

LA GÉOLOGIE AU SERVICE DES GRANDS TRAVAUX

R. BARBIER (*)

RÉSUMÉ

L'auteur montre, par des exemples tirés d'études qu'il a effectuées personnellement, que la « géologie de l'ingénieur » n'est pas, comme on le croit trop souvent, une discipline indépendante, mais qu'elle consiste, en fait, en l'application à la résolution d'un problème concret des diverses disciplines des Sciences de la Terre et que la méconnaissance de cet axiome fondamental entraîne souvent encore de graves erreurs qui, dans ce domaine, peuvent aboutir à de graves difficultés techniques ou financières ou même à de véritables catastrophes.

I. INGÉNIEURS ET GÉOLOGUES

Parler, en 1974 et en Europe, de l'utilité de la géologie dans l'étude et l'exécution des grands travaux peut donner l'impression de vouloir enfoncer une porte ouverte. Il n'en est pourtant rien, je pense, et pour trois raisons principales.

D'abord parce que les anciennes *difficultés de communication entre « ingénieurs » et « géologues »* n'ont pas totalement disparu en Europe, et qu'on continuera à rencontrer sous ce rapport quelques difficultés tant que la géologie ne sera pas plus et mieux enseignée aux ingénieurs de Génie Civil et aux architectes et tant que, à l'inverse, on n'orientera pas plus de géologues vers cette discipline spéciale de la *géologie de l'ingénieur* ; ce que nous tentons de faire, à Grenoble, grâce d'une part à un enseignement de géologie générale, puis de géologie du Génie Civil (barrages surtout) à l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et, d'autre part, grâce à notre Troisième Cycle de géologie appliquée, comportant une option « Génie Civil ».

Ensuite parce que, même si ce problème était parfaitement résolu en Europe, on le rencontrerait encore ailleurs comme j'ai pu m'en rendre compte un peu partout dans le monde, où l'on retrouve souvent la classique coupure entre deux façons de raisonner, *a priori* différentes :

- mathématique et simplificatrice pour l'ingénieur ;
 - basée sur l'observation et liée aux complexités de la nature pour le géologue ;
- tendances éloignées au départ et qui ne peuvent être rapprochées que par une formation et des enseignements appropriés.

(*) Laboratoire de Géologie, Institut Dolomieu, rue Maurice Gignoux, F 38-Grenoble.

Mais, à ces difficultés bien connues et qui tendent à se résorber, en particulier en Europe, sont venues s'en ajouter maintenant d'autres tenant, cette fois-ci et au contraire, à la grande vogue de *spécialisation* submergeant de plus en plus toutes les disciplines et à laquelle la géologie n'a pas échappé.

De fait, il m'est arrivé assez fréquemment de rencontrer des géologues qui, souvent par manque d'une formation de base suffisamment étendue et approfondie, ne réalisent pas que l'étude géologique d'un site de barrage ne consiste pas uniquement à dresser une carte géologique de quelques centaines de mètres carrés, mais que la *structure de ce site* ne pourra être vraiment comprise qu'en la remettant dans son cadre géologique régional.

Bien des erreurs peuvent alors en découler, notamment en ce qui concerne les programmes des travaux de reconnaissance dont on ne pourra tirer le profit maximal qu'à condition de les avoir implantés correctement, c'est-à-dire d'avoir posé clairement la question à laquelle on veut qu'ils répondent, ce qui ne peut valablement être obtenu qu'en fonction d'une étude globale de la structure de la région avoisinant le site.

Et s'il est hautement souhaitable que les géologues de Génie Civil soient assez mathématiciens pour pouvoir collaborer avec les spécialistes des multiples mesures que l'on peut actuellement faire dans les forages, avec les géophysiciens, dont les études sont si précieuses dans beaucoup de cas, ou avec les spécialistes de mécanique des sols ou des roches, il ne faut pas que, pour autant, ils perdent leurs qualités de base, à savoir le sens de l'observation, de la vision dans l'espace et de la compréhension d'ensemble de la structure géologique régionale permettant seule de situer correctement dans leur cadre, barrage et retenue ou tunnel.

A plus forte raison, est-il généralement fâcheux, voire néfaste, qu'un spécialiste d'une certaine technique ou d'une autre discipline cherche à se substituer au géologue alors que ce n'est pas son rôle et qu'il risque de passer ainsi à côté des problèmes principaux.

Formation appropriée et compréhension mutuelle restent donc les deux données de base majeures pour une collaboration fructueuse entre géologues et ingénieurs, seule susceptible d'aboutir à une appréciation correcte des difficultés géologiques et par conséquent, aussi, d'aboutir à la meilleure façon de les résoudre.

Mais, à condition que les géologues consultés soient pleinement conscients du rôle qu'ils doivent jouer, c'est-à-dire qu'ils ne se laissent pas aller à un certain « snobisme de la spécialisation » et qu'ils aient reçu (ou acquis ultérieurement) une formation suffisamment large, approfondie et correctement orientée.

Et je pense que tout cela peut se résumer dans une formule simple : *il n'y a pas de « géologie appliquée », mais seulement l'application des disciplines géologiques à la solution d'un problème pratique particulier.*

Aussi, tout géologue désirant pratiquer la *géologie de l'Ingénieur* et participer ainsi utilement à la réalisation de grands travaux devra-t-il avoir toujours présent à l'esprit ce point de vue et devra-t-il, également, avoir une formation de base aussi vaste que possible, car toutes les disciplines des « Sciences de la Terre » peuvent, à un moment ou à un autre, être utiles, voire indispensables, à la solution de ces problèmes... pour si « terre à terre » qu'ils paraissent à ceux qui, parfois, considèrent encore la « géologie appliquée » avec quelque condescendance !

C'est donc dans cet esprit que nous allons examiner maintenant quelques cas (parmi les centaines que j'ai eu à étudier dans de nombreux pays des cinq parties du monde) me paraissant particulièrement typiques en ce qui concerne cette néces-

sité d'une étude géologique complète, détaillée et à échelle souvent régionale que nécessitent, presque toujours, les grands travaux ; étude qui ne se distingue en rien d'une étude géologique habituelle, si ce n'est sous l'angle de la rigueur et de la précision beaucoup plus grandes qu'elle nécessite... et qui trouvera sa « sanction » lors de la réalisation des travaux.

II. IMPORTANCE DES ÉTUDES GÉOLOGIQUES PRÉLIMINAIRES DANS LA DÉFINITION DES TRAVAUX DE RECONNAISSANCE

Tirer le maximum de l'étude géologique de surface me paraît être, pour tout géologue, mais plus encore peut-être pour celui qui pratique la « géologie de l'Ingénieur », une nécessité triplement contraignante :

- d'abord par simple « honnêteté professionnelle » ;
- ensuite parce qu'il ne sera pratiquement pas possible de résoudre tous les problèmes à partir de cette seule étude de surface qui devra, nécessairement, être complétée par des travaux de reconnaissance ;
- enfin parce que le choix entre les divers types de reconnaissance possibles et leur implantation, ne pourront être valablement faits qu'en fonction d'une réponse à donner à des problèmes posés par l'étude de surface et qui n'ont pu être résolus par elle seule.

Ajoutons, sans trop dramatiser, qu'on sait trop bien à quoi peuvent conduire des études géologiques mal ou trop tardivement faites, depuis des incidents techniques plus ou moins fâcheux et parfois très graves dans leurs répercussions économiques (barrages « secs » entre autres) jusqu'à des accidents ou même des catastrophes dont l'Europe n'a pas été épargnée même à une époque encore récente, comme tout le monde le sait.

A. Le barrage du Chambon sur la Romanche (Isère, France)

Je ne rappellerai que pour mémoire cet exemple, traité autrefois par mes anciens Maîtres M. Gignoux et L. Moret (1941) et ceci pour deux raisons :

- d'abord parce qu'en Europe on n'aime généralement pas trop parler des difficultés dues à des erreurs ou insuffisances de reconnaissance, ce qui rend cet exemple méritoire ;
- ensuite, parce qu'à l'époque on n'avait pas encore l'idée que le talweg rocheux sous-alluvial pouvait être aussi complexe qu'il l'était ici.

L'imprudence, dans ce cas, consista en effet à ne faire qu'un petit nombre de forages pour reconnaître le bed-rock sous-alluvial supposé simple et à les aligner, pour la plupart, le long de la rivière : il en est résulté une méconnaissance de la forme et de la profondeur réelles du bed-rock sous-alluvial, notamment au pied du parement amont.

Ce n'est qu'à l'ouverture des fouilles et alors que le barrage était assez avancé déjà en rive droite, qu'on s'aperçut que le rocher manquait sous le parement amont et qu'on ne put le retrouver à une profondeur raisonnable qu'en redressant celui-ci

à la verticale au lieu de lui conserver le fruit prévu. Erreur qui put être rattrapée *in extremis* sur le plan technique mais qui occasionna de grandes pertes de temps et d'argent.

B. L'usine de M. dans la vallée de l'Arc (Savoie, France)

Ce cas me paraît très représentatif des erreurs que l'on peut commettre en organisant *une étude par forages systématiques, sans l'avoir fait précéder d'une étude géologique détaillée.*

Or, même à l'époque (il y a une vingtaine d'années), un nombre suffisant de grands travaux avaient déjà été réalisés dans nos vallées alpines pour montrer à quel point ces vallées pouvaient poser des problèmes complexes antérieurement méconnus faute d'expérience (exemple ci-dessus).

a) LE PREMIER PROGRAMME DE RECONNAISSANCE

Malgré cela et sans doute parce que le Maître d'Œuvre n'était pas orienté vers les problèmes géologiques, il n'avait pas imaginé la complexité que ceux-ci peuvent atteindre dans les Alpes : un premier programme de reconnaissances avait donc consisté à implanter, dans la zone de la future usine, des *forages systématiques* placés aux points d'intersection d'un carroyage à maille de 25 m. Programme qui, effectivement, aurait pu donner des résultats acceptables s'il s'était agi d'un problème banal comme on en a souvent dans d'autres régions plus simples et consistant en un bed-rock homogène sous une couverture d'alluvions sans grandes variations de nature et d'épaisseur.

b) LA STRUCTURE GÉOLOGIQUE DE LA ZONE DE FONDATION

Malheureusement, il n'en était rien ici, bien au contraire, comme on va le voir, les complexités étant en fait de deux ordres : paléomorphologique d'une part et tectonique de l'autre (fig. 1).

1° La paléomorphologie

La région consiste en un petit bassin traversé par l'Arc, rempli de moraines et d'alluvions, et barré à l'aval par un verrou rocheux d'origine glaciaire comme il y en a tant dans les Alpes.

Or, on sait combien la morphologie de ces verrous peut être rendue complexe par l'action des torrents sous-glaciaires qui y ont creusé des sillons et il est bien évident que, déjà de ce point de vue, ce n'était pas le seul emplacement de l'usine qu'il fallait étudier mais l'ensemble du verrou.

Or, comme l'indique schématiquement la figure 1 (réduction de leviers au 1/2 000) ce n'est pas un, mais trois sillons que j'ai pu repérer lorsque je suis intervenu dans cette étude : le sillon nord et le sillon médian sont assez peu profonds ; par contre, le sillon sud, très large et descendant aussi bas que l'Arc actuel, correspond très probablement à un ancien cours remblayé de ce dernier.

Encore a-t-on eu la chance que ces alluvions anciennes, très perméables, n'étaient pas gorgées d'eau, mais renfermaient une nappe très basse, à peu près au niveau de l'Arc voisin.

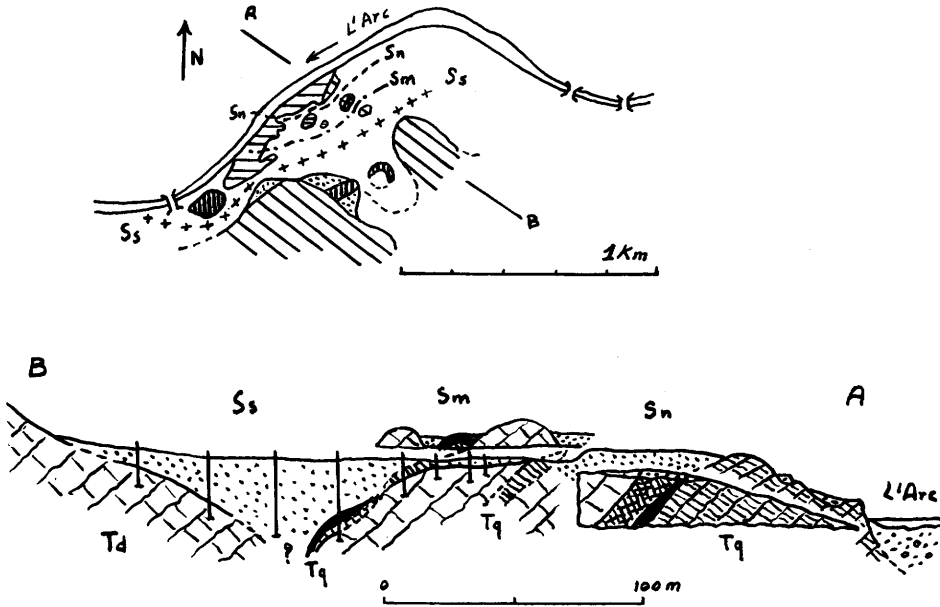


FIG. 1. — L'usine de M. dans la vallée de l'Arc (Savoie). En haut : carte géologique simplifiée de levés au 1/2 000 de l'ensemble du verrou, faisant apparaître la complexité de celui-ci : du point de vue morphologique (Sn, Sm et Ss, sillons nord, médian et sud) et tectonique (hachures obliques, calcaires dolomitiques ; hachures horizontales, quartzites ; hachures verticales, gypse et cargneule) ; A-B, trace de la coupe. En bas : coupe géologique suivant la trace A-B ; on retrouve les trois sillons et, entre les dolomies de gauche (Td) et les quartzites de droite (Tq) on remarquera les écaillages tectoniques avec cargneules (noir), zone broyée (croisillons) et, dans le centre, alternances de lames de dolomies et de quartzites.

2° La tectonique

Les affleurements discontinus de ce verrou coupé de sillons montraient néanmoins, dès l'abord, deux grands ensembles lithologiques : au nord des quartzites formant falaise au bord de l'Arc et, au sud, des calcaires gris : ce sont les deux termes classiques du Trias Briançonnais inférieur et moyen.

Mais on sait aussi qu'entre ces quartzites et ces calcaires, se trouve un niveau constant pouvant comporter des schistes, mais surtout des cargneules et des gypses.

Notre exemple ne manquait pas à la règle et, au sud-est, des affleurements de gypse et des entonnoirs de dissolution montraient clairement la présence de cette roche non seulement en surface, mais aussi sous le remplissage alluvial ; les gypses affleurant, de plus, à l'ouest au débouché de l'ancien cours de l'Arc, il est assez vraisemblable que celui-ci a été creusé là précisément à la faveur de ce terrain plus tendre.

Il s'est néanmoins trouvé, heureusement, que les travaux ont en majeure partie échappé à ces gypses souvent remplacés par des alluvions épaisses.

Par contre, des cargneules ont été décelées dans les fouilles et leur répartition a montré que cette zone intermédiaire était fort complexe tectoniquement à

l'échelle des travaux, avec un véritable écaillage de lames calcaires dans les cargneules. Or, la lame principale de cargneules tombait malheureusement dans la zone du bâtiment des machines, c'est-à-dire celle où il eût été le plus souhaitable que la fondation soit la meilleure ; ce qui aurait été le cas, tant pour les quartzites que pour les calcaires, malgré la grande fracturation qu'ils présentaient et qui n'avait rien d'imprévisible dans une zone aussi complexe tectoniquement.

c) CONSÉQUENCES POUR LES TRAVAUX

La méconnaissance de la complexité des problèmes géologiques posés par ce site et l'espoir de résoudre ces problèmes par un simple carroyage de forages a eu pour conséquences :

— qu'aucun des problèmes géologiques n'avait été vu clairement ; les sondages systématiques avaient en effet « raté » la zone de cargneules, apparue seulement à l'ouverture des fouilles et n'avaient pas donné une claire vision de la paléomorphologie ;

— que si l'on était passé à côté des problèmes majeurs, on avait par contre fait beaucoup de forages inutiles dans les massifs suffisamment résistants de calcaires et de quartzites ;

— que tous ces problèmes n'ont été clairement vus qu'à partir du moment où il m'a été possible d'étudier la question dans son ensemble et, par conséquent, de pouvoir placer les nouveaux sondages en toute connaissance de cause ;

— qu'il en est résulté d'assez grosses difficultés pour les fondations : toute une partie de l'usine sur pieux dans la zone de l'ancien cours de l'Arc et surtout excavations beaucoup plus importantes que prévues dans la zone des machines qu'il a fallu « purger » de ses cargneules tout à fait inadéquates à supporter les charges représentées par ces machines qui, en ce point, étaient particulièrement importantes.

d) CONCLUSIONS

Cet exemple montre bien, me semble-t-il :

— l'importance qui doit être donnée aux études géologiques pour de grands travaux de fondation, mais à condition qu'elles englobent un secteur assez vaste pour que l'ensemble des problèmes puisse être correctement analysé et compris, avant d'en arriver aux échelles très détaillées et naturellement indispensables ;

— qu'une reconnaissance « systématique », telle que celle décrite ici, aboutit à passer à côté de problèmes importants, à exécuter des forages tout à fait inutiles et finalement à perdre du temps et de l'argent ;

— que l'étude géologique doit absolument intervenir dès le début si l'on veut pouvoir en tirer le profit maximal, ce qui n'a pas été possible ici, les travaux étant trop avancés lors de mon intervention pour que l'on puisse encore modifier les plans de l'usine ;

— qu'une telle intervention au début des études aurait certainement permis de modifier le projet, pour l'adapter aux conditions géologiques, le rendant ainsi moins onéreux et plus facile à réaliser, notamment en ce qui concerne la position des machines lourdes coïncidant malencontreusement avec les cargneules, c'est-à-dire avec la plus mauvaise zone de toute la fondation.

III. LES ÉTUDES GÉOLOGIQUES DE BARRAGES

Tous les barrages, heureusement, ne se trouvent pas dans des conditions géologiques complexes et il m'a été donné d'en étudier effectivement pour lesquels ces conditions étaient particulièrement simples et parfois évidentes.

Mais ce n'est pas le cas général, et bien souvent, on est appelé à faire appel à des considérations ou à des disciplines que l'on n'aurait pas cru avoir à mettre en œuvre dans de telles études ou dont l'utilité ne paraît pas évidente *a priori*, surtout pour les non-initiés.

A. Problèmes touchant à la géomorphologie et à la paléomorphologie

Aucune « forme de terrain » n'est fortuite et tant qu'elle paraît curieuse ou aberrante... c'est tout simplement qu'on n'a pas su trouver l'explication de sa genèse et de son éventuelle évolution ultérieure.

C'est pourquoi l'étude et la compréhension des « formes du terrain » revêt une telle importance dans la « géologie de l'Ingénieur ».

a) LES GLISSEMENTS DE TERRAIN

Au stade préliminaire de l'établissement d'un projet hydraulique ou hydroélectrique, l'ingénieur se préoccupe naturellement surtout des données majeures qui vont tout d'abord conditionner l'économie générale du projet et qui sont essentiellement topographiques (en dehors, bien entendu, des conditions hydrologiques), à savoir : zone favorable à l'établissement du barrage, capacité de la retenue en fonction de la hauteur de ce dernier, hauteur de chute possible ou nécessité de dominer le périmètre à irriguer.

En ce qui concerne le barrage, il est bien évident que le projeteur va s'orienter tout de suite vers les points les plus étroits de la vallée. Or, il arrive assez souvent, surtout quand la vallée est par ailleurs assez large, que de tels points soient singuliers et dus à des circonstances géologiques qu'il importe de connaître et de vérifier dans chaque cas particulier.

Or, les glissements de terrain peuvent précisément créer de ces étroitures (au moins relatives) pouvant attirer l'attention du projeteur par l'avantage topographique qu'elles représentent et ce sera au géologue de montrer les dangers que présenterait une telle solution.

1° *Le barrage du Nakhla (Maroc)*

Ce cas est particulièrement instructif à cet égard car le barrage en enrochements de 40 m de hauteur à masque amont en béton (édifié pour l'alimentation en eau de la ville de Tetouan, ancienne zone espagnole) a précisément été appuyé en rive gauche sur un vaste glissement de terrain pourtant évident, mais à la suite d'études géologiques très insuffisantes (fig. 2).

Toute cette région est formée de flysch où alternent des grès en bancs le plus souvent minces et parfois assez friables et des pélites souvent très argileuses : terrain qui s'altère donc facilement et devient alors particulièrement favorable aux glissements de terrain que l'on rencontre partout dans le Rif.

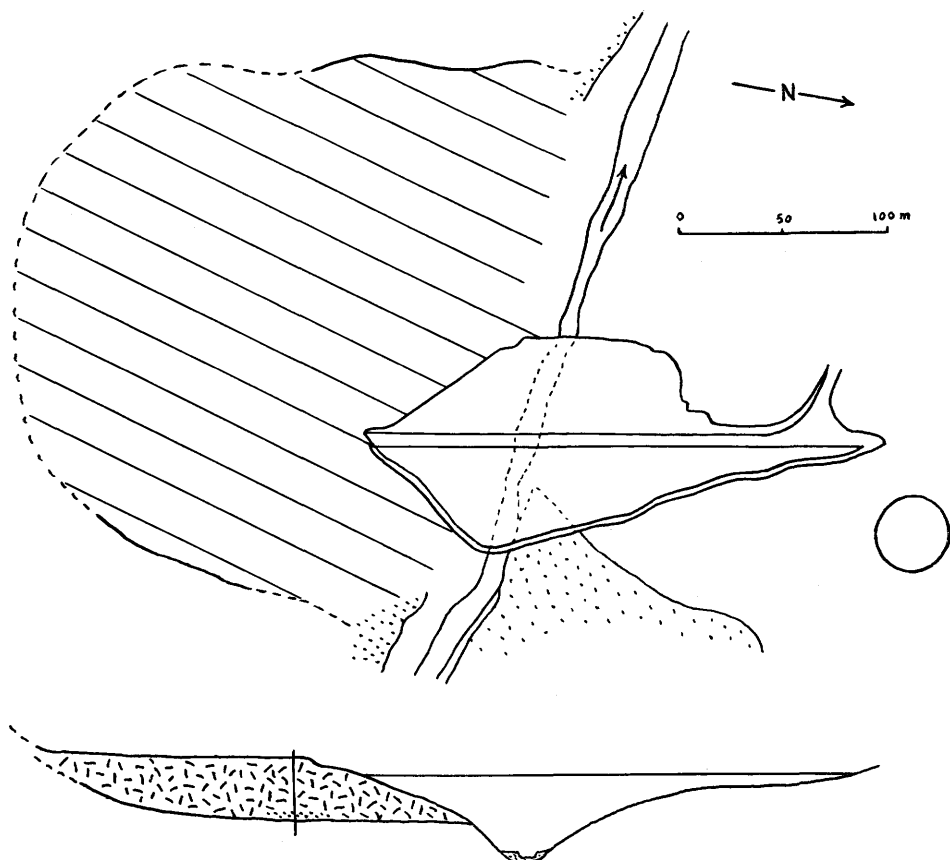


FIG. 2. — Barrage du Nakhla (Maroc) (d'après R. Rivoirard, 1972, simplifié). En haut : plan montrant la position du barrage en enrochements à masque amont en béton par rapport au grand glissement de terrain (flysch argilo-gréseux altéré) figuré en hachures; en pointillés, restes de terrasse correspondant à la période de départ du glissement; en blanc, le flysch; à droite (cercle), évacuateur de crues en tulipe. En bas : coupe géologique simplifiée montrant le départ du glissement (petits traits) au niveau d'une ancienne terrasse (en pointillé, alluvions anciennes rencontrées par un forage).

Les résultats principaux furent les suivants : grosses fuites sous l'ouvrage par lessivage des zones altérées et, surtout, remise en mouvement du glissement, tant à l'amont du barrage du fait des variations du plan d'eau de la retenue, qu'à l'aval par mise en charge des eaux provenant à la fois du versant et de la retenue.

Il en était donc résulté que ce barrage ne pouvait être exploité qu'à mi-hauteur, avec néanmoins le risque de voir disparaître progressivement son appui rive gauche par le double mécanisme signalé plus haut : il était donc urgent de prendre des mesures à son sujet.

Ce fut l'objet d'une mission internationale à laquelle je participai en 1962 et dont la conclusion principale fut que les divers travaux de confortement néces-

saies coûteraient à peu près aussi cher que le barrage lui-même. Mais aucun site de remplacement n'ayant pu être trouvé, ce sont ces travaux qui ont finalement été exécutés, d'ailleurs de façon remarquable et tout à fait efficace, comme la deuxième commission à laquelle je participais également a pu s'en rendre compte en juin 1972, permettant ainsi d'exploiter enfin le barrage de façon normale.

Ces travaux ont consisté, après avoir jugulé les fuites sous l'ouvrage par des injections dans la zone d'encastrement du masque amont en béton (voir à ce sujet A. Jaoui, 1968) :

- en recharges d'enrochements stabilisatrices tant à l'amont qu'à l'aval du glissement dans la zone d'appui du barrage ;

- l'exécution d'un diaphragme étanche par pieux jointifs à travers le glissement et dans l'axe du barrage (complété par le même dispositif en rive droite et un rideau d'injection sous la partie médiane) ;

- l'exécution, à l'aval, d'une galerie de drainage d'où partent de multiples forages drainants ;

- accessoirement, pose d'enrochements stabilisateurs aussi en rive droite, notamment dans la zone de la « tulipe » d'évacuation de crues, elle aussi menacée par des glissements plus superficiels.

Cet exemple est donc très instructif car il montre clairement :

- que l'erreur commise au départ en raison d'une étude géologique insuffisante a eu des répercussions graves sur l'économie générale du projet (longue exploitation partielle) qui, seule, a évité la ruine de l'ouvrage ;

- qu'une solution technique adéquate a cependant pu être trouvée, mais à un prix très élevé ;

- que tout ceci démontre bien les dangers qu'il y a à appuyer un barrage sur un glissement de terrain ;

- mais qu'il faut y ajouter aussi (ce à quoi l'on ne pense souvent pas assez) les risques de glissements pouvant exister, dans un tel contexte, à peu près n'importe où dans les versants ; glissements créés ou activés si l'on n'y prend pas garde : à l'amont par les variations du plan d'eau et, à l'aval, par l'eau en charge s'infiltrant à partir de la retenue ; c'est effectivement ce qui s'est produit ici où la rive droite (où aucun glissement apparent n'existait au départ) a dû, elle aussi, faire l'objet de travaux de confortement importants (dont certains ont encore dû être décidés en 1972).

2° Autres exemples

Au Maroc encore, j'ai eu à étudier un autre site analogue dans le cadre de la Mission Sebou de la F.A.O., celui de l'*Ourtzagh sur l'Ouerrah*.

Le point le plus étroit de la vallée, primitivement envisagé pour le barrage, était déterminé en rive gauche par une petite colline recouverte de vieux oliviers et au sommet de laquelle se trouvaient quelques maisons : cette colline paraissait donc stable à première vue, mais cependant un peu « surajoutée » à la morphologie générale du versant.

Il me parut donc vraisemblable qu'il s'agissait là d'un glissement, mais ancien et « cicatrisé ». Cependant, avant de prendre une décision définitive, il fallait avoir des certitudes : des reconnaissances par géophysique et forages montrèrent, alors, qu'il s'agissait bien d'un glissement, mélange d'argiles, de marnes et de blocs divers reposant sur les marnes miocènes sous-jacentes et en place.

Il n'était donc plus question de pouvoir appuyer le barrage sur une telle masse meuble et hétérogène et cet axe dut être abandonné. Un deuxième axe ne pouvait être alors envisagé que beaucoup plus à l'aval pour que la remise en mouvement probable de cette colline, du fait des variations du plan d'eau de la retenue, ne puisse causer aucun désordre au barrage et aux ouvrages annexes ; le volume de la digue et donc l'économie générale du projet s'en trouvaient ainsi très défavorablement modifiés avec, dans cette zone, des risques importants de glissements en cours de travaux : ce projet fut donc abandonné au profit d'un autre, sur le Sebou, qui se présentait de façon beaucoup plus favorable.

Par contre, *en Iran, sur le Sefid Roud, le projet du Foumen* consistait en un long tunnel de dérivation alimenté par un petit barrage à vannes d'une dizaine de mètres de hauteur. Or, le choix du site comportait ici une double exigence : avoir le barrage le plus court possible mais aussi, de préférence, une entrée de galerie dans le rocher.

Un tel point fut assez aisément repéré qui présentait un versant rocheux en rive gauche pour l'attaque du tunnel ; par contre, il me parut rapidement clair que le rétrécissement de la vallée était dû à un glissement ayant affecté le versant schisteux de rive droite ; bien qu'une hésitation fût ici possible, ce glissement étant très ancien, cicatrisé et ayant pris de ce fait l'allure d'une terrasse dominant les alluvions modernes de 20 m environ.

Les reconnaissances, par forages en particulier, confirmèrent bien qu'il s'agissait d'un glissement mais effectivement très ancien et qui avait dû se produire pendant la phase d'alluvionnement, car il ne descendait pas jusqu'au bed-rock sous-alluvial masqué par des alluvions d'une cinquantaine de mètres d'épaisseur ; cette circonstance était néanmoins favorable car la plus grosse partie de la masse glissée se trouvait ainsi butée par ces alluvions très épaisses.

La décision fut donc prise de conserver ce site, mais en toute connaissance de cause, c'est-à-dire en prévoyant dès le départ des travaux de confortement et de drainage analogues, à beaucoup plus petite échelle, à ceux décrits plus haut pour le barrage du Nakhla et cet ouvrage, réalisé depuis plus de dix ans, n'a donné aucune difficulté.

Je citerai encore le cas du barrage en terre (de 30 m environ) de Polemidhia à *Chypre* appuyé en rive gauche sur un vaste glissement d'argiles à très gros blocs qui n'en paraît pas actuellement affecté du point de vue de la stabilité ; par contre, de grosses circulations d'eau donnent à l'aval de très grosses pertes dont on peut craindre qu'elles n'aillent en croissant malgré les tentatives d'injections bien difficiles à réaliser de façon efficace dans de tels matériaux et à retenue plus ou moins pleine.

Enfin, j'ajoute que, soit seul, soit au cours de missions pour des organismes internationaux, mes coexperts et moi-même avons dû à plusieurs reprises demander l'abandon de sites où des projets avaient été établis sans que le projeteur se soit rendu compte qu'un des versants était en fait un très vaste glissement de terrain (deux en Crête et un en Grèce du Nord en particulier).

b) LES « PANNEAUX GLISSÉS »

J'appelle ainsi les vastes masses rocheuses qui glissent le long d'un versant, très souvent en se disloquant assez peu car le mouvement doit être très lent, ce qui permet d'en faire un lever géologique pouvant, lui aussi, prêter à confusion.

J'ai vu ce cas, en particulier en *Iran* sur le *Zayandeh Roud* où, lors de la première mission devant choisir le meilleur site parmi plusieurs envisagés, l'un s'avéra correspondre, en rive droite, à un tel panneau de plusieurs centaines de mètres de long et dont l'étude détaillée me montra (grâce, notamment, à des bancs de quartzites très caractéristiques à sa partie supérieure) qu'il s'agissait d'une masse rocheuse descendue de plusieurs centaines de mètres à partir du rebord du plateau dominant la vallée, et ceci sans dislocations très importantes (fig. 3).

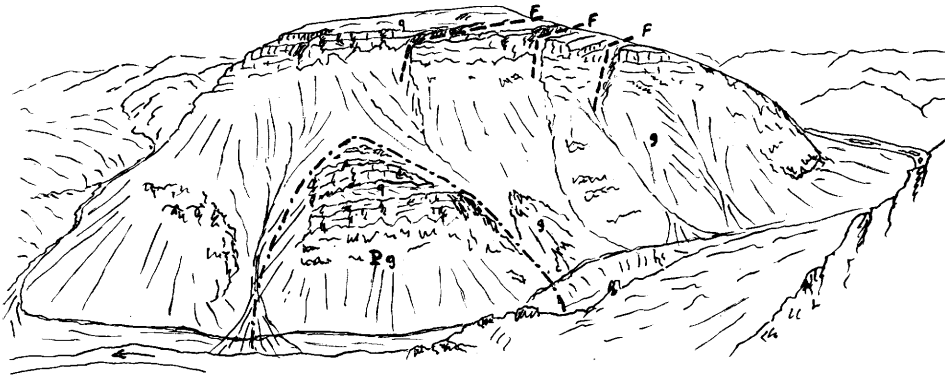


FIG. 3. — Vallée du *Zayandeh Roud* (*Iran*). Dans une série essentiellement schisteuse, avec passages de roches volcaniques, apparaissent à certains niveaux des bancs de grès durs, quartziteux. Ceux-ci forment la corniche supérieure (q), décalée par plusieurs failles (F), mais ont été retrouvés à mi-pente (q) permettant d'affirmer que cette grosse masse rocheuse constituait bien un « panneau glissé » le long de la pente (Pg) et ceci sur plusieurs centaines de mètres de hauteur. Je conseillai donc d'abandonner ce site où avait, antérieurement, été prévu un barrage ; le panneau glissé ayant, évidemment, provoqué en ce point une étroitesse exceptionnelle.

Or, en ce point, favorable évidemment par son étroitesse, avait été projeté un barrage voûte dont on peut espérer qu'il n'aurait finalement pas été réalisé, mais pour lequel on aurait certainement couru à la catastrophe s'il l'avait tout de même été.

Je demandai, personnellement, que ce site fût abandonné et c'est le site du barrage de *Shah Abbas Kébir*, maintenant terminé, qui fut retenu.

c) LES PHÉNOMÈNES D'ÉPIGÉNIE

Le phénomène d'épigénie est bien connu depuis longtemps dans des vallées d'origine glaciaire, comme celle du *Drac* près de *Grenoble*, tout à fait classique à ce sujet (R. Barbier et M. Gignoux, 1955).

Des phénomènes d'épigénie hors du contexte glaciaire sont, au contraire, beaucoup moins connus bien que j'aie eu l'occasion d'en rencontrer plusieurs exemples.

1° *L'aménagement du Bras de la Plaine (La Réunion)*

Ce torrent coule au fond d'un profond canyon creusé dans les séries volcaniques constituant la totalité de cette île, et un petit barrage de dérivation avait été prévu là en un point exceptionnellement étroit du fond de la gorge (fig. 4).

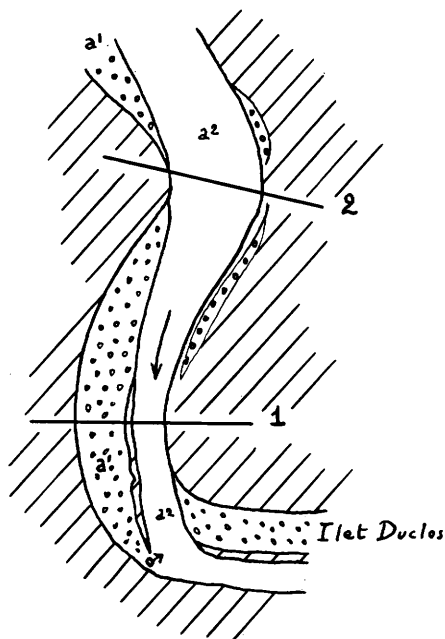
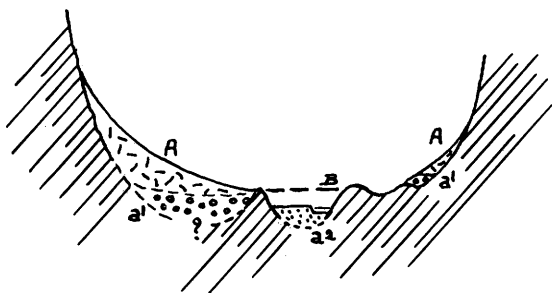


FIG. 4. — Le barrage du Bras de la Plaine (La Réunion). En bas : la carte géologique simplifiée montre qu'entre les alluvions actuelles (a 2) et la falaise basaltique de rive droite, se trouvent des alluvions anciennes (a 1) en partie masquées par des éboulis et donnant, à l'aval, naissance à une petite source. La coupe du haut montre bien que ces alluvions anciennes ne constituent pas une terrasse, mais remplissent un ancien cours qui court-circuite le site du barrage initialement prévu (B) qui se trouve donc dans un court tronçon épigénique ; sur mon conseil, ce site a donc été abandonné pour se reporter en 2 (figure du bas) où l'ancien lit et le nouveau sont superposés, ce qui évite les dangers du site 1, mais avec un ouvrage nécessairement plus long.

Or, c'est précisément ce caractère exceptionnel qui attira tout de suite mon attention et me permit de voir que ce site inespéré était, en fait, épigénique et court-circuité en rive droite par un ancien lit remblayé dont les alluvions disparaissaient presque totalement sous les éboulis de la falaise.

Avec les grosses crues de ce torrent (il tombe là plusieurs mètres d'eau par an) le petit barrage prévu aurait donc été rapidement rempli d'alluvions, et probablement, court-circuité à son tour par déblaiement des alluvions de l'ancien cours.

Je conseillai donc une autre solution qui fut exécutée par la suite.

2° Projet de barrage sur la Cassam, affluent de l'Awash (Ethiopie)

Là encore, une encoche remplie d'alluvions fut mise en évidence dans la rive droite, le cours actuel étant donc épigénique.

Cette encoche n'ayant qu'une dizaine de mètres de profondeur, le barrage de 50 à 60 m prévu restait cependant réalisable, bien que plus difficilement.

Dans les deux cas, on se trouve dans des régions volcaniques et sismiques et il n'est pas impossible que ces phénomènes soient ici en rapport avec des mouvements récents (Quaternaire) entraînant des successions de phases de remblayage et de creusement.

3° *Autres exemples*

A ce chapitre peuvent aussi être rattachés les exemples du Sefid Roud où l'épigénie fut mise en évidence par l'étude d'un tunnel (p. 86) et celui du Soudan, cas particulier d'un phénomène plus général (p. 91).

d) LES ANCIENNES TOPOGRAPHIES ENTERRÉES

1° *Etudes de sites de barrages en République Démocratique du Soudan*

Il s'agit ici encore d'un exemple montrant à quel point une étude générale est nécessaire pour élucider des problèmes particuliers, ce qui était facilité ici par la nécessité de comparer de nombreux sites très distants les uns des autres.

1a. *Morphologie de la région étudiée.* — La partie méridionale du Soudan est, sur des distances immenses, tout à fait plane si l'on excepte les rivières (Atbara et Setit) qui entaillent assez profondément ce plateau sur une hauteur de l'ordre de 50 m environ et quelques rares collines émergeant très peu du plateau.

Les coupes géologiques sont, par contre, généralement très claires dans la zone du « Karab », c'est-à-dire celle des ravinements descendant du plateau vers les rivières (fig. 5).

Il est donc aisé de se rendre compte rapidement que ces ravinements très complexes et touffus se développent dans des terrains tendres : argiles plus ou moins sableuses et alluvions plus grossières.

Ce qui frappe par contre c'est que, très souvent, ces terrains meubles descendent jusqu'au niveau de la rivière alors qu'en d'autres zones le bed-rock (principalement constitué par les « grès de Nubie ») apparaît jusqu'à des hauteurs très variables dans les versants.

Cette structure particulière demandait donc une interprétation d'ensemble afin de pouvoir en tirer les conséquences pour les aménagements étudiés.

1b. *Histoire géologique et paléomorphologie.* — Les accumulations énormes de terrains meubles constituant l'essentiel de la région et se terminant par les terres noires très organiques du plateau dites « cotton-soil » sont l'élément qui frappe tout d'abord : il est manifeste qu'il y a eu là un remblayage extraordinaire, très probablement tertiaire (Pliocène ?), terminé par une surface très plane et rappelant, à beaucoup plus grande échelle, le plateau mio-pliocène de Valensole dans nos Alpes méridionales.

Remblayage suivi d'un creusement quaternaire se poursuivant encore à l'heure actuelle, mais qui ne s'est pas produit sans saccades puisque j'ai pu mettre en évidence, dans ces versants ravinés, des restes de terrasses caillouteuses de dimensions variables adossées aux argiles tertiaires du remplissage général.

Il fallait alors se demander sur quoi ces épandages énormes étaient venus s'installer ; autrement dit, quel genre de topographie ils avaient pu recouvrir et enterrer. Paléotopographie que l'on a bien souvent tort d'imaginer plus ou moins tabulaire, ce qui n'est généralement pas le cas.

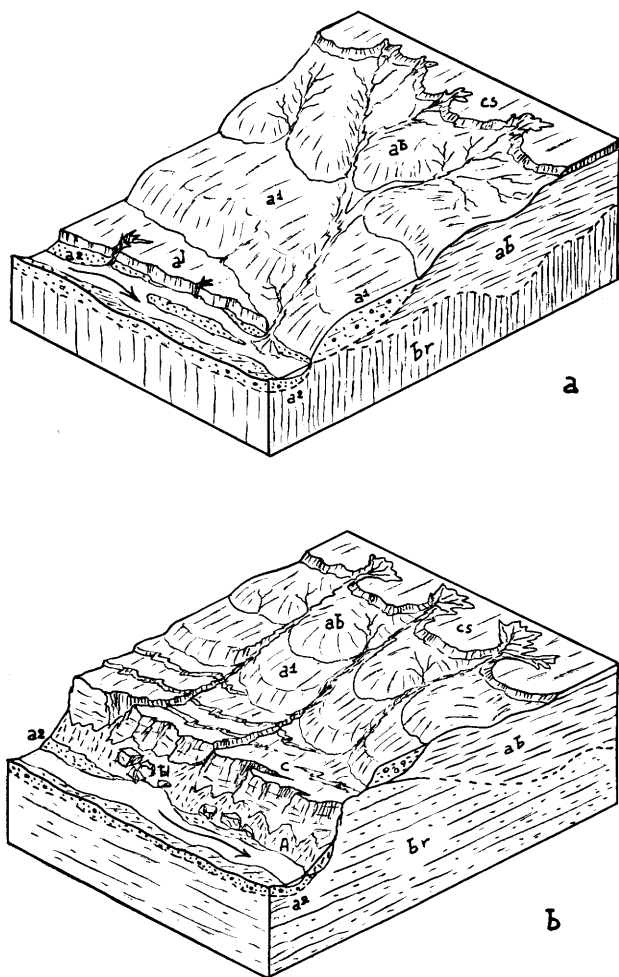


FIG. 5. — *Etudes de barrages sur la Sétit et l'Atbara (République Démocratique du Soudan). Cette région constitue un très vaste plateau dans lequel les rivières se sont encaissées durant le Quaternaire (de 50 m en moyenne). Morphologie très particulière due à une phase de remblayage tertiaire ayant accumulé là de grandes épaisseurs d'argiles surtout brunes (ab) surmontées des terres noires dites cotton-soils recouvrant tout le plateau (cs); durant le creusement quaternaire, des terrasses d'alluvions plus ou moins grossières se sont déposées (al) ainsi qu'une basse terrasse limoneuse (a1), puis les alluvions modernes (a2). Mais les études ont montré que ce remblayage s'est produit sur une topographie du bed-rock (br) déjà fort complexe; il en résulte que ce dernier peut être complètement absent des versants (figure a) ou peut, au contraire, affleurer jusqu'à des hauteurs variables, donnant ainsi des gorges plus favorables, topographiquement, pour des barrages (figure b).*

De fait, en longeant ces rivières, on s'aperçoit rapidement que si l'on dressait une carte géologique un peu détaillée (et encore inexistante) de ces régions, le bed-rock ne représenterait que des taches très discontinues le long des cours d'eau.

1c. *Paléomorphologie et épigénies.* — L'examen des nombreux sites possibles nous a effectivement montré que la paléomorphologie affectant les grès de Nubie était extrêmement complexe, ce qui explique notamment les hauteurs très variables auxquelles monte le bed-rock dans les versants (sans jamais atteindre le plateau).

Or, ces discontinuités sont, par rapport aux rivières :

— longitudinales, puisque le bed-rock n'affleure pas partout d'amont en aval, ce qui est bien visible à l'affleurement ;

— mais aussi transversales, ce qui est beaucoup moins évident et ne pourra, dans la plupart des cas, être démontré que par des reconnaissances appropriées (forages et géophysique).

Mais en deux régions, celles d'El Gira et de Rumeila, ce sont même de véritables épigénies que nous avons pu observer (fig. 6).

Ceci montre bien que la paléomorphologie était assez variée et comportait certainement d'assez vastes zones à faible relief expliquant qu'il faille le plus souvent s'éloigner beaucoup des rivières pour voir le bed-rock émerger du plateau.

Mais cela montre aussi que, dès ces époques lointaines, un réseau hydrographique aussi profond que l'actuel s'était déjà constitué. Ceci n'est d'ailleurs pas très étonnant, les grès de Nubie étant généralement attribués au Jurassique et les terrains du remblayage vraisemblablement au Pliopléistocène. Une très longue période d'émersion s'est donc écoulée entre le dépôt des grès et le remblayage par les argiles, ce qui permet de mieux comprendre pourquoi cette paléomorphologie est aussi complexe et profondément entaillée.

1d. *Conséquences pour les ouvrages.* — La première conséquence est de limiter les zones de barrages possibles à celles où le bed-rock apparaît dans les deux rives, et le plus haut possible. Non pas tant en raison de la présence de rocher car ces grès de Nubie sont le plus souvent très friables et ne pourraient convenir pour des barrages en béton, mais simplement parce que ce sont les sites topographiquement les plus étroits.

Mais une deuxième conséquence importante a été l'élimination des sites proprement épigéniques, c'est-à-dire ceux où le barrage serait, en fait, court-circuité par l'ancien cours remblayé comme le montre le bloc diagramme C de la figure 6.

Enfin, la possibilité de voir le bed-rock s'abaisser dans les versants au large des sites de barrages (fig. 5) posera aussi certains problèmes soit de stabilité, soit aussi d'étanchéité.

2° *Le projet de l'Ouadi Ghan (Libye)*

Ce projet, en cours d'étude, présente aussi des phénomènes analogues, mais à plus petite échelle, et qui ne sont pas évidents *a priori*, les affleurements étant très souvent masqués (en dehors de la gorge) par une sorte de lœss très épais.

On se rend compte néanmoins assez aisément, dans la retenue en particulier, que les coulées basaltiques probablement tertiaires qui forment aussi le haut du versant de rive droite au site du barrage, sont venues s'épandre dans les talwegs et dépressions progressivement comblés par des coulées successives entrecoupées d'alluvions, la dernière coulée seule débordant alors largement le talweg déjà remblayé.

Mais les accumulations de « lœss » remplissent souvent à leur tour d'autres zones déprimées, manifestement creusées, au Quaternaire, après l'épanchement des basaltes : on a donc affaire là à au moins deux topographies successives et successivement remblayées avant le creusement final du cours actuel.

e) PALÉOTOPOGRAPHIES EMBOÎTÉES EN RÉGION VOLCANIQUE (PAPENOO, TAHITI)

Cette île, entièrement volcanique et actuellement très érodée a connu, dans sa période d'activité, des phases successives de creusement des vallées, coupées de phases de remblayage diverses (fig. 7).

De fait, sur ce site :

— la grande série basaltique de base a été creusée profondément une première fois ;

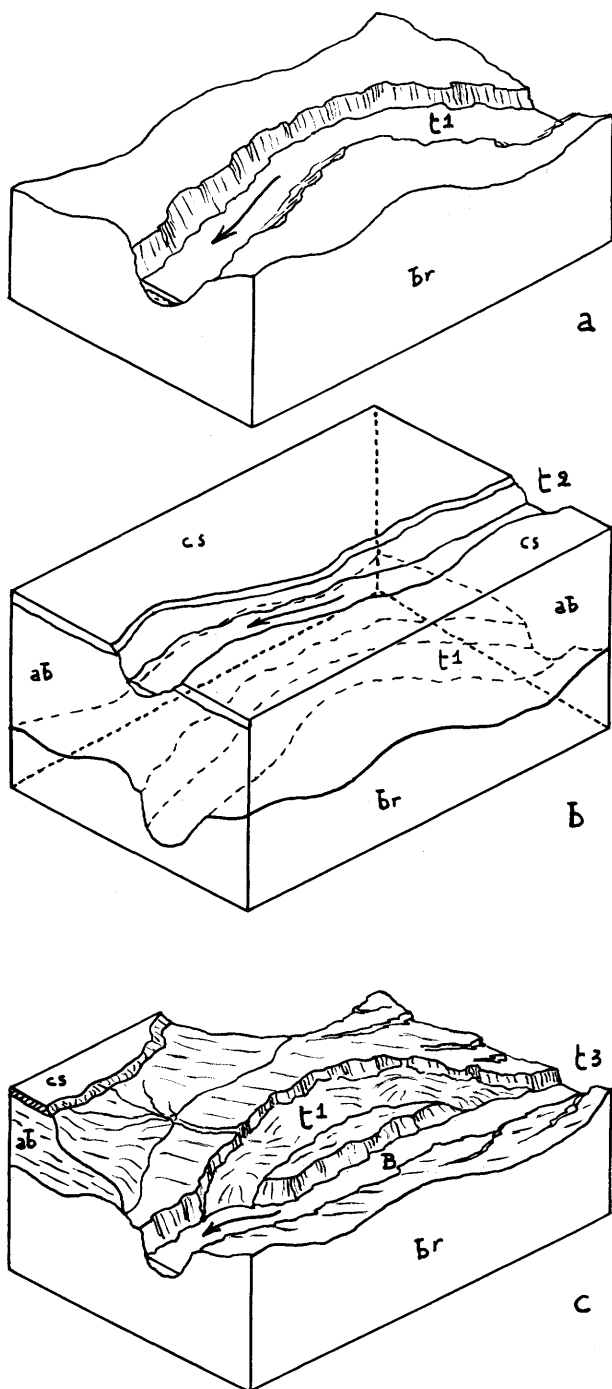


FIG. 6. — Phénomènes d'épigénies en République Démocratique du Soudan. La complexité de la morphologie du bed-rock sous le remplissage argileux (fig. 5) peut aussi, en certains points, donner des phénomènes d'épigénie dont cette figure montre la genèse. En a, première phase de creusement du bed-rock, br (grès de Nubie jurassiques), déterminant un premier talweg t1. En b, phase de remblayage tertiaire par les argiles brunes (ab), avec établissement d'un talweg t2, différent du précédent. En c, état actuel après le deuxième creusement de la vallée (Quaternaire) : le talweg t2 s'est encaissé dans une position différente du talweg t1 ; il en résulte donc que la zone B du cours actuel t3, topographiquement favorable pour un barrage est, en fait, un tronçon épigénique court-circuité par l'ancien talweg t1, déjà aussi profond que l'actuel.

— cette première vallée a été ensuite remblayée d'abord par des coulées volcano-détritiques du genre lahar, maintenant consolidées en brèches très dures ;

— une nouvelle phase de creusement a ensuite été suivie d'une deuxième phase de remplissage, cette fois-ci par une coulée basaltique prismée ;

— enfin, la vallée actuelle s'est elle-même creusée, mais est, au site, remblayée d'alluvions sur 80 m d'épaisseur.

En dehors de ce dernier point, il en résulte donc que le barrage s'appuiera en rive droite sur un épais massif de brèches et en rive gauche en partie sur les anciens basaltes et surtout sur la coulée prismée récente nettement plus perméable que les brèches.

Épaisseur des alluvions et hétérogénéité d'une rive par rapport à l'autre incitent donc à envisager un barrage en terre (de 80 m environ).

f) LE CAS DES « PAINS DE SUCRE » AU BRÉSIL

Je ne rappellerai que pour mémoire l'explication que j'ai été amené à donner de la formation de ces « Pains de sucre » caractéristiques dont le plus célèbre est sans conteste celui de Rio de Janeiro (R. Barbier, 1957a et b).

C'est en effet à l'occasion d'études d'aménagements hydroélectriques que j'ai été amené à me poser la question de leur genèse pour mieux comprendre à quoi il fallait s'attendre et quelles étaient les répercussions possibles ou probables sur les aménagements étudiés.

Ainsi s'explique, entre autres, le fait que très souvent on ait une roche très saine dans une rive et une argile latéritique très épaisse dans l'autre, ce qui n'est évidemment pas favorable pour un barrage ; ou qu'à un site rocheux peut faire suite, au large, une zone altérée à grande profondeur (R. Barbier, 1957b).

D'autres répercussions en découlent aussi pour le tracé des tunnels (exemple de l'aménagement du Caprivari, p. 109).

B. Problèmes de paléogéographie

C'est peut-être une des disciplines que l'on s'attend le moins à rencontrer à propos de géologie de l'Ingénieur.

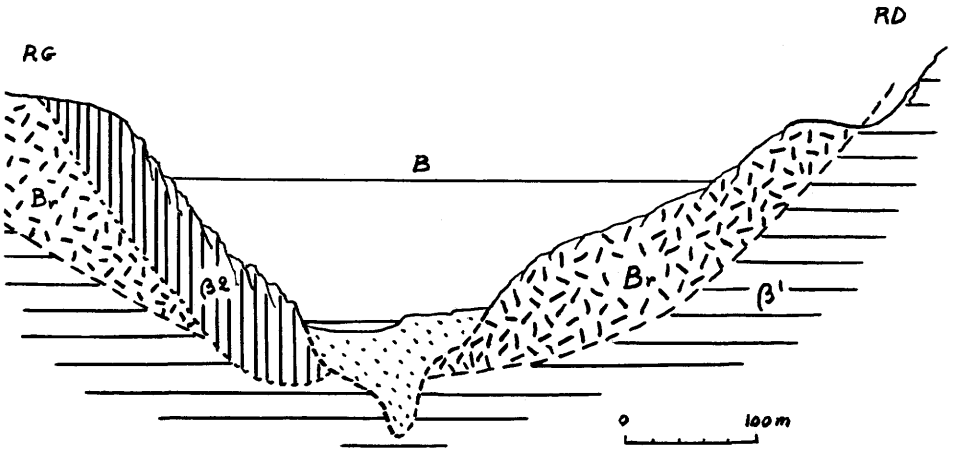
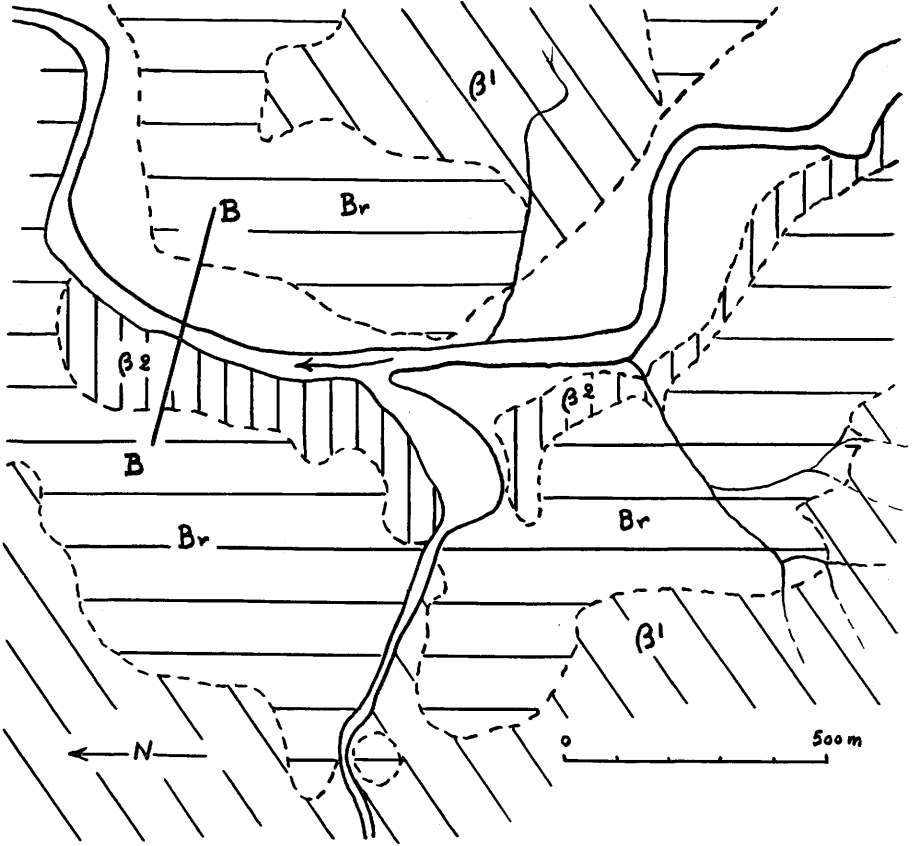
Il est pourtant très important, notamment lorsqu'on a affaire à une série sédimentaire, de se poser la question de savoir, en particulier, si elle est entièrement marine ou si elle ne comporte pas des périodes d'émersion qui ont pu altérer plus ou moins profondément certains niveaux et, par exemple, les karstifier.

a) LE BARRAGE DE BAKHADDA (ALGÉRIE)

Je ne développerai pas cet exemple qui me paraît, sous ce rapport, le plus démonstratif, car il a déjà été publié (voir R. Barbier et M. Gignoux, 1955, p. 170).

Je rappellerai seulement que sous les calcaires gréseux du Miocène formant falaise dans les deux versants, il n'a pas été soupçonné que l'on pouvait rencontrer au-dessous d'eux, dans la fondation, des couches jurassiques qui avaient, alors, toutes chances d'être profondément altérées.

C'est pourtant ce qui arriva et nécessita un travail en sous-œuvre très difficile pour curer les poches karstiques remplies d'argiles qui affectaient les terrains jurassiques.



Or, il aurait sans doute suffi de penser à la Paléogéographie, dans ce cas particulier à la très longue période d'émergence séparant ces deux niveaux (Jurassique et Miocène), pour prévoir cette possibilité, l'étudier et éviter ainsi les difficultés rencontrées soit en déplaçant l'axe de l'ouvrage, soit en les résolvant beaucoup plus aisément en fouilles ouvertes qu'en sous-œuvre.

b) LE BARRAGE DE KEBAN (TURQUIE)

Le même raisonnement aurait pu aussi, semble-t-il, s'appliquer à ce cas dont on sait que le très grand développement du Karst à l'intérieur du massif de calcaires marmorisés a créé des difficultés tout à fait exceptionnelles. Difficultés qui ont nécessité le remplacement de l'écran d'injection par un diaphragme en béton construit à l'intérieur du massif, dans les zones où la densité des cavités karstiques devenait trop grande.

Or, là encore, comme à Bakhadda, c'est une très longue période d'émergence qui a permis une telle karstification de ces calcaires marmoréens appartenant à des séries primaires sur lesquelles viennent directement en discordance des terrains miocènes.

Et l'on peut penser que, surtout pour un barrage de cette ampleur (barrage en enrochements de 175 m de hauteur au-dessus d'un « bouchon » de béton de 40 m dans le fond de la gorge), la prise en compte de cet argument paléogéographique aurait permis d'être plus méfiant au départ quant à ces phénomènes de karstification.

C. Problèmes de structure

Les problèmes de structure sont naturellement ceux auxquels on pense le plus pour l'étude des sites de barrage, en comprenant sous ce terme la *définition totale, dans l'espace, des volumes sur lesquels le barrage va reposer*, qu'il s'agisse de stratigraphie (souvent prédominante dans les terrains sédimentaires) ou de fracturation, prédominante dans les terrains cristallins.

Le premier cas est plus « géologique », au moins au départ, et nécessite une bonne connaissance de la stratigraphie régionale, le second est plus « géométrique » et nécessite des études plus spécialisées d'analyse structurale débouchant sur la Mécanique des Roches.

a) LE BARRAGE DU D. EN ALGÉRIE

Ce cas me paraît bien typique de ce point de vue de la « structure globale » car, pour résoudre celle-ci correctement, il a fallu faire appel :

FIG. 7. — *Projet de barrage de la Papenoo (Tahiti) (d'après les levés de M. Becker simplifiés).*
 En haut : carte géologique montrant la répartition des différents terrains : B 1, coulées basaltiques principales de base ; Br, agglomérats bréchiques ayant comblé une première vallée ; B 2, basaltes prismés ayant rempli la deuxième vallée, recreusée à peu près à l'emplacement de la précédente ; en blanc, alluvions et éboulis ; BB, axe probable du barrage. En bas : coupe géologique dans l'axe du barrage montrant bien les emboîtements des divers terrains dus à des phases successives de creusement et d'émissions volcaniques ; en pointillé, alluvions modernes très épaisses ; B, crête probable du barrage.

— d'une part à la discipline stratigraphique avec définition d'un « banc-repère » montrant clairement la parenté des terrains des deux rives ;

— d'autre part, à la tectonique qui a seule permis de comprendre et d'interpréter correctement la disposition des couches en rive droite.

Ce projet de barrage est situé dans une zone de Miocène inférieur constitué de marnocalcaires, de marnes silteuses, de calcaires bréchoïdes et de grès plus ou moins cimentés.

Mais il se trouve à proximité de nappes constituées de Crétacé supérieur marneux ou à faciès flysch qui forment l'essentiel de la cuvette de la retenue.

1° *La première interprétation de la structure du site*

La figure 8 montre que si la structure de la rive gauche apparaissait dès le début comme relativement simple, avec une auréole de grès vers l'aval où elle surmonte des marnocalcaires concordants, il n'en était pas de même en rive droite.

Là, en effet, apparaissaient non plus des marnocalcaires, mais des barres de grès à peu près parallèles au versant et plongeant fortement vers la rivière : les structures des deux rives apparaissaient donc tout à fait différentes et ceci demandait, évidemment, une explication pour l'établissement du projet de barrage.

Celle qui fut proposée tout d'abord et avant notre intervention, probablement parce qu'on se trouve à proximité du chevauchement des nappes s'étendant à l'amont, fut d'admettre que les grès de la rive droite formaient une écaïlle tectonique « flottant » sur un substratum analogue aux terrains de rive gauche (fig. 8).

2° *Critique de cette interprétation*

Un tel chevauchement aurait été extrêmement gênant, voire dangereux, car il si cette interprétation correspondait vraiment à la réalité ou s'il fallait la considérer se serait trouvé dans la zone de fondation du barrage : il importait donc de vérifier comme une simple hypothèse.

Trois remarques m'ont alors permis, avec la collaboration de A. Giraud (voir A. Giraud, 1974) de montrer :

— qu'à certains niveaux des marnocalcaires affleurant au large rive droite, on trouvait des lits de blocs et galets de grès durs pouvant donc constituer un ou plusieurs « banc-repère » ;

— que ces mêmes niveaux à galets se retrouvaient en rive gauche, ce qui montrait bien la parenté existant, en fait, entre les terrains de ces deux rives ;

— que les forages déjà exécutés et traversant le « chevauchement » montraient en fait non la zone écrasée et perturbée qui aurait dû correspondre à celle-ci, mais une séquence caractéristique montrant un passage régulier et manifestement stratigraphique des grès aux calcaires marneux sous-jacents par l'intermédiaire de calcaires microbréchiques caractéristiques ;

— que cette séquence pouvait, de plus, être retrouvée dans d'autres forages qui, eux, étaient tout à fait en dehors de l'écaïlle envisagée.

Il en fut donc conclu qu'il y avait là une interprétation très probablement inadéquate ; encore fallait-il en trouver une autre... et la vérifier.

3° *Nouvelle interprétation*

La parenté entre les deux rives s'affirmant et le chevauchement paraissant inadéquat pour expliquer la différence de structure entre les deux rives, l'hypo-

thèse venant à l'esprit était évidemment celle du passage possible d'une faille au pied de la rive droite, mais totalement masquée sur le site par les éboulis et les terrasses alluviales.

Or, l'examen du lit de la rivière à l'amont du site montrait le passage manifeste d'une grande faille perturbant très notablement les terrains et qui ne pouvait pas être, du fait de sa direction, la prolongation de la faille F 1 déjà reconnue.

Ce pouvait donc être l'accident recherché, car sa direction aboutissait effectivement au pied de la rive droite comme dans la nouvelle hypothèse envisagée.

Il fallait cependant s'en assurer par des reconnaissances puisque les terrains de couverture masquaient tout dans la zone incriminée : c'est ce que confirmèrent les forages inclinés S 8 et S 9 qui la traversèrent en deux points, le troisième étant fourni par la tranchée T 6.

C'est ainsi qu'a pu être finalement dressée la coupe géologique de la figure 8 montrant :

— la régularité de la rive gauche avec ses grès surmontant la série de marnocalcaires divers et seulement accidentée de failles secondaires ;

— la présence d'un compartiment sans doute remonté de marnocalcaires micro-bréchiques entre les failles F 1 et F 2 ;

— la structure réelle de la rive droite, avec le fort plongement vers la rivière de couches de grès et de calcaires marneux fortement abaissés, au-delà desquels on retrouve les marnocalcaires à blocs et galets identiques à ceux de rive gauche.

4° Conséquences pour le projet

L'écaille « flottante » de la première interprétation pouvait conduire à de graves difficultés de stabilité en raison de la présence d'une grande discontinuité à peu près parallèle à la pente.

La coupe réelle obtenue ensuite montre au contraire que les grès de rive droite plongent plus fortement que le versant, et sont ainsi bien enracinés en profondeur et butés par les marnocalcaires du compartiment pris entre les failles F 1 et F 2.

La stabilité de ce versant n'était donc plus en cause comme dans le cas précédent et, le choix s'étant porté finalement sur un barrage en terre, on a même pu prévoir dans cette rive un évacuateur de crues superficiel.

Ce cas montre donc bien à quel point est nécessaire une étude s'étendant assez largement au-delà du site lui-même pour arriver à en interpréter correctement la structure lorsqu'elle n'est pas évidente *a priori* comme ici.

L'importance aussi de l'utilisation des méthodes d'observation « normales » de la stratigraphie et de la tectonique simplement « appliquées » à la résolution d'un problème pratique.

Autres exemples

Ces problèmes de structure étant de beaucoup les plus connus, je ne rappellerai ici que quelques autres exemples, mettant surtout en cause les phénomènes tectoniques.

a) BARRAGE DE MALPASSET (VAR, FRANCE)

On avait là (Massif de l'Estérel) des gneiss le plus souvent très lités et à l'allure de micaschistes, ce qui n'était pas très favorable pour un barrage-voûte.

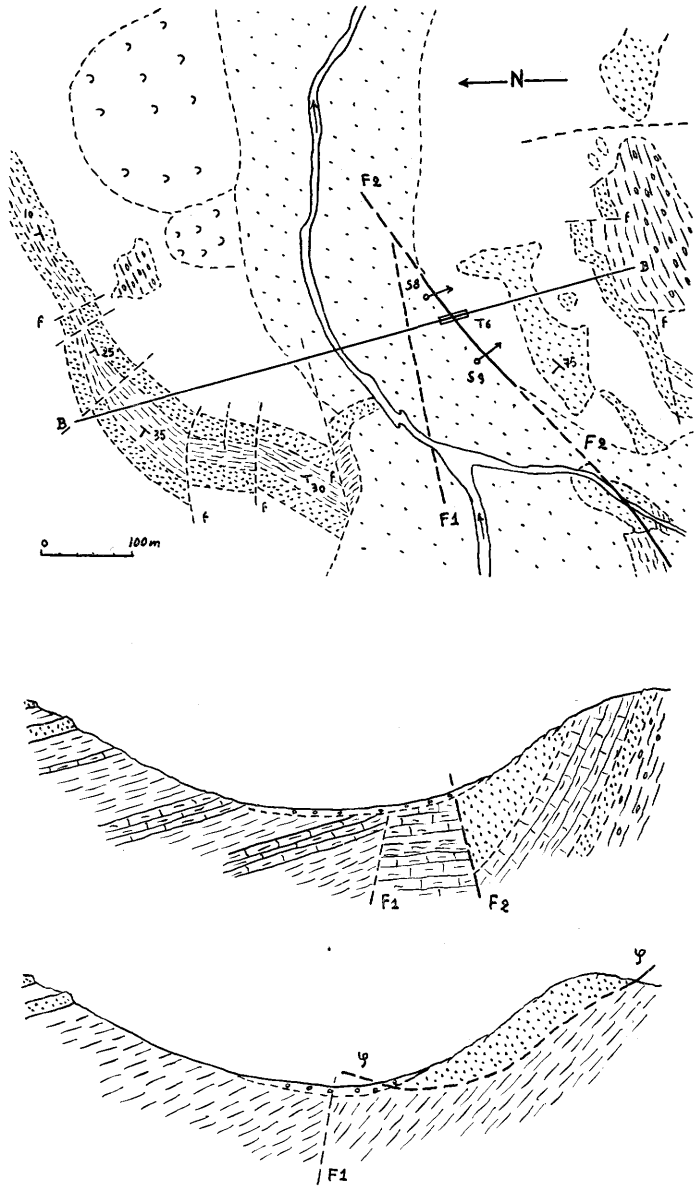


FIG. 8. — Le projet de barrage du D. (Algérie). Ce site offre des affleurements assez limités comme le montre la carte du haut (en blanc, éboulis et alluvions ; en pointillé lâche, alluvions anciennes et modernes) ; aussi la structure admise lors des premières études fut-elle celle de la figure du bas, c'est-à-dire grès de rive droite (pointillé serré) constituant une écaille « flottant » sur le substratum marneux. Une telle disposition étant dangereuse pour la fondation du barrage, des études plus poussées furent entreprises (carte du haut) et suggèrent qu'en fait : 1° un niveau-repère de marnocalcaires à galets (traits et ronds) retrouvé dans les deux rives, montrait la parenté stratigraphique qui existait entre elles, rendant peu vraisemblable l'allochtonie de la rive droite ; 2° que la dissymétrie complète d'une rive à l'autre était probablement

Mais c'est surtout l'extrême fracturation de la roche qui peut être tenue pour la cause initiale de la catastrophe car c'est elle qui a permis aux sous-pressions de se développer et d'aboutir à la destruction de l'ouvrage.

De fait, B. Schneider (1967) a pu, à ce propos, distinguer trois grands types de structures d'origine tectonique :

- les mégastructures, le plus souvent kilométriques ;
- les mésostructures d'ordre métrique ou, au plus, décamétrique ;
- les microstructures allant de l'échelle centimétrique à celle de la lame mince.

Et l'on peut effectivement penser que, dans ce cas particulier, même les discontinuités millimétriques décelées en lames minces ont pu jouer un rôle dans le cheminement des sous-pressions pouvant ainsi se faire à toutes les échelles.

Mais on peut aussi faire intervenir un autre facteur : la multiplicité, non seulement des échelles, mais aussi des directions de fracturation s'entrecoupant les unes les autres au point que l'analyse structurale n'en devenait possible qu'en effectuant un tri préalable des directions paraissant les plus importantes à répertorier.

Et c'est bien là que nous retombons sur notre sujet en revenant à ces considérations générales dont je pense qu'il ne faut jamais les perdre de vue, même en géologie de l'ingénieur qui peut *a priori* en paraître éloignée. Si, en effet, on avait attaché plus d'importance à l'histoire tectonique de ce massif très ancien, on se serait aperçu qu'il avait subi plusieurs orogénèses successives dont les plus nettes (sans en excepter d'autres plus anciennes éventuelles) sont l'orogénèse hercynienne (synclinal houiller de Fréjus de direction sensiblement nord-sud) suivie de la phase pyrénéo-provençale est-ouest, puis des diverses phases alpines, généralement sud-est-nord-ouest. On aurait dû alors en conclure que cette question était particulièrement importante, surtout dans ce type de roche déjà très fragmentée par son litage initial et que, par conséquent, elle devait être étudiée de très près.

J'ajoute, enfin, que la cause de la forme explosive qu'a prise cet accident est manifestement en relation avec les grands plans de fracture délimitant le dièdre de rive gauche, si visible après l'accident.

Il est donc certain qu'ici tous les ordres de grandeur de fracturation ont joué leurs rôles, malheureusement conjugués dans un sens néfaste, pour aboutir à la destruction de cet ouvrage.

b) BARRAGE D'AVÈNE (HÉRAULT, FRANCE)

Ce barrage-voûte de 60 m de haut fondé sur des quartzites en bancs verticaux et perpendiculaires à la rivière, se fondait donc sur un massif à structure très simple à grande échelle et avec une fracturation assez banale (la Montagne Noire ayant beaucoup moins souffert tectoniquement que l'Estérel).

due au passage de la faille F 2 (repérée d'abord en bas à droite dans le talweg) au pied de la rive droite où elle était entièrement masquée par le Quaternaire. Ceci fut ensuite vérifié par deux forages obliques S 8 et S 9 et une tranchée (T 6), ce qui permit, avec d'autres forages, d'affirmer que ces grès de rive droite n'étaient pas « flottants », mais bien enracinés grâce à cette faille F 2, ce qui était bien préférable pour la stabilité du barrage (coupe de la figure médiane. (A noter que les deux coupes, correspondant à des stades d'études différents, ne sont pas exactement sur le même axe ; la coupe médiane correspond à l'axe actuel du barrage projeté, BB, sur la figure du haut).

L'étude géologique détaillée (Cheylan, G., 1965) montra cependant l'existence d'une faille le long de la rivière où elle était entièrement masquée par les alluvions. De fait, les fouilles firent apparaître très clairement cette faille, remplie de quartzite broyé, de calcite rose et d'illite sur 0,40 m de largeur : mais elle était en fond de vallée et les reconnaissances par sondages montrèrent qu'elle était verticale. Les matériaux meubles furent éliminés et remplacés par du béton et aucun inconvénient ne résulta de cette faille pour le barrage, faille qui fut néanmoins traitée par injections en profondeur.

Ceci pour deux raisons : d'abord parce qu'elle avait été décelée, bien qu'inapparente, dès les études préliminaires ; ensuite, en raison de sa position dans l'espace par rapport aux contraintes de la voûte, ce qui est en fait primordial pour tous ces grands accidents et ressort très bien de la comparaison de ces deux exemples, car la faille d'Avène était, en fait, une macrostructure assez semblable au plan aval du dièdre rive gauche de Malpasset mais qui, lui, était dans une position dans l'espace beaucoup plus défavorable et dangereuse.

c) BARRAGE DE CASTILLON (BASSES-ALPES, FRANCE)

Je ne ferai que rappeler ce cas, déjà décrit (R. Barbier et M. Gignoux, 1955), pour souligner la grande importance des accidents tectoniques et de leur compréhension : ici, un petit anticlinal éclaté à failles divergentes dans l'appui de rive droite et d'autant plus inattendu que sa direction est perpendiculaire à l'allongement général de la barre de calcaires jurassiques régulière et longue de plusieurs kilomètres sur laquelle l'ouvrage est fondé.

Cette zone tectonique si particulière et localisée n'en nécessita pas moins d'importants travaux de consolidation de ce massif d'appui, éclairés par l'étude tectonique détaillée.

d) BARRAGE DE SHAH ABBAS KÉBIR (IRAN)

Ce barrage-voûte d'une centaine de mètres de hauteur est fondé sur des alternances de schistes et quartzites, sorte d'ancien flysch métamorphisé. Mais, grâce à un climat désertique très dur (est d'Ispahan, vers 2 000 m), les versants étaient à tel point recouverts d'éboulis que les affleurements rocheux étaient très rares.

Une étude limitée au site lui-même n'aurait donc pu être basée que sur des forages et des galeries « systématiques ». Or, l'étude générale de la région fit apparaître un grand accident tectonique oblique, accompagné de très mauvais schistes graphiteux, qui semblait bien devoir passer à mi-hauteur de la rive droite.

Ceci peut être confirmé en éliminant dans cette rive l'épaisse couverture d'éboulis, ce qui ne se serait pas justifié au stade des études, si ce n'avait été pour vérifier un point très important pour la stabilité de l'ouvrage et qui, autrement, ne serait apparu, à la grande surprise de tous, qu'au moment de l'ouverture des fouilles.

IV. LES ÉTUDES GÉOLOGIQUES DE RETENUES

Le problème majeur est ici, bien entendu, de s'assurer que l'eau destinée à être accumulée dans la retenue y restera et que celle-ci pourra être remplie : ce problème

des *possibilités de fuites* est particulièrement crucial dans le cas des calcaires, surtout s'ils sont karstiques (voir à ce sujet la très intéressante thèse de R. Therond, 1973).

Mais on sait aussi, à vrai dire surtout depuis la catastrophe de Vajont-Longarone, que le problème de la stabilité des berges est aussi important et parfois même, comme dans ce cas, capital.

A. Le problème des possibilités de fuites

Ce problème est souvent, et heureusement, assez facile à résoudre lorsque la retenue ne doit baigner que des roches pouvant être considérées comme étanches à cette échelle (roches cristallines ou métamorphiques, flysch, marnes...); mais encore faut-il s'en assurer avec soin.

D'autre part, il faut prendre aussi en considération ce que j'appelle le *risque théorique de fuites*, c'est-à-dire la longueur de percolation entre la retenue et la possibilité topographique de ressortie éventuelle des eaux; non pas à l'aval du barrage, car ce problème est traité avec celui-ci (au besoin avec exécution de « voiles au large » d'injection) mais vers d'autres vallées, soit affluentes (à l'aval du barrage), soit diffluentes (autres bassins versants).

Mais, sauf cas particulier, notamment si l'on a, en certains points de la retenue, un risque théorique de fuites à percolations très courtes, les roches qui devront attirer particulièrement l'attention sont, évidemment, les roches solubles: calcaires, surtout lorsqu'ils sont karstiques et gypses (qui, à la différence des précédents, sont solubles à l'échelle des travaux et, donc, éventuellement du fait de ceux-ci).

Et, bien que ces problèmes soient, en principe, bien connus notamment depuis les difficultés des barrages espagnols de Monte Jaque et Camarasa (voir R. Barbier et M. Gignoux, 1955 et R. Therond, 1973), il y a déjà une quarantaine d'années, le risque d'une retenue sèche existe néanmoins comme le montre l'exemple suivant.

a) BARRAGE DE PERDIKKAS

Il s'agit d'une digue en terre de 27 m de hauteur construite dans une zone de collines d'alluvions plio-pléistocènes peu perméables. Mais, après une première mise en eau normale, des pertes très importantes se produisirent par le fond de la cuvette: là en effet se trouvaient, sous le Pliopléistocène, des calcaires fortement karstiques où ces dernières s'engouffrèrent avec l'eau de la retenue, créant en surface de multiples et parfois très vastes « entonnoirs d'ablation ».

C'est qu'en fait, s'il y avait bien une nappe suspendue dans les terrains alluviaux, les calcaires karstiques étaient en fait dénoyés jusqu'à une deuxième nappe très profonde et c'est dans ce karst sans eau que celles de la retenue entraînaient les alluvions: phénomène qui se produit même là où la couverture alluviale atteignait jusqu'à 40 m d'épaisseur (N. S. Kaessaris, A. Falconnier et E. v. Gottstein, 1965).

Les premiers affleurements de calcaires n'apparaissant qu'à une douzaine de kilomètres du site, l'existence de ce karst « sec » sous la retenue ne fut pas soupçonnée; seule la présence de quelques blocs calcaires dans un petit vallon de rive droite à 400 m du site aurait pu, en fait, attirer l'attention sur ce risque et provoquer alors des reconnaissances à grande profondeur. Mais ce ne fut pas le cas et après bien des tentatives pour obturer les zones de fuites, on dut y renoncer.

b) BARRAGE DU MORNOS (GRÈCE)

Il s'agit là d'un projet très important pour l'alimentation en eau d'Athènes, comportant un barrage en terre de plus de 100 m de hauteur et une adduction de 150 km environ par canaux et tunnels, à l'étude duquel j'ai participé dès le début et qui est actuellement en cours de réalisation.

Les problèmes posés par la retenue sont très typiques de l'optique dans laquelle je me suis placé ici.

1° *Structure géologique générale*

La structure géologique générale est assez complexe comme on peut en avoir une idée par la carte de P. Celet (1962) qui n'existait d'ailleurs pas encore lors des premières études et reste assez schématique (1/200 000).

Et, de fait, si le site du barrage et une grande partie de la retenue sont dans le flysch pouvant être considéré comme imperméable à l'échelle de celle-ci, un certain nombre de massifs calcaires (crétacé et jurassique) pointaient au travers de ce flysch et la plupart d'entre eux devaient être baignés par la retenue.

Or, il était bien évident que de la structure de ces massifs calcaires allaient dépendre très étroitement les problèmes d'étanchéité de la retenue et qu'il fallait donc l'étudier avec une grande précision.

Le premier travail a donc consisté à faire exécuter des cartes à échelles convenables car seul le 1/50 000 existait ici ; ce furent une carte générale (barrage et retenue) au 1/5 000 et des cartes au 1/2 000 pour la zone des calcaires de la retenue.

Documents de base indispensables qui seuls pouvaient permettre d'exécuter les levés géologiques très détaillés qui ont ainsi pu être réalisés.

2° *Structure géologique détaillée des calcaires de la retenue*

Comme le montre la figure 9, on pouvait s'attendre à ce que la diversité de structure et de taille de ces différents massifs calcaires pose des problèmes également très variés et c'est à ce titre que cet exemple me paraît particulièrement instructif.

Le massif 1 (Vardoussia), au nord, n'est mentionné ici que pour mémoire car il se termine en pointe vers le bas, juste au-dessus de la future retenue : ceci parce qu'il est recouvert à l'est de son flysch normal et qu'il chevauche au contraire celui-ci à l'ouest ; mais ce massif étant très étendu nord-sud, et donc aquifère, alimente à sa terminaison méridionale une belle source vauclusienne montrant de façon particulièrement nette et claire la relation étroite existant entre la structure géologique et l'hydrogéologie.

Le massif 2 (Pyrnos, au sud-est) doit, au contraire, être baigné par la partie supérieure de la retenue ; or, bien que ce massif soit interrompu par du flysch à l'affleurement, on pouvait néanmoins penser que des fuites seraient possibles par ses calcaires car il se dirige vers la mer où l'on connaît des sources sous-marines (20 km avec une dénivellation de l'ordre de 400 m) ; à noter qu'à l'est, les calcaires passent progressivement au flysch imperméable alors qu'ils chevauchent ce dernier à l'ouest.

Le massif 3 (Sténo au centre) était, à première vue, le plus inquiétant car les calcaires y sont fortement karstiques et seront recouverts de plus de 80 m d'eau par la retenue : il importait donc d'en vérifier très soigneusement la structure, ce

que permirent les levés détaillés, en décelant, en particulier, dans ce massif, une structure anticlinale très nette mais très complexe (failles longitudinales).

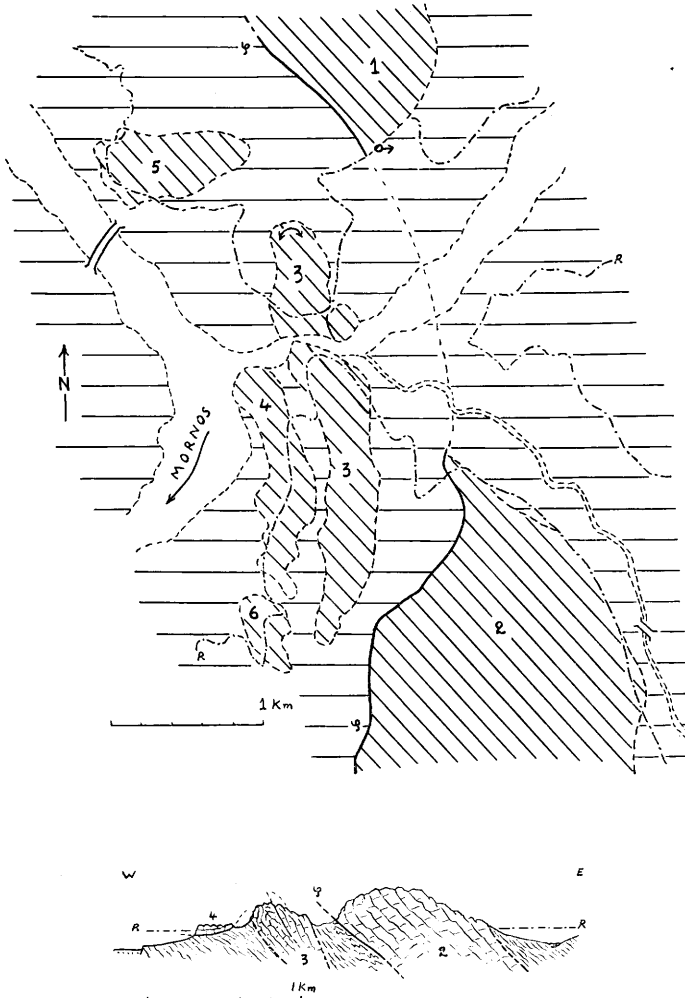


FIG. 9. — Aménagement du Mornos (Grèce). a) Carte schématique montrant la position des massifs calcaires (hachures obliques) qui seront baignés par la retenue (R, trait mixte) qui, pour le reste, est entièrement dans le flysch (hachures horizontales); en blanc, alluvions des rivières principales. 1, massif de Vardoussia donnant une grosse source vauclusienne au niveau de la retenue; 2, massif du Pynnos qui sera baigné à sa bordure orientale et sur une faible hauteur; 3, massif de Sténo coupé en une petite gorge étroite par le Mornos et qui sera baigné sur environ 80 m de hauteur; 4, dalle calcaire « décoiffée » de l'anticlinal 3 et reposant sur le flysch; 5 et 6, petites écailles en dôme enchâssées dans le flysch; trait continu (φ), chevauchement des massifs 1 et 2 sur le flysch. Le barrage sur le Mornos est situé à 4 km à l'aval du massif 3 et reposera sur le flysch. b) Coupe géologique E-W, montrant l'allure en écaille anticlinale enchâssée dans le flysch du massif 3 et le décoiffement qui en est issu (4); à droite, massif du Pynnos (2) chevauchant le flysch à l'ouest (φ) et recouvert par lui en série normale à l'est. Trait mixte (R), niveau de la future retenue.

Deux hypothèses restaient cependant possibles :

— ou bien il s'agissait d'une écaille crétacée perçant le flysch et sans rapport avec le massif 2 voisin dont il est séparé à l'affleurement par une longue bande de flysch ;

— ou bien, ce flysch s'amincissant en profondeur, il pouvait y avoir là contact entre ces massifs 2 et 3 et, par conséquent, risque de fuites du massif 3 vers le massif 2.

La première hypothèse, comme géologue alpin, me paraissait la plus vraisemblable et reçut ultérieurement une confirmation dans le fait que P. Celet (1962) attribue ces écailles occidentales à la zone du Pinde, alors que le massif 2 appartient à une sous-zone de stratigraphie un peu différente, celle de Vardoussia.

Le massif 4, consiste en une vaste dalle calcaire pour laquelle la seule interprétation valable fut celle d'un « décoiffement », c'est-à-dire le glissement vers l'ouest de cette dalle à partir de l'anticlinal voisin 3 : ce qui put être facilement vérifié par des forages qui, tous, retrouvèrent le flysch sous ces calcaires, montrant clairement qu'ils ne pouvaient en aucun cas être cause de fuites.

Enfin, *les massifs 5 et 6*, dans la même situation tectonique et appartenant à la même zone que le massif 3, se présentent comme de petits dômes crétacés au milieu du flysch : ils ne seront, de plus, qu'assez faiblement baignés par la retenue, le plus méridional en particulier.

3° *Les études hydrogéologiques*

Les études stratigraphiques et tectoniques très détaillées donnaient déjà de fortes présomptions sur la structure de ces divers massifs, mais pour un tel aménagement, ce sont des certitudes qu'il faut tenter d'avoir.

Du point de vue géométrique, c'est-à-dire de la constitution réelle de ces massifs en profondeur, seuls des forages très profonds (et donc très onéreux) auraient pu donner des éléments complémentaires, mais peut-être pas toujours déterminants.

C'est pourquoi j'ai eu recours à l'hydrogéologie en faisant placer dans ces divers massifs de très nombreux forages piézométriques qui ont été relevés pendant plusieurs années consécutives (sauf dans les massifs 1 et 4, dont nous avons vu qu'ils étaient déjà hors de cause du point de vue des fuites éventuelles).

Pour le *massif 2*, des profils de sondages perpendiculaires au versant ont bien confirmé l'imperméabilité croissante en passant des calcaires karstiques du cœur du massif au flysch ; mais celui qui a été poussé à grande profondeur dans les calcaires karstiques n'a trouvé la nappe (zone de saturation du karst) qu'à plus de 150 m au-dessous de la future retenue.

Ainsi s'est confirmé le risque manifeste de fuites, bien difficiles à estimer, mais devant normalement être limitées car il s'agit de la partie haute de la retenue qui ne sera donc pas toujours pleine et où, de toutes façons, les pressions sont faibles.

Il n'en restait pas moins qu'un écran étanche devait être réalisé ici pour empêcher ces fuites de se produire.

Pour le *massif 3*, étant donné la pression de l'eau et la karstification des calcaires, il est certain que l'eau pénétrera dans ces derniers : mais, dans l'hypothèse structurale la plus favorable, cette écaille devait être entièrement « emballée » dans le flysch imperméable et ne pouvait donc pas donner de fuites.

C'est, pensons-nous, ce qu'ont montré les études hydrogéologiques qui ont décelé :

— une nappe très basse, mais coulant néanmoins vers la rivière, niveau très bas s'expliquant très bien, je pense, du fait de la conjugaison du très petit bassin versant représenté par ce petit massif et de la grande perméabilité des calcaires très fracturés et karstifiés (surtout vers la surface) qui le constituent ;

— mais, d'autre part, seule la communication entre ce massif 3 et le massif 2 aurait pu faire craindre d'éventuelles fuites : or, si tel était le cas, la nappe du massif 3 devrait avoir une pente vers le massif 2 (et non l'inverse comme nous venons de le voir) avec même, comme cela arrive souvent en pareil cas, une nappe bien au-dessous de la rivière qui, elle, continue à couler sur un lit colmaté ;

— enfin, une telle communication est aussi à écarter du fait que la dénivellation entre les nappes de ces massifs est de 130 m environ pour une distance de l'ordre du kilomètre : ceci donnerait donc un gradient minimal de 130 pour 1 000 alors que, dans les calcaires karstiques, des statistiques montrent que les pentes moyennes sont de l'ordre de 5 pour 1 000 seulement (voir, en particulier, R. Therond, 1973) ; il en résulte, en fait, que ce phénomène ne s'explique, hydrauliquement, que par la présence entre ces deux massifs d'un diaphragme étanche jouant le même rôle qu'un voile d'injection artificiel au large d'un barrage et qui ne peut être ici, bien évidemment, que la zone de flysch étanche qui les sépare.

Il nous est donc apparu que ce massif était bien totalement enchâssé dans le flysch imperméable et ne pouvait donc donner aucune fuite, même vers le massif 2.

Enfin, le petit *massif 5*, au nord-ouest, présentait une caractéristique hydrogéologique intéressante : l'existence, au pied de son flanc ouest, d'une petite source, manifestement de « trop-plein » sortant au point bas de la limite calcaire-flysch ; ce qui fut aussi vérifié par un forage piézométrique confirmant que ce massif était bien, lui aussi, emballé dans le flysch et ne pouvait donc donner de pertes ; il en a été pratiquement de même pour le petit *massif 6* dans lequel le forage piézométrique a aussi détecté une nappe à la hauteur du « trop-plein » possible, ici encore le point bas de la limite calcaire-flysch.

On voit ainsi, encore une fois, le rôle capital joué par une étude géologique générale et précise et l'aide aussi, indispensable dans un tel cas, que peuvent apporter les études hydrogéologiques pour la solution de tels problèmes.

B. Le problème de la stabilité des berges

Depuis la catastrophe de Vajont-Longarone, il n'y a aucun doute que ces problèmes sont beaucoup plus pris au sérieux et étudiés qu'autrefois, à juste titre et pour plusieurs raisons.

1° Déversement par-dessus le barrage

Cette possibilité constitue vraiment le risque majeur et il a fallu, à Vajont, un barrage-voûte bien ancré pour résister à un pareil déversement : ce qui n'aurait, évidemment, pas été le cas pour un barrage en terre ou enrochements comme on en fait de plus en plus.

Il faut cependant noter que la rapidité du phénomène (on a parlé de 60 km/h) a été due à ce qu'on avait affaire ici à un écroulement par clivage couche sur couche,

bien matérialisé encore actuellement par la grande dalle lisse qui subsiste au flanc du mont Toc, et non un glissement de terrains comme on l'a dit souvent.

Or, c'est bien la caractéristique des écroulements rocheux d'être pratiquement instantanés, alors que les véritables glissements de terrain sont beaucoup plus lents : distinction qu'il ne faut donc pas perdre de vue, car seul le phénomène « instantané » peut provoquer une vague vraiment dangereuse pour le barrage.

Et, là encore, on a un exemple de la nécessité d'une étude suffisamment générale pour savoir, dans chaque cas, à quel phénomène il faut exactement s'attendre.

2° *Les atterrissements par mouvements de terrain*

Il ne s'agit pas ici de l'alluvionnement normal (pour lequel d'ailleurs il est fort utile d'avoir une connaissance suffisante de la géologie du bassin versant), mais de ceux qui peuvent se produire par glissements de terrains ou, éventuellement, écroulements rocheux (qui présentent alors, en plus, le risque précédent).

La possibilité de diminution appréciable du volume de la retenue sera alors, bien sûr, d'autant plus grande que celle-ci sera plus petite : risque qu'à la limite on ne peut pas courir.

Par contre, pour de grandes retenues, ce risque peut être négligeable sinon dans les zones où les ouvrages sont menacés (maisons, routes...). C'est le cas du barrage d'Idriss I^{er} près de Fès au Maroc où les nombreux glissements des berges ne peuvent influencer valablement sur une retenue de 1 milliard de m³ ; des travaux de confortement ne sont donc prévus que pour la voie ferrée Fès-Oudja que viendra lécher la retenue.

3° *Le cas de l'Acheloos dans la région d'Avlaki (Grèce)*

Une autre solution consiste à « éliminer l'obstacle ». Ce fut le cas lors des études effectuées sur l'Acheloos pour l'Electricité de Grèce.

Les premières études me permirent de mettre en évidence un très vaste glissement de terrain, réactivé dans le bas par les crues dans la région de Pigi Vrendenista. Il y avait donc là un risque important de voir cette énorme masse se remettre en mouvement du fait des variations du plan d'eau et créer, éventuellement, un barrage en travers de la vallée, car l'autre rive est une très haute falaise de calcaire.

Je proposai donc de limiter la hauteur de la retenue au pied du glissement, ce qui fut adopté en fractionnant la chute initialement prévue plus haute.

On risquait cependant alors de voir l'usine de pied de barrage prévue à 1 km environ à l'amont noyée par la remise en mouvement de ce glissement, désormais beaucoup moins probable : ce risque pourra être, en fait, évité en court-circuitant la gorge critique par un tunnel d'adduction permettant d'édifier la centrale à l'aval de cette gorge dangereuse.

C'est donc, là encore, l'étude globale et régionale qui a finalement permis de trouver la meilleure solution.

V. LES ÉTUDES GÉOLOGIQUES DE TUNNELS

Il n'est pas dans mon intention de minimiser l'importance de toutes les études, de plus en plus fréquentes maintenant, tournant autour de l'analyse structurale et

de la mécanique des roches pour tenter d'améliorer les procédés de perforation et de mieux connaître la tenue probable des roches lors du percement du tunnel.

Mais il est bien évident aussi qu'avant d'en arriver là, on doit tout d'abord exécuter une coupe géologique aussi précise que possible du futur tunnel pour tenter de définir quels seront les engins les mieux adaptés et quels soutènements, variables suivant les points, devront être prévus.

Or, si l'établissement d'une telle coupe peut être assez aisée dans certains cas où la structure géologique est simple (par exemple massifs cristallins relativement homogènes comme pour la majeure partie du tunnel du mont Blanc ou celui de la chute d'Isère-Arc en France), il est bien évident que cette opération sera beaucoup plus difficile dans le cas où la structure géologique est très complexe, comme elle l'est souvent dans les Alpes en dehors des grands massifs précités.

Mais de telles structures complexes ne peuvent généralement pas être déchiffrées par une étude très détaillée du seul tracé du tunnel (pour lequel, soit dit en passant, le lever topographique est souvent beaucoup trop étroit pour une étude géologique vraiment complète et sûre).

Et c'est pourquoi il peut être important, alors, de faire appel à des géologues connaissant bien la région, même s'ils ne sont pas spécialisés dans le génie civil, car ils seront mieux à même d'élucider les problèmes difficiles qui pourront se poser ; ce qui n'empêchera pas ensuite, au contraire, d'en faire tirer les conclusions pour l'ouvrage avec la collaboration d'un géologue plus compétent en « géologie de l'ingénieur ».

A. Les tunnels de l'aménagement du Mornos (Grèce)

L'adduction ayant 150 km du barrage à Athènes comporte de nombreux tunnels dont la plupart à relativement faible profondeur (quelques centaines de mètres), ce qui rend les prévisions plus faciles : les points douteux peuvent alors faire l'objet de vérifications par forage, ce qui est assez aisé dans ce cas et fut effectivement fait pour plusieurs tunnels.

Mais aucune recherche de ce genre ne peut être faite valablement si l'étude géologique préliminaire n'a pas été capable de poser les problèmes correctement et de proposer les travaux de reconnaissance adéquats pour en donner la solution.

Pour le plus grand de ces tunnels, traversant le massif de Ghiona au départ de la retenue, on s'est trouvé devant un cas particulièrement difficile, le tunnel passant au centre à plus de 1 000 m de profondeur dans un massif complexe (P. Celet, 1962).

De plus la série, à part trois niveaux de bauxite, ne comporte que des calcaires, souvent assez semblables et d'ailleurs très karstifiés à l'affleurement, depuis le Trias jusqu'au Crétacé supérieur et sur près de 2 000 m. Or, si les coupes établies à partir de la surface montraient bien qu'on devait atteindre le bas de la série, on ne pouvait en être sûr, car le Trias en particulier, n'affleure pas au complet dans ce massif et ne peut être étudié que beaucoup plus loin, c'est-à-dire avec possibilités de variations latérales de faciès et aussi variations d'épaisseurs, très difficiles de toutes façons à estimer dans ces calcaires presque sans aucun niveau repère.

Il fallut donc recourir à des *études micropaléontologiques* comparatives en surface et dans les forages qui furent exceptionnellement longs (2 de plus de 1 000 m) pour ce genre d'études.

Ainsi seulement put-on s'assurer, le mieux possible, que ce tunnel devait, sur toute sa longueur (sauf les extrémités dans le flysch) rester dans les calcaires, peu karstiques en profondeur (ce qui était assez inattendu) et avec une nappe aquifère située bien au-dessus du tunnel : toutes données que l'on ne pouvait pas se permettre de ne pas avoir pour un tel ouvrage (14 km sans fenêtre).

B. Le projet de tunnel Bolarque-Talave (Espagne)

Ce projet, assez extraordinaire et qui ne sera finalement jamais réalisé sous cette forme, aurait été largement le record du monde puisque ce tunnel aurait eu entre 200 et 240 km de longueur, sans fenêtres (mais avec, bien entendu, des puits).

Son but était, en effet, d'amener des eaux d'irrigation provenant des barrages situés au nord-est de Madrid (Bolarque) jusqu'à la retenue du barrage de Talave, d'où elles étaient destinées à gagner la région de Murcia, très fertile mais manquant d'eau d'irrigation.

J'eus alors à superviser un groupe de huit jeunes géologues français et espagnols, aidés par deux géologues espagnols confirmés et c'est une surface de près de 4 000 km² qui fut ainsi levée avec un grand soin au 1/50 000.

Travail énorme qui apporta des quantités de données nouvelles, tant sur la stratigraphie (en particulier couches rouges du Jurassique moyen confondues jusqu'alors avec du Trias) que sur la paléogéographie très intéressante et variée de ce rebord oriental de la Meseta, et sur la tectonique, très variée sur un aussi long parcours.

Voilà donc un bel exemple d'une étude de géologie appliquée qui, étant donné l'ampleur du problème posé, n'a pas été menée autrement que s'il s'était agi d'une monographie de géologie « pure », a dû faire intervenir les méthodes les plus fines de la stratigraphie (aidée de la paléontologie et de la micropaléontologie), de la paléogéographie et de la tectonique, avec cependant une rigueur peut-être encore accrue et avec l'aide, aussi, de nombreux forages⁽¹⁾.

On peut donc citer cet exemple comme étant exactement l'inverse de ce qu'on imagine trop souvent : c'est un problème de géologie appliquée qui a fait ici avancer grandement la connaissance d'une partie appréciable du territoire espagnol et permet ainsi de mieux connaître la géologie de ce vaste secteur et d'en éditer les nouvelles cartes ou d'en rectifier les anciennes.

Et je pense utile de rappeler à ce sujet à quel point les recherches pétrolières (que je n'ai pas voulu aborder ici) ont, partout dans le monde, fait avancer nos connaissances sur la géologie de régions très variées et ont, aussi, été à l'origine de l'extraordinaire développement de la micropaléontologie.

Mais on peut aussi avoir des surprises d'autres ordres qui montrent à quel point l'attention du géologue doit toujours être en éveil... et à une échelle suffisante.

C. Le tunnel du Foumen (Iran)

Cette grande rivière se jette dans la mer Caspienne à son rivage sud et je pus y mettre en évidence, à divers endroits, la trace d'un ancien cours, très large, remblayé d'alluvions et déjà aussi profond que la vallée actuelle.

(1) Ces études ont fait l'objet d'un très gros et beau dossier, avec cartes géologiques en couleurs, qui n'a malheureusement pas été publié. Sogei-Pantecnia, 1966.

Mais, pour le tunnel du Foumen, le fait que le cours actuel est épigénique et que le tunnel devait recouper l'ancienne vallée remblayée n'était pas du tout évident car là les versants sont à peu près entièrement recouverts d'un lœss brunâtre masquant presque totalement les affleurements.

L'apparition, dans le bas des versants des talwegs parallèles au tunnel, de gros blocs roulés ne peut cependant pas être attribuée à des terrasses et l'hypothèse de l'ancienne vallée parut rapidement la seule plausible, ce qui fut démontré ultérieurement par un forage : et, de fait, au lieu de rester dans le rocher de départ affleurant près du barrage, ce fut sur 1 km environ que le tunnel traversa les alluvions de l'ancienne vallée, heureusement peu aquifères.

L'explication de ce phénomène dans une vallée qui ne fut jamais occupée par aucun glacier put alors, assez aisément, être mise en rapport avec les grandes variations du niveau de la Caspienne au gré des glaciations et déglaciations quaternaires (R. Barbier, 1959).

D. Le tunnel de l'aménagement de Capivari (Brésil)

J'ai montré plus haut (p. 93) comment la répartition, à première vue anarchique, des roches cristallines (ou cristallophylliennes) et des argiles latéritiques au Brésil, m'avait amené à donner une explication de la formation des « pains de sucre » qui permit ensuite de mieux comprendre cette répartition.

L'aménagement du Capivari au Parana, prévoyait un long tunnel d'adduction entre le barrage situé sur le plateau et la plaine côtière au pied de la Serra do Mar.

Or, les premiers projets d'aménagements trouvés à notre arrivée faisaient passer cette galerie à faible profondeur, sous un plateau où n'affleuraient que des argiles latéritiques ; nos études et la visite de plusieurs aménagements terminés ou en cours, nous montrèrent que ces argiles (et les roches très décomposées sous-jacentes) pouvaient avoir facilement 200 m d'épaisseur sous les plateaux et une cinquantaine de mètres dans les versants : il était donc certain, dans ces conditions, qu'aussi bien le tunnel que la conduite forcée seraient dans ces argiles (qui au surplus se ravinent ou glissent dès que la forêt vierge est enlevée), ce qu'il fallait éviter à tout prix.

Nos recherches partirent donc dans une tout autre direction, vers le Pic Parana, qui est un magnifique pain de sucre assez aigu : nous pûmes alors définir là une « dorsale » de roche dure qui affleurerait presque partout et où le tunnel fut effectivement réalisé dans une roche très saine.

Les terrains s'altérant ensuite vers la plaine côtière, l'usine souterraine dut être placée très en arrière pour rester dans la roche saine et la longue galerie de fuite qui en résultait traversa des terrains assez altérés par endroits, mais acceptables et du reste inévitables. Les argiles latéritiques avaient cependant pu ainsi être complètement évitées pour la totalité de l'aménagement dont la restitution, située plus à l'aval, permettait de plus une augmentation de la hauteur de chute.

Là encore ce fut donc l'étude d'un phénomène général qui donna la solution particulière.

VI. AUTRES TRAVAUX

Tout ne peut être traité dans un tel article et je ne rappellerai que pour mémoire les problèmes posés par les routes et les aménagements en montagne (R. Barbier,

1970) où les problèmes majeurs sont généralement ceux dus aux mouvements de terrain, en particulier dans les moraines argileuses et les terrains marneux ou schisteux plus ou moins altérés.

Mais là encore, il faut avoir des vues d'ensemble dépassant le cadre étroit du projet, car ces zones glissées sont parfois très vastes et fort complexes à la suite de remises en mouvement successives.

Je ne parlerai pas non plus des études de recherches de minerais qui, elles aussi, nécessitent le plus souvent, avant les travaux de détail, des vues d'ensemble et des études générales.

Il est bien évident, en effet, que plus la zone intéressée est étendue, plus l'étude géologique doit l'être aussi... et faire donc appel, dans beaucoup de cas, à des disciplines plus variées, bien que cela soit souvent nécessaire comme nous pensons l'avoir montré, dès l'échelle du site de barrage.

Le gisement de lignite d'Elbistan (Turquie)

Je ne citerai donc ici, pour terminer, que l'exemple de l'étude de ce futur gisement de lignite dont j'ai eu à connaître récemment.

C'est en effet au cours d'études générales de la région qu'apparut l'intérêt possible, sous ce rapport, de ce bassin pliopléistocène ; or, si la présence de lignite en couches intéressantes ne peut évidemment être prouvée que par de très nombreux forages, d'autres problèmes se posaient pour envisager une vaste exploitation à ciel ouvert comme celle des grands gisements de la région de Cologne en Allemagne.

En particulier, du point de vue de l'eau qu'il faudrait évacuer de cette cavité de plus de 100 m de profondeur. Ceci nécessita donc une étude générale de toute la région ceinturant le bassin (environ 2 500 km²), dont la structure géologique n'est pas simple et conditionne très étroitement les problèmes d'arrivées éventuelles d'eau par le bed-rock sous-jacent, ainsi que celles pouvant provenir des massifs de calcaires karstiques dominant au nord ce bassin et dont les eaux pourraient aussi se déverser dans l'excavation de l'exploitation.

Deux études générales furent donc entreprises, dont toutes les conclusions ne sont pas encore tirées, mais qui montrent bien comment un problème ne peut être pris seulement (si l'on peut dire) par le petit bout « appliqué » de la lorgnette, mais doit faire l'objet d'études beaucoup plus générales (voir U. Staesche, 1972, avec une carte géologique en couleurs au 1/1 000 000 de toute la région et W. Schloemer, 1972, pour les études hydrogéologiques).

VII. CONCLUSIONS

Je pense avoir montré, par ces quelques exemples, à quel point la définition de la structure géologique globale d'un site est indispensable pour résoudre correctement les problèmes posés par les grands travaux (fondations diverses, percement de tunnels et autres) qui demandent à être remis dans leur contexte général pour être complètement et clairement élucidés.

Faute de quoi on s'expose, soit à des catastrophes comme celles que nous avons connues à des dates encore récentes, soit à de graves mécomptes sur les plans techniques et économiques, comme le montrent bien, notamment, les exemples des barrages du Nakhla et de Perdikkas ou celui de l'usine de M.

Mais nous pensons avoir montré aussi à quel point la solution de ces problèmes particuliers peut faire appel, suivant les cas, à pratiquement toutes les disciplines des Sciences de la Terre ; ce qui exige que les géologues voulant pratiquer la « Géologie de l'Ingénieur » possèdent une connaissance et une pratique suffisantes de ces disciplines et restent, avant tout, des géologues aux aguets des difficultés, voire des pièges, souvent inattendus, que peut leur offrir ou leur poser une nature moins souvent simple que complexe.

Bibliographie

- BARBIER, R. (1957a). — Un problème morphologique au Brésil : « Pains de sucre » et tunique tropicale. *C. R. Ac. Sc.*, t. 245, p. 2346.
- BARBIER, R. (1957b). — Aménagements hydroélectriques dans le Sud du Brésil. *Bull. Soc. géol. France*, 6^e série, t. 7, p. 877-892, 6 fig.
- BARBIER, R. (1959). — Découverte de lèss et d'une ancienne vallée remblayée dans le cours inférieur du Sefid-Roud (versant Nord de l'Elbourz, Iran). *C. R. Ac. Sc.*, t. 250, p. 1097.
- BARBIER, R. (1970). — Le rôle de la géologie dans l'urbanisme en montagne. *Rev. Urbanisme*, n° 116, 4 p., 4 fig.
- BARBIER, R. et GIGNOUX, M. (1955). — *Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques*, 343 p., 16 fig., 28 pl. h.-t. Masson et C^{ie}, Paris.
- CELET, P. (1962). — Contribution à l'étude géologique du Parnasse-Kiona et d'une partie des régions méridionales de la Grèce continentale. *An. Géol. Pays hell.*, t. XIII, Athènes.
- CHEYLAN, G. (1965). — Etudes géologiques des aménagements hydrauliques de la Compagnie du Bas-Rhône-Languedoc. Thèse Doct. Sc., Mém., *Trav. Lab. Géol. Fac. Sc. Grenoble*, 343 p., 117 fig., 2 pl. h.-t., 19 phot. h.-t.
- GIGNOUX, M. et MORET, L. (1941). — Les conditions géologiques du barrage du Chambon-Romanche. *Trav. Lab. Géol. Univ. Grenoble*, t. 23, 56 p., 11 fig., 5 pl. phot.
- GIRAUD, A. (1974). — *Etudes géologiques sur quelques sites de barrage (essai méthodologique)*. Thèse 3^e cycle, Institut Dolomieu, Grenoble, 114 p.
- JAOUI, A. (1968). Barrage du Nakhla. Travaux de confortement. Rapport Dir. Hydraul. Maroc, Rabat et Com. Gds. Barrages, Madrid, 1973.
- KAESSARIS, N. S., FALCONNIER, A. und GOTTSTEIN, E. v. (1965). — Wasserverluste im Stauraum von Perdikkas (Griechenland). *Felsmech. und Ingenieurgeologie*, vol. III/1, 23 p., 13 fig.
- SCHNEIDER, B. (1967). — Contribution à l'étude des massifs de fondation de barrages. Thèse de Docteur-Ingénieur, mém. n° 7, *Trav. Lab. Géol. Fac. Sc. Grenoble*, 241 p., 142 fig.
- SCHLOEMMER, W. (1972). — Hydrogeologische Voruntersuchung im Bereich des zukünftigen Braunkohlen-Tagebaues bei Elbistan. *Geol. Jb.*, Bd. 4, p. 53-136, 19 fig., 12 pl., Hannover.
- STAESCHE, U. (1972). — Die Geologie des Neogen-Beckens von Elbistan (Türkei) und seiner Umrandung. *Geol. Jb.*, Bd. 4, p. 3-52, 4 fig., 1 tabl., 1 carte géol., Hannover.
- THEROND, R. (1973). — *Recherche sur l'étanchéité des lacs de barrage en pays karstique*. Thèse Docteur-Ingénieur, Institut Dolomieu, Grenoble et Eyrolles éd., Paris.

