacité d'absorption d'eau d'un massif rocheux (porosité pour M. Lugeon) est comparable à celle d'un coulis d'injection. Ceci n'est toutefois qu'une supposition, le coulis étant diphasique (eau et particules minérales). L'ordre de grandeur reste toutefois une indication intéressante pour le projeteur.

Les essais d'eau sur les sites de barrages ne concernent la plupart du temps que des massifs peu perméables en milieu non saturé, très souvent au-dessus d'une éventuelle nappe. L'eau est absorbée par les discontinuités du massif (fractures = milieu discontinu), vides jusque-là. Du fait de la discontinuité de l'aquifère et de sa non-saturation les lois de l'hydraulique des milieux poreux ne peuvent être appliquées. Donner un équivalent en m/s de l'unité Lugeon (ce qui est courant) n'a pas de sens. M. Lugeon adoptait le critère d'étanchéité suivant : « L'absorption en eau par la roche ne devra pas dépasser 1 litre-minute sous une pression de 10 kg pendant 10 minutes ». L'unité Lugeon (1 l/m/mn), tout à fait incohérente quant aux unités légales actuelles, mesure en fait, une «non perméabilité». La pression de référence de 10 bars, outre le fait qu'elle est exprimée par une unité de pression qui n'est plus légale, a probablement été fixée par référence à la hauteur des grands barrages de l'époque.

Il est nécessaire que la mesure effectuée soit correcte (la surveillance des travaux devrait s'en assurer sérieusement) pour obtenir un graphe débit/pression représentatif. On admettait jadis que ce graphe était linéaire ce qui facilitait son interprétation, mais ne correspondait généralement pas à la réalité (Sabarly 1968 – Louis 1974). Les variations de la pression d'injection de l'eau provoquent en effet une variation de l'ouverture élastique de la fracture laquelle influence fortement le débit absorbé : celui-ci est fonction de la quatrième puissance de la pression ! Comme 10 bars, soit 1 Mpa, correspond sensiblement à 38m de terrain (équilibre de la pression de l'essai) ce n'est qu'à partir de cette profondeur que l'on passera en ouverture élastique et que le débit augmentera fortement. Pour des profondeurs moindres, l'application de la pression standard de 10 bars peut conduire à une augmentation rapide des absorptions. Ceci apparaît bien sur les graphes d'essai à condition d'avoir assez de points. La tendance actuelle à en limiter le nombre pour des raisons d'économie (chaque point nécessite 10 minutes d'essai) ne va donc pas dans le sens d'une interprétation correcte.

Il faut surtout retenir que la forme générale des graphes permet au lecteur expérimenté de très intéressantes déductions (déboussages, colmatage, entre la montée et la descente en pression, etc). L'interprétation de ces essais est décrite dans de nombreux ouvrages.

V – **QUE RETENIR DE TOUT CELA ?**

L'étude géologique est un élément essentiel de toute étude de barrage. Elle doit y figurer par raison de nécessité, et non pas parce que c'est une pièce contractuelle dont, à la limite, on pourrait se passer par souci d'économie. Cette remarque doit être faite car, à l'heure actuelle, le pouvoir de décision risque d'être accaparé de plus en plus par des financiers au détriment des techniciens en vue de minimiser les coûts des études et de la construction. Ce but peut être atteint en limitant arbitrairement le volume de travaux coûteux comme les forages et les essais in situ (par exemple les essais Lugeon réalisés une passe sur deux !), et en imposant la rapidité d'exécution comme une nécessité absolue. Le problème est que l'acquisition de la connaissance géologique et hydrogéologique correcte et suffisante d'un site ne s'accommode pas de telles contraintes sous peine de compromettre la sécurité de l'ouvrage. Dans cet esprit, il est bon de rappeler aussi que les gradients hydrauliques créés par la construction d'un barrage sont, par homothétie, indépendants de la hauteur de celui-ci.

L'exposé précédent s'est voulu didactique. Son contenu repose sur les leçons tirées d'une longue pratique de notre spécialité mais il ne pouvait pas être exhaustif. Nous avons essayé de dégager l'esprit qui doit présider à la réalisation d'une étude géologique de barrage :

- la progression de la connaissance géologique suit le phasage des travaux. Une phase préliminaire met en évidence les inconnues géologique, géotechnique et hydraulique du site afin d'éclairer le projeteur dans un souci de dialogue permanent ;
- la connaissance précise du terrain (morphologie, lithologie, structure...) est la base indispensable ;
- le principe fondamental des études, est de procéder du général au particulier. On recherche en priorité les inconnues, c'est-à-dire les données géologiques susceptibles de conditionner la réussite du projet, mais dont la définition et la quantification sont a priori incertaines. Le but ultime est d'estimer la part d'inconnues restantes. Celles-ci pourront être levées lors du suivi des travaux, notamment la période des fouilles et de l'exécution des voiles de drainage et d'étanchéité ;
- la synthèse des connaissances géologiques acquises lors des études préliminaires est présentée sous forme d'une carte géologique. C'est le document fondamental et sa présentation doit être particulièrement soignée. La topographie doit être particulièrement lisible et toutes les informations structurales (failles, pendages en direction et pente, plis ou axes de plis...) doivent figurer clairement. On doit veiller à ce que des détails importants, mentionnés dans le texte, apparaissent bien sur le document. Les figurés relatifs à la lithologie, essentiels, ne doivent pas masquer les autres informations. La position de tous les travaux de reconnaissances, notamment des sondages, doit être précisément indiquée. Tout ceci impose que l'échelle du document soit suffisamment grande, celle du plan général des ouvrages par exemple ;
- il ne faut pas oublier non plus que confier la géologie sensu stricto aux géotechniciens ou mécaniciens des roches qui font des études très spécifiques sur les matériaux n'est pas une solution. Cet amalgame est la pire des choses car ces derniers n'ont pas la vue globale du site ! ***C'est pourtant ce qui a de plus en plus tendance à se faire aujourd'hui. Aller au quantitatif sur des objets ponctuels (la roche) sans passer par le qualitatif sur des objets étendus (le massif rocheux) ne peut que conduire à l'échec*** en ne fournissant pas un modèle réaliste du site.

- enfin, il est souhaitable que la progression des études soit suivie par le même géologue tout au long du projet. Ce scénario n'est pas impossible, puisque l'un d'entre nous a pu le mettre en place sur trois projets qu'il a pu suivre dès les études préliminaires, jusqu'à la réalisation de l'ouvrage et sa mise en eau, malgré des changements successifs de maître d'œuvre.

La compréhension géologique d'un site (nature, structure, hydrogéologie...) est le fondement même de la conception des ouvrages complexes que sont les barrages. Elle doit être envisagée le plus tôt possible. Cette compréhension ne se limite évidemment pas aux études préliminaires. Le processus d'étude doit en outre harmoniser les approches différentes du géologue et des ingénieurs de Génie civil. Il faut en effet adapter un ensemble d'ouvrage entièrement conçu par la logique humaine, à une portion de nature héritée d'un très long enchaînement de processus naturels dont on ne peut observer que l'état actuel, le site du barrage. Le géologue essaie de dégager les données essentielles pour assurer la stabilité de l'ouvrage moyennant des travaux bien adaptés. Pour cela il lui faut établir un modèle simplifié de la géologie du site. Mais à quoi limiter cette simplification ? Il faut concilier deux approches différentes, celle du projeteur qui est plutôt déterministe (à toute situation géologique doit correspondre une solution technique) et celle du géologue qui est, en lui-même, plutôt probabiliste. Il connaît en effet, ou subodore, la complexité du terrain et les innombrables facteurs qui la sous-tendent et qu'il ne peut pas toujours déterminer ni mesurer. Les deux modes de raisonnement sont donc très différents, mais nécessairement complémentaires. La réussite de l'étude ne peut donc résulter que d'une bonne compréhension, et finalement, d'un bon accord entre les deux approches.

BIBLIOGRAPHIE

- Antoine P., Couturier B., Vuillermet E.** (2018). - Les apports du géologue, de la conception des barrages à l'évaluation du niveau de sûreté en cours d'exploitation. XXVI^e Congrès de la CIGB, Vienne, Autriche, Question 102.
- Antoine P., Fabre D.** (1980). - Géologie appliquée au Génie civil, Masson, Paris, 270 p.
- Cheyran G.** (1966). - Etudes géologiques des aménagements hydrauliques de la Compagnie de Bas-Rhône-Languedoc, Thèse doctorat d'État ès sciences, université de Grenoble, 343 p.
- Couturier B.** (1987). - Les études géologiques dans les projets de barrages. Thèse doctorat d'État ès sciences, université de Grenoble 1, 351 p.
- Couturier B., Goubet A., Antoine P., Schmidt E.** (1997). - Géologie des barrages en béton compacté au rouleau (BCR). Bull. de l'AIGI, Paris, n°55.
- Desvarreux P.** (1970). - Recherche d'une méthode d'étude des mouvements de terrains et applications pratiques. Thèse de docteur-ingénieur, université de Grenoble.
- Gignoux M., Barbier R.** (1955). - Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques. Masson, Paris, 344p. 176 fig. 28 planches photo.
- Giraud A.** (1986). - Caractérisation géotechnique des massifs rocheux par étude structurale et essais in-situ - Application aux sites de barrages. Thèse doctorat d'État ès sciences, université de Grenoble 1, 204 p.
- Kilian W.** (1921). - La géologie et l'aménagement hydroélectrique des chutes d'eau. La Houille blanche, n^{lle} série, n° 169, pp. 41-44.
- Letourneur J., Michel R.** (1971). - Géologie du Génie civil. Armand Colin, Paris, 728 p.
- Louis C.** (1974). - Introduction à l'hydraulique des roches, Bull.BRGM (2^e série), section 3, n° 4, p. 283-356, 67 fig.
- Lugeon M.** (1932). - Barrages et Géologie. Rouge et Cie, Lausanne, 138 p., 63 phot.
- Marinos P.** (1969). - Etudes géologiques d'aménagements hydrauliques dans le Lauragais. Thèse de docteur - ingénieur, université de Grenoble, 208 p.
- Sabarly F.** (1974). - Les injections et les drainages de fondation de barrages en roches peu perméables, Géotechnique n°18, p. 229-249.
- Schneider B.** (1967). - Contribution à l'étude des fondations de barrages. Thèse de docteur-ingénieur, université de Grenoble, 241 p.
- Thérond R.** (1972). - Recherches sur l'étanchéité des lacs de barrages en pays karstiques. Thèse de docteur-ingénieur, université de Grenoble, 409 p.
- Vuillermet E., Couturier B.** (2015). - Interaction entre comportement hydraulique et géologie au barrage de la Ganguise (France). Colloque du CFBR, Chambéry, p. 255-265, 10 fig.

LES AUTEURS

Pierre Antoine est professeur honoraire à l'Université de Grenoble (Polytech, département Géotechnique). Il a également enseigné à l'Ecole Nationale supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble, à l'Ecole Nationale des Travaux publics de l'Etat à Lyon, à l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures à Paris.
antoine.pi@free.fr

Bernard Couturier a été directeur adjoint et expert géologue à BRL *ingénierie* et professeur associé à l'université de Grenoble où il a enseigné à l'Ecole nationale supérieure d'hydraulique et de mécanique (aujourd'hui ENSE3) et à l'Institut des sciences et techniques (aujourd'hui Polytech Grenoble).
couturier.bernard@orange.fr