

CHAPITRE III

Études géologiques et géotechniques

Animé par Patrice BRUNEL (CARA)

*Membres du groupe : Emmanuel ALONSO (Cemagref),
Jean-Pierre BÉCUE (SAFEGE), Jean-Luc BRODIN (CACG),
Bernard COUTURIER (BRL), Danièle LAUTRIN (Cemagref)
et Georges MICHEL (SCP).*

Concernant les études géologiques et géotechniques, seront plus spécialement abordés :

- ◆ les diverses techniques possibles ;*
- ◆ l'identification et choix du site de barrage ;*
- ◆ les études géologiques, géotechniques et les travaux de reconnaissance permettant l'adaptation du projet au site choisi, avec notamment le choix du type de barrage le mieux adapté au site ;*
- ◆ le suivi géologique des travaux de construction du barrage.*

OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES

Ce chapitre a pour but d'émettre des recommandations issues de l'expérience des auteurs et des usages habituellement constatés. Compte tenu de la spécificité des problèmes géologiques et géotechniques, on ne donnera pas ici de programme-type mais le minimum usuellement admis.

En effet, l'importance primordiale de la connaissance du contexte géologique et géotechnique dans lequel va être intégré l'ouvrage étudié, alliée à la très grande variété des fondations rencontrées, qui fait de chacun d'eux un objet unique, ne permettent pas de définir a priori l'importance et la nature des reconnaissances nécessaires.

Seul un professionnel expérimenté est à même d'adapter le déroulement des études au contexte géologique qu'elles mettent petit à petit en évidence et aux problèmes identifiés ou supposés, selon un processus itératif qui se traduit classiquement par un programme de reconnaissances constitué de plusieurs phases (l'orientation et le contenu de chacune étant définie à l'issue de la précédente).

Ces reconnaissances doivent permettre d'éviter, dans la mesure du possible, la rencontre de problèmes imprévus lors des travaux de construction du barrage, pouvant amener à des improvisations, des surcoûts et des retards toujours néfastes (et ce d'autant plus que l'ouvrage est petit et bénéficie généralement d'un financement limité avec peu de marge de manœuvre).

Nous aborderons successivement :

- ◆ les différentes techniques utilisées lors des études géologiques et géotechniques de projets de barrages ;
- ◆ les recommandations méthodologiques concernant les différentes phases des interventions géologiques et géotechniques, de l'identification du site à la réalisation des travaux.

Les notions usuelles de géotechnique et de mécanique des roches sont supposées connues, et le lecteur pourra éventuellement se reporter aux nombreux manuels spécialisés dans ces domaines.

TECHNIQUES UTILISÉES

Sera développé l'ensemble des techniques applicables aux barrages de hauteur inférieure à environ 25 mètres. Selon la nature du site et la taille de l'ouvrage, seules certaines d'entre elles devront être employées.

INVENTAIRE DE SITES

La recherche méthodique de sites de barrages est pratiquée lorsqu'il faut trouver des sites potentiels de stockage pour répondre à un besoin de ressource en eau dans un secteur donné, qui peut être réduit (un bassin hydrographique de quelques centaines d'hectares) ou très étendu (un grand bassin versant de plusieurs centaines de km²). Cette démarche fait appel aux techniques suivantes :

- ◆ inventaire cartographique sur des cartes topographiques du commerce d'échelle appropriée à la taille de la retenue envisagée (1/25 000 pour les ouvrages concernés par ce document : les très petits sites ne sont pas identifiables à cette échelle) ;
- ◆ photographie aérienne (couples stéréoscopiques) ;
- ◆ prospection directe sur le terrain.

Ces trois techniques se complètent utilement et il est toujours préférable de les associer, lorsque cela est possible, chacune apportant des éléments d'information concourant à une

meilleure appréciation des caractéristiques du site :

- ◆ *cartographie* : estimation « précise » des surfaces et des volumes (barrage, retenue, bassin versant) ;
- ◆ *photographie aérienne* : nature du couvert végétal, occupation des sols (attention à la date de prise de vue, qui doit être la plus récente possible) ;
- ◆ *prospection directe* : prise en compte de détails morphologiques et autres, premières indications sur la géologie du site, possibilité de repérage de sites de petite taille.

TOPOGRAPHIE

La topographie constitue le support essentiel du travail du géologue qui doit toujours situer plus ou moins précisément les observations qu'il réalise, tant en planimétrie qu'en altimétrie. Selon le degré d'avancement des études et l'importance des problèmes, on peut distinguer la topographie simplifiée ou la topographie régulière.

La topographie simplifiée

Il est bon de procéder au nivellement des premiers sondages réalisés sans attendre les levés détaillés ultérieurs, afin de permettre un tracé suffisamment précis des profils géologiques interprétatifs.

Le lever d'un profil topographique sommaire sur l'axe du barrage (au niveau automatique de chantier et à la chaîne) est, par ailleurs, fort utile pour estimer le volume de celui-ci dès le début des études, le coût de l'ouvrage lui étant en grande partie proportionnel.

La topographie régulière

La conception des ouvrages nécessite la réalisation de plans topographiques précis, s'appuyant sur des levés de la zone d'implantation du barrage (au 1/500 ou plus détaillé), des ouvrages annexes le cas échéant (au 1/200 ou plus détaillé) et de la cuvette de retenue, au moins jusqu'à la cote des plus hautes eaux exceptionnelles (l'échelle du cadastre : 1/2 000 ou 1/2 500 est généralement bien adaptée pour les cuvettes de quelques dizaines d'hectares ; l'échelle du 1/5 000 peut être adoptée pour des cuvettes très étendues, au prix d'une précision moindre, et celle du 1/1 000 pour les petites retenues de quelques hectares).

Ces levés sont habituellement confiés à des géomètres-experts DPLG, et le plus souvent traités par des moyens informatiques (carnets électroniques de terrain, report automatique des points, tracé des courbes de niveaux). Il est souhaitable de se faire remettre par le géomètre, en même temps que le plan-papier, un fichier sur support informatique des points du lever qui pourra être utile au projeteur équipé en CAO (Conception Assistée par Ordinateur).

Il est judicieux de profiter du lever topographique pour faire reporter sur le plan tous les points particuliers dont il est nécessaire de connaître la position précise (sondages, puits, sources, structures géologiques diverses...). À cet effet, le concepteur peut laisser des repères numérotés, et bien visibles sur le terrain, ou accompagner le géomètre lors de son lever.

Dans certains cas (terrain d'accès très difficile, végétation dense, cuvette très étendue, problèmes fonciers non résolus...), le plan topographique de la cuvette peut être réalisé par stéréophotogrammétrie aérienne (complétée et calée sur le terrain), au prix d'une moins grande précision, mais qui peut s'avérer suffisante et parfois plus réaliste.

PHOTOGÉOLOGIE

L'interprétation géologique de photographies aériennes (en couples stéréoscopiques) peut utilement compléter la cartographie classique (notamment pour les aspects structuraux en contexte rocheux fortement altéré mais sans couverture importante), et même la remplacer dans certains cas (absence de fond topographique utilisable), tout en s'accompagnant obligatoirement d'un calage sur le terrain.

Son utilité réside notamment dans la possibilité qu'elle offre de mettre en évidence des structures non directement observables sur le terrain, grâce à l'intégration de multiples détails que permet le recul de la prise de vue aérienne, et parfois des traits géomorphologiques de grande ampleur difficilement visibles au sol ou masqués (végétation...).

L'examen des photographies aériennes (récentes de préférence) fournit aussi des indications sur le couvert végétal et l'occupation des sols dans le bassin versant. Elles se révèlent utiles pour les études hydrologiques et l'analyse des transports solides du cours d'eau.

CARTOGRAPHIE GÉOLOGIQUE

Si les conditions d'affleurement le permettent, une carte géologique peut être levée à une échelle adaptée à la précision recherchée, au stade d'étude concerné et à la taille du site, et généralement sur un fond topographique existant (cartes IGN éventuellement agrandies), ou sur des plans topographiques réguliers et plus détaillés s'ils sont disponibles.

Le géologue doit s'attacher à y faire apparaître la nature des terrains constituant le substratum au droit des affleurements (à figurer selon leur taille réelle), et des terrains de recouvrement ailleurs, en y distinguant autant de catégories que nécessaire. Doivent figurer sur sa carte tous les indices utiles : structuraux (pendages, plis, schistosité, failles et cassures, filons...), hydrogéologiques (sources, pertes...), et géomorphologiques (notamment les glissements de terrain anciens ou actuels, les indices karstiques...).

TRANCHÉES À LA PELLE HYDRAULIQUE

Cette technique concerne les reconnaissances du site où sera implanté l'ouvrage, les zones d'emprunt dans le cas d'un barrage en terre et éventuellement le diagnostic d'étanchéité de la cuvette.

Elle concerne essentiellement les barrages en terre, mais peut aussi être utilisée dans la reconnaissance du site d'un barrage en béton, lorsque le substratum rocheux n'est pas très profond, afin d'évaluer l'importance des terrassements préalables. Néanmoins, dans le

cas d'un barrage en béton, les essais sont à peu près inutiles puisque la partie meuble sera enlevée.

Les tranchées réalisées à l'aide d'une pelle hydraulique (de préférence sur chenilles pour permettre son accès en tous points) constituent probablement le moyen d'investigation le plus utilisé pour les études de faisabilité géologique de sites de barrages, en raison de leur faible coût (3 000 à 4 000 francs par jour aux conditions économiques de 1996) et de la quantité importante d'informations qu'elles permettent d'amasser dans un laps de temps réduit (15 à 20 tranchées de 4 mètres de profondeur par jour en terrains courants).

On procède en général par tranchées « ponctuelles » dans l'emprise du barrage et dans la cuvette de retenue (zones d'emprunt potentielles). Dans certains cas, il peut être préférable de réaliser des tranchées continues d'orientation judicieusement choisie.

La profondeur d'investigation est limitée par la puissance de la pelle hydraulique, la longueur de son bras et la nature des terrains traversés. Des profondeurs de 4 à 5 mètres sont couramment atteintes avec une pelle d'au moins 100 chevaux de puissance et un godet de 80 à 100 cm de large muni de dents efficaces (godet type « terrassement »).

Le géologue peut lever des coupes assez précises en suivant l'exécution des tranchées, et en mesurant au décimètre la profondeur de chaque changement de terrain tout en prélevant éventuellement des échantillons remaniés ou intacts des différents horizons traversés (ce qui permet ensuite des comparaisons entre tranchées et peut faciliter les corrélations pour le tracé des profils géologiques interprétatifs). Le niveau d'apparition d'eau doit être noté. Enfin, il importe de s'assurer qu'aucune personne ne descend dans la tranchée, qui risque à tout moment de s'écrouler. Les prélèvements ne doivent sous aucun prétexte être réalisés depuis le fond de la tranchée, sauf en la blindant.

Il est généralement bon de laisser les tranchées ouvertes quelques heures, ou quelques jours (si les conditions de sécurité le permettent - balisage à mettre en place si nécessaire), afin de permettre de meilleures corrélations et d'observer des phénomènes parfois lents à se manifester (venues d'eau) ou à se stabiliser (niveau de la nappe).

Moyennant certaines précautions et approximations, ces tranchées peuvent donner lieu à des essais de perméabilité lorsqu'il est jugé opportun d'estimer sommairement le coefficient de perméabilité des terrains de la fondation. Plus ou moins rudimentaires, ces essais (de type LEFRANC, NASBERG...), donnent des résultats à manier avec prudence étant donné le grand nombre de paramètres difficilement maîtrisables susceptibles de les influencer.

La pratique courante est de réaliser des tranchées alignées dans l'axe du futur barrage. Dans les versants, il convient de veiller à ce que les tranchées fournissent une coupe sans lacune du substratum. Dans ce but, on procède en partant du haut du versant, en décalant chaque tranchée de la précédente d'une distance telle que la dénivellation du terrain naturel entre ces deux points soit inférieure ou au plus égale à la profondeur sur laquelle le substratum a été traversé dans la tranchée précédente (ceci ne vaut en toute rigueur que si l'épaisseur du recouvrement varie peu entre ces deux points).

GÉOPHYSIQUE

Dans certains cas (fondations rocheuses, ouvrages de type rigide envisagés), les techniques de la *sismique réfraction* et de la *petite sismique* (relativement légères) permettent d'obtenir une zonation des vitesses de transmission des ondes sismiques. On peut généralement les relier au degré de fracturation et d'altération du rocher, ce qui permet parfois de localiser des accidents (failles...) grâce aux anomalies de vitesse qu'ils engendrent.

Lorsque la morphologie ne présente aucun verrou topographique net, la mise en œuvre de cette technique au stade faisabilité ou APS, peut permettre de mieux choisir l'implantation du barrage en localisant une ou plusieurs zones dans lesquelles le substratum sain est moins profond.

La position du rocher « sain » en profondeur est souvent voisine des horizons à vitesse élevée (> 4 000 à 5 000 m/s) et détermine généralement le niveau d'assise des barrages en béton.

Dans les zones de rocher altéré ou d'alluvions, la prospection électrique peut aussi être utilisée, seule ou en combinaison avec la sismique. Dans cette technique, les variations de la résistivité électrique des terrains sont utilisées pour en déduire celles de la lithologie, de l'altération et de la fracturation. Les mesures peuvent être faites sous forme de sondages, de trainés électriques, ou de panneaux de résistivité.

L'interprétation des mesures géophysiques, qui doit être faite par un géophysicien expérimenté, nécessite un étalonnage sur des sondages mécaniques (carottés le plus généralement).

42

La manière optimale de procéder à cet étalonnage consiste à demander au géophysicien d'établir un rapport provisoire, à partir duquel les sondages d'étalonnage peuvent être implantés au mieux. Il rédige ensuite son rapport définitif après avoir pris connaissance des résultats de ces sondages, et si nécessaire, affiné son interprétation.

Sur des sites très délicats, où il existe un risque potentiel ou avéré de rencontre de cavités souterraines (karst, anciennes mines ou carrières, présence de roches solubles [gypse]...), la technique de la microgravimétrie peut être mise en œuvre afin de rechercher par exploration systématique, la présence éventuelle d'anomalies négatives du champ de la pesanteur. D'autres reconnaissances (sondages carottés...) sont ensuite nécessaires pour vérifier la nature des anomalies détectées, mais elles sont alors implantées en connaissance de cause et il est ainsi possible de réaliser des économies par rapport à une reconnaissance systématique à l'aveugle (compensant le coût de la prospection elle-même).

FORAGES CAROTTÉS

Des forages carottés sont systématiquement effectués pour des barrages de hauteur supérieure à 20 mètres. Ils sont rarement utilisés pour des barrages de hauteur inférieure à 10 mètres.

Ces carottages sont destinés à permettre d'acquérir une connaissance suffisante de la constitution lithologique et de la structure des différents horizons de la fondation, pour

pouvoir dessiner les coupes géologiques interprétatives nécessaires à une bonne compréhension des conditions de fondation des ouvrages.

Cette technique permet d'étendre les investigations dans tous les types de terrains, à des profondeurs plus importantes que celles permises par les tranchées à la pelle, d'y pratiquer des essais d'eau plus fiables que dans celles-ci (bien qu'ils soient plus ponctuels), et d'y prélever, sous certaines conditions, des échantillons « intacts » de terrains. Il est maintenant possible d'enregistrer les paramètres de forage, ce qui donne un renseignement en continu sur la nature des terrains traversés.

Son coût élevé (1 500 à 2 000 francs par mètre linéaire pour des sondages de bonne qualité, essais d'eau compris, aux conditions économiques de 1996) en rend l'utilisation exceptionnelle dans les phases préliminaires des études (barrages importants ou posant des problèmes justifiant le recours à cette technique). Lorsque c'est le cas, il est souhaitable d'implanter ces forages carottés en fonction des observations faites au préalable dans des tranchées à la pelle, leur but étant de répondre aux questions précises soulevées à l'occasion de ces dernières (profondeur du substratum résistant/étanche, d'un horizon repère...).

La profondeur des forages est à adapter à la taille de l'ouvrage et au contexte géologique. Il n'est pas rare qu'elle atteigne, en fond de vallée, la hauteur de l'ouvrage prévu et elle doit permettre de traverser le substratum sur au moins 5 mètres d'épaisseur. Dans les versants, elle doit permettre d'atteindre les premiers horizons du substratum rencontrés en fond de vallée (en tenant compte de la structure et des décalages dus au pendage, aux failles...), afin de corréliser dans toute la mesure du possible les résultats des forages sur toute la longueur de l'emprise du barrage.

L'obtention de carottes de bonne qualité nécessite le respect des principes suivants :

- ◆ le carottier doit être choisi en fonction de la nature des terrains à prélever. Il peut être soit poinçonneur (à paroi mince avec ou sans étui intérieur, à piston stationnaire, à paroi épaisse), soit rotatif (simple, double, triple, avec ou sans trousse dépassante). La norme AFNOR citée en bibliographie (voir p. 66) détaille les diverses utilisations possibles ;
- ◆ le diamètre de carottage ne doit pas être inférieur à 60 mm à la profondeur finale du sondage, compte tenu des éventuelles réductions de diamètre (entraînées par la mauvaise tenue des terrains imposant la pose de tubages provisoires). Le diamètre usuel des forages de reconnaissance varie de 86 à 101 mm ;
- ◆ après extraction, et après enlèvement du « cake » de forage les enrobant généralement (résidus de foration en terrains argileux), les carottes doivent être soigneusement protégées et mises en caisse.

Il est recommandé de faire réaliser, dès la fin des travaux de forage, des photographies en couleur des caisses de carottes qui constitueront, dans la plupart des cas, les seules traces de ces dernières subsistant après quelques années (il est rare de pouvoir conserver intégralement ces carottes en bon état en raison des problèmes de stockage, de désagrégation spontanée de certains matériaux, de vol...). Les carottes doivent être photographiées après lavage soigné ou grattage du « cake », mouillées pour en faire ressortir les détails, correctement étiquetées (numéro du sondage, profondeur), accompagnées d'une palette de couleurs standard et d'une échelle de longueur, de préférence à la lumière artificielle d'un flash.

Le géologue doit procéder, au fur et à mesure de la progression du sondage, à un lever détaillé des carottes extraites, qui comporte :

- ◆ une description lithologique des terrains traversés en fonction de la profondeur comportant tous les renseignements pertinents (nature, aspect, couleur, porosité, oxydation, pendage des contacts...) de nature à permettre des corrélations entre forages voisins. Elle s'accompagne d'un dessin de la colonne de terrains (appelé « log »), selon une représentation symbolique de leur nature, si possible standardisée ;
- ◆ le cas échéant, la profondeur de la limite inférieure de la zone d'oxydation. Elle correspond à la présence d'oxydes métalliques à la surface des fissures et diaclases, qu'ils proviennent de dépôts ou d'une altération sur place (cette limite coïncide généralement avec celle des circulations d'eaux superficielles, et donc avec la limite inférieure de la zone décomprimée à partir de laquelle les fissures peuvent être considérées comme « fermées ») ;
- ◆ des indications structurales, selon la nature des terrains : stabilité de la paroi, fissuration intense ou broyage, pourcentage de récupération, ou taux de carottage intégral (somme des longueurs de carottes/longueur de forage correspondante), indice de fracturation (médiane des longueurs de carottes dans une passe de carottage), indice RQD¹ si la nature du terrain s'y prête (le RQD est peu significatif en rocher très anisotrope, schistosé notamment) ;
- ◆ les observations hydrogéologiques telles que niveau d'eau en cours et en fin de foration, pertes de fuite de foration, venues d'eau, artésianisme, essais d'eau ;
- ◆ tous renseignements relatifs au déroulement de la foration : dates de début et de fin, nature et dimension des outils de forage utilisés et du tubage provisoire, équipement définitif éventuel (piézomètre...), position des limites entre passes de carottage, incidents divers (éboulements, chutes d'outil), niveaux d'eau en début et en fin de chaque journée ou poste de travail.

Le nombre, l'espacement et la profondeur des forages ne peuvent pas être fixés dans l'absolu, mais doivent être définis lors des reconnaissances antérieures, en tenant compte des particularités de chaque site, du degré d'hétérogénéité des terrains constituant la fondation et de l'échelle spatiale des variations latérales de faciès, ainsi que des problèmes éventuellement mis en évidence.

Leur implantation doit autant que possible s'harmoniser avec les autres moyens d'investigation mis en œuvre (soit en comblant les lacunes d'observation, soit en permettant leur étalonnage réciproque, soit encore en permettant d'apporter une réponse à des questions soulevées par ceux-ci). Les sondages traversant uniquement des terrains rocheux peuvent être en général orientés dans toutes les directions sans difficulté majeure. Ceux qui traversent des sols meubles doivent être écartés de 30° au plus de la verticale.

Il est d'usage fréquent de réaliser au moins trois forages répartis selon l'axe du barrage (un en fond de vallée et un en haut de chaque appui latéral), mais leur nombre est plus élevé dès lors que la longueur en crête du barrage envisagé est supérieure à 100 mètres. Il convient de conserver un espacement horizontal de 50 mètres et un espacement vertical de 10 mètres entre forages consécutifs, valeurs qui peuvent se révéler encore trop fortes dans certains cas.

1. *Rock Quality Designation* = Total des longueurs de carottes supérieures à 10 cm / longueur de forage correspondante.

En cas d'empatement amont-aval supérieur à 100 mètres environ, deux lignes de forages supplémentaires (selon les pieds amont et aval du barrage) peuvent s'avérer nécessaires, surtout pour des fondations très hétérogènes ou médiocres.

Les forages carottés doivent être accompagnés d'essais d'eau (type LUGEON, en pression, en terrains rocheux ; type LEFRANC, gravitaire, en terrains meubles), notamment sur l'axe des organes d'étanchéité. L'obtention de résultats significatifs en matière d'essais d'eau nécessite un matériel adapté, le respect de conditions opératoires standardisées et une conduite raisonnée des essais :

- ◆ foration réalisée exclusivement à l'eau claire (pas de perforation sous boue bentonitique ou de type biodégradable) et nettoyage avant chaque essai de la paroi du sondage (par allées et venues de l'outil avec injection d'eau jusqu'à obtention d'une eau claire en tête de forage), afin de débarrasser celle-ci de tous dépôts de fines (« cake ») pouvant obturer les interstices et fissures, siège de la perméabilité, et donc fausser les mesures ;
- ◆ pression maximale lors des essais de type LUGEON adaptée à la profondeur de leur réalisation. On limite généralement la pression¹ à une valeur de l'ordre de 0,3 à 0,5 MPa pour la gamme d'ouvrages concernés ici. Il convient de ne pas oublier que cet essai n'est en toute rigueur valable que si la courbe débit/pression correspondante est voisine d'une droite, ce qui est à vérifier pour chaque essai, en réalisant plusieurs paliers de pression (maintenus 10 minutes), selon un cycle ascendant puis descendant (par exemple : 0,05 - 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,2 - 0,1 - 0,05 MPa) ;
- ◆ en cas de « perte totale d'eau », prolonger l'essai pour distinguer le remplissage de poches de la circulation permanente ;
- ◆ positionner l'obturateur dans un terrain suffisamment résistant pour supporter sans fluage la pression de gonflage, et homogène afin d'éviter la perforation de la membrane ;
- ◆ contrôler la hauteur d'eau dans l'espace annulaire entre tige d'injection et tube provisoire en début et en fin d'essai afin de déceler et de quantifier un éventuel contournement d'obturateur ;
- ◆ effectuer de préférence les essais LUGEON à l'avancement, sous obturateur unique (risques de contournement d'obturateur divisés par deux) ;
- ◆ préférer la mesure de la pression dans la chambre de mesure plutôt qu'en tête de forage (calcul des pertes de charge toujours imprécis), et l'enregistrement en continu du débit et de la pression afin de contrôler la constance de ceux-ci lors de l'essai ;
- ◆ pour les essais LEFRANC, le plus délicat est de connaître ou de contrôler la forme de la chambre d'injection, et surtout d'isoler correctement celle-ci du reste du forage. Un moyen parfois employé consiste à mettre en place un obturateur pour l'essai LUGEON, et à injecter l'eau gravitairement par le tube central (niveau constant ou variable). Afin d'avoir une réponse significative, ces essais doivent être nombreux et tester tous les changements de faciès.

Il est possible de procéder à des prélèvements d'échantillons intacts de sol en forage carotté. Pour les sols fins, les carottiers recommandés sont : poinçonneur à piston stationnaire ou à paroi mince avec étui, rotatif triple à trousse dépressante.

1. Nous parlons ici de pression effective, c'est-à-dire celle régnant au centre de la passe d'essai. Si l'on ne dispose pas d'un dispositif permettant la mesure directe de la pression dans la chambre d'essai, il faut tenir compte des pertes de charge et de la surpression correspondant à la colonne d'eau dans le dispositif (Δz = dénivellation entre manomètre et surface piézométrique naturelle) : $P_{eff} = P_{mano} - P_c + \Delta z/100$ (en MPa).

Les échantillons intacts de sol doivent être immédiatement orientés et correctement numérotés, scellés à leurs deux extrémités à l'aide de paraffine (afin d'éviter toute perte d'eau), manipulés, stockés et transportés avec précautions, sous peine de mettre en cause la représentativité des essais qui seront pratiqués.

Les longueurs de carottes correspondant aux échantillons prélevés ne peuvent être examinées qu'après ouverture de la gaine en laboratoire. La coupe du sondage doit donc mentionner cette prise d'échantillon et la description des terrains devra être ultérieurement complétée. Une cale en bois devra toujours remplacer la portion prélevée dans la caisse de carottes, avec indication des références de l'échantillon.

ESSAIS GÉOTECHNIQUES EN LABORATOIRE

La connaissance des caractéristiques physiques et du comportement mécanique et hydraulique des matériaux constituant la fondation de l'ouvrage étudié, et de ceux dont on envisage l'utilisation pour sa construction, est nécessaire au projeteur pour concevoir le barrage le mieux adapté à son contexte géotechnique.

Cette connaissance est acquise pour partie grâce à la réalisation d'essais géotechniques en laboratoire.

La réalisation de ces essais requiert la mise en œuvre de procédures normalisées et de matériels spécifiques. Elle ne peut être confiée qu'à des Laboratoires de Mécanique des Sols et des Roches expérimentés et parfaitement équipés.

46

Matériaux et fondations meubles

Pour ce type de matériaux, globalement qualifié de sol, les essais sont réalisés sur des échantillons prélevés sur le terrain (intacts ou remaniés dans les sondages carottés et dans les tranchées à la pelle). Ces essais se répartissent en :

- ◆ *essais d'identification* : teneur en eau naturelle, granulométrie et sédimentométrie, limites d'Atterberg, essai au bleu de méthylène, poids spécifique des grains, poids volumique apparent...
- ◆ *essais de compactage des matériaux des zones d'emprunt* : essai Proctor Normal ;
- ◆ *essais mécaniques et hydrauliques* : mesure de la résistance à la compression simple, résistance au cisaillement (à l'appareil triaxial), compressibilité à l'œdomètre, mesure de la perméabilité à l'œdomètre ou au perméamètre.

Le nombre d'essais de chaque type est à adapter au volume probable du remblai, à sa hauteur, au nombre de matériaux de différents types utilisés (cas des barrages zonés) et à la variabilité naturelle des matériaux étudiés.

À titre indicatif, le programme minimal d'essais recommandés pour les matériaux d'emprunt de barrages en terre ne présentant pas de difficulté particulière est déterminé en fonction du volume de matériau à reconnaître¹ :

- ◆ série d'essais d'identification (teneur en eau naturelle, granulométrie, sédimentométrie,

1. Le volume à reconnaître doit être 1,5 à 2 fois supérieur au volume géométrique du barrage.

limites d'Atterberg) : un pour 5 000 à 10 000 m³ de matériaux à mettre en œuvre avec un minimum de cinq essais ;

- ◆ essais de compactage (Proctor Normal et mesure du poids spécifique des grains) : un pour 15 000 à 25 000 m³ avec un minimum de cinq essais ;
- ◆ essais de comportement mécanique et hydraulique (cisaillement triaxial, compressibilité à l'œdomètre, mesure de la perméabilité) : un pour 30 000 à 50 000 m³ avec un minimum de trois essais (mais aucun essai de ce type n'est préconisé lorsque $H^2\sqrt{V} < 5$).

Pour la fondation, le nombre d'essais à entreprendre peut être du même ordre de grandeur si l'épaisseur meuble est importante (les essais de compactage étant inutiles).

Le paragraphe *Études géotechniques* du chapitre IV (voir p. 68) insiste sur l'intérêt d'un essai simple (la teneur en eau) et expose quelles conclusions pratiques tirer des résultats de ces différents essais.

Enrochements

Pour les matériaux de type agrégats et enrochements, les essais à réaliser en laboratoire sont :

- ◆ *mesure des caractéristiques intrinsèques* : densité apparente, étude minéralogique (examen de lames minces au microscope) ;
- ◆ *mesure des caractéristiques d'état* : teneur en eau, granulométrie-blocométrie, coefficients de forme (allongement, aplatissement), porosité, degré de fissuration, indice de continuité ;
- ◆ *mesure des caractéristiques de comportement* : résistance aux chocs (essai Los Angeles, ou L.A.), à l'abrasion (essai Micro-Deval en présence d'eau, ou MDE), à la compression simple R_c (sur carottes cylindriques), à l'alternance de cycles gel-dégel (essai de gélivité).

ESSAIS ET MESURES *IN SITU*

Plusieurs types d'essais et mesures *in situ* peuvent être réalisés à différents stades d'étude des sites de barrage, en fonction de critères variés (nature des terrains de fondation, problèmes géotechniques rencontrés, taille de l'ouvrage envisagé...).

Ils permettent de mesurer des caractéristiques mécaniques en grand de la fondation, en intégrant l'effet des discontinuités du massif.

Les essais réalisés dépendent de la nature de la fondation. En terrains meubles, citons :

- ◆ *le pénétromètre statique ou dynamique* : il permet surtout de distinguer les horizons de résistance différente, sans qu'il soit possible de relier directement et de manière fiable la résistance de pointe à leurs caractéristiques mécaniques ;
- ◆ *le pressiomètre* : il permet d'obtenir une relation contrainte-déformation du sol (détermination d'un module de déformation, de la pression de fluage et de la pression limite) ;
- ◆ *le scissomètre* : il permet de mesurer la cohésion non drainée du sol, lorsque celle-ci est inférieure à 0,1 MPa. Il n'est pas possible de mesurer la cohésion de couches dont l'épaisseur est inférieure à la hauteur des pales du scissomètre ;

- ◆ *le phicomètre* : il permet une mesure approximative directe, en forage, de la résistance au cisaillement des sols hétérogènes ou grossiers.

Ces différents essais *in situ* ne sont pas couramment utilisés pour étudier un barrage (sauf dans le cas de fondation très médiocre, vases par exemple).

En terrains rocheux, les essais classiques sont les suivants, les deux premiers concernant la fondation, les deux suivants la connaissance des matériaux :

- ◆ *essai de déformabilité au dilatométrique en forage au vérin à plaque de charge ou au vérin plat* : mesure de modules de déformation du rocher selon différentes directions (ces essais sont délicats à réaliser, exigent une main d'œuvre très qualifiée et coûtent fort cher, ce qui en réserve généralement l'usage aux ouvrages les plus importants) ;
- ◆ *mesure de vitesses sismiques dans le massif de fondation* : donne une valeur globale de la qualité du massif ;
- ◆ *essai de sautage d'enrochements à l'explosif* : différents dispositifs de tir et charges sont à tester, avec détermination des caractéristiques de l'enrochement obtenu (blocométrie, formes, abondance des stériles...) ;
- ◆ planches d'essai de compactage d'enrochements en vraie grandeur.

RECOMMANDATIONS POUR LE DÉROULEMENT DES ÉTUDES

48

La décomposition en phases adoptée ci-après est bien entendu subjective. Elle correspond à la pratique courante pour les ouvrages d'une certaine importance, mais il est évidemment possible d'envisager une répartition différente des études géologiques et géotechniques, notamment pour les « petits » ouvrages (simplification et regroupement de phases), ou en fonction des particularités du site qu'elles soient ou non de nature technique (problèmes fonciers entraînant des difficultés d'accès et pouvant conduire à accélérer ou à retarder certaines reconnaissances).

De même, la dénomination de ces phases n'est pas standardisée, et les usages varient notablement selon les cas. Au-delà de la terminologie, l'important est que leur contenu corresponde aux étapes qui doivent être successivement franchies lors de l'élaboration d'un projet de barrage et de sa réalisation.

IDENTIFICATION ET CHOIX DU SITE

But poursuivi

On recherche, si possible, une implantation proche des besoins à satisfaire, permettant le stockage du volume d'eau nécessaire (en liaison avec les résultats de l'étude hydrologique : possibilités naturelles ou artificielles de remplissage), au meilleur rendement géométrique possible (rapport volume stocké/volume du barrage auquel est directement lié le coût de l'ouvrage). Dans le cas d'une retenue à vocation touristique, c'est plutôt le critère de superficie du plan d'eau qui est déterminant.

Méthodologie

La réalisation d'un inventaire systématique de sites de barrage potentiels est généralement pratiquée sur une étendue et selon des critères en relation avec la nature des besoins à satisfaire.

Un premier tri peut être effectué dès ce stade, en fonction de considérations diverses (adéquation de la taille du bassin versant, donc des apports naturels à l'objectif de stockage ; contraintes foncières telles que submersion d'habitations, de voies de communications, d'ouvrages divers... rendement géométrique du site ; proximité des besoins...)

Chaque site fait l'objet de calculs sommaires de ses principales caractéristiques géométriques :

- ◆ courbes hauteur-surface noyée, hauteur-volume (barrage et retenue) ;
- ◆ pour une ou plusieurs valeurs du volume stocké : hauteur, longueur en crête et volume du barrage (le cas échéant pour chaque type de barrage envisagé à ce stade), superficie noyée, rapport volume stocké/volume du barrage.

La réalisation de ces calculs s'appuie sur des mesures de longueurs et de surface effectuées à partir des documents topographiques disponibles et sur des calculs de volumes par intégration des courbes hauteur-surface. L'utilisation de programmes spécifiques sur micro-ordinateurs facilite ces calculs et permet d'éditer des tableaux comparatifs assortis de graphiques.

Une estimation sommaire du coût de l'ouvrage pour une ou plusieurs hypothèses de dimensionnement est généralement pratiquée en vue de comparer des sites et/ou de chercher un optimum économique. Elle est réalisée par application de ratios ou de coûts d'ordre issus de l'expérience antérieure du concepteur pour des ouvrages de même type, à partir de bases de données propres à chaque bureau d'études alimentées par le calcul des mêmes ratios pour le coût constaté d'ouvrages de même type (après actualisation des prix).

Un classement des sites retenus à l'issue de ce premier tri est ensuite possible, selon des critères dont la nature et la hiérarchie sont variables selon la nature du projet, et dont le choix est du ressort du projeteur.

Le choix dont les principes viennent d'être exposés s'applique en particulier aux différentes variantes d'un même site. Il peut en effet être nécessaire d'étudier plusieurs hypothèses de capacité et/ou d'implantation sauf lorsqu'il n'existe qu'un verrou topographique bien localisé.

ÉTUDE GÉOLOGIQUE DE SURFACE

But poursuivi

Après l'étape d'identification d'un site de barrage, un examen visuel par un géologue expérimenté en barrages est indispensable avant toute poursuite des études. Il nécessite seulement une demi-journée à une journée.

Cette visite de terrain a pour but de déterminer les grandes lignes de la géologie du site avant toute mise en œuvre de moyens de reconnaissance plus lourds. Son rôle est multiple :

- ◆ replacer le site dans son contexte géologique local et régional ;
- ◆ déceler d'éventuelles conditions géologiques rédhibitoires visibles immédiatement ;
- ◆ orienter la suite des études, et en particulier définir et implanter les travaux de reconnaissance ultérieurs ;
- ◆ éventuellement, affiner l'implantation du barrage en tenant compte de détails géomorphologiques ou autres.

Méthodologie de l'étude géologique de surface

Avant cette visite, le géologue consulte les cartes géologiques existantes (1/50 000, à défaut 1/80 000) qui lui permettent essentiellement de replacer le site dans son contexte géologique local, lithostratigraphique et structural. Dans certains cas, ce seul examen préliminaire peut conduire à une forte présomption de géologie défavorable (terrains karstiques).

La connaissance préalable du contexte géologique est indispensable, car elle permet d'orienter l'examen du site vers la recherche de certains types d'indices, en utilisant l'expérience antérieure de contextes semblables.

Selon la région concernée par le site étudié, la localisation des structures tectoniques régionales majeures peut se révéler d'une grande importance pour la suite des études, et expliquer parfois le comportement particulier de certaines fondations.

50

Les méthodes mises en œuvre pour cette reconnaissance sont variables selon l'importance de l'ouvrage étudié et selon le contexte géologique. Consistant au minimum en un parcours de la zone d'implantation du barrage et de tout ou partie de la cuvette de retenue assorti de la réalisation de toutes les observations possibles, elle peut s'étoffer d'une cartographie géologique à une échelle adaptée, du lever de coupes lithostratigraphiques avec prise d'échantillons, d'un examen de photographies aériennes et dans certains cas d'images satellitaires.

L'aboutissement de cette première reconnaissance de terrain est l'établissement d'un diagnostic préliminaire (parfois dit de préfaisabilité) sur l'opportunité d'engager des études plus détaillées. On peut à ce stade classer les sites selon les catégories suivantes :

- ◆ *sites favorables*, pour lesquels aucune condition rédhibitoire n'a été mise en évidence ;
- ◆ *sites défavorables*, pour lesquels sont apparus des problèmes difficiles à résoudre et/ou ayant une incidence économique hors de proportion avec l'intérêt de l'ouvrage ;
- ◆ *sites douteux*, qui peuvent se répartir entre ceux où aucune observation de surface n'est possible en raison des conditions d'affleurement, et ceux pour lesquels subsistent des incertitudes sur l'interprétation et/ou des lacunes d'observation. Des investigations par tranchées continues à la pelle hydraulique sont alors nécessaires pour permettre le classement du site dans l'une des deux catégories précédentes.

Il est utile de reporter les observations faites lors de cette phase d'étude et les conclusions qui en ont été tirées sur une fiche synthétique du type de celle figurant ci-contre, proposée par B. COUTURIER (1985).

AFFAIRE				
NOM DU SITE				N°
LOCALISATION	CARTES	Topo. :		Géol. :
	COORDONNÉES	X. :	Y. :	Z. :
GÉOLOGIE DU SITE	LITHOLOGIE STRUCTURE			
	QUALITÉ DE LA FONDATION			
	STABILITÉ DES APPUIS			
	ÉTANCHÉITÉ (hydrogéologie)			
GÉOLOGIE DE LA CUVETTE	LITHOLOGIE STRUCTURE			
	STABILITÉ DES VERSANTS			
	ÉTANCHÉITÉ (hydrogéologie)			
MATÉRIAUX	AGRÉGATS			
	SOLS FINS			
TRAVAUX DE RECONNAISSANCE				
CONCLUSIONS ET REMARQUES				

Outre le renseignement des diverses rubriques qu'elle comporte, le tracé d'un profil géologique à main levée selon l'axe du barrage envisagé permet au géologue de traduire sa vision du site à l'issue de ces investigations préliminaires. Cette coupe géologique doit permettre de faire la distinction entre ce qui relève de l'observation, de l'interpolation, ou de l'intuition pure et simple, et sera donc d'autant plus précise que les conditions d'affleurement sont bonnes.

Il est parfois délicat de classer un site dans la catégorie « défavorables », et on aura alors tendance à le qualifier de « douteux » pour ne pas l'abandonner sans autre forme de procès. Bien qu'il soit difficile de trancher dans l'absolu, l'expérience montre qu'il est généralement préférable, en cas de doute sévère, d'abandonner un site en réalité favorable, plutôt que d'engager des études poussées, donc coûteuses, sur un site qui pourrait se révéler défavorable à un stade d'avancement tardif du projet. Cette démarche s'impose d'autant plus lorsqu'il existe d'autres solutions alternatives.

ÉTUDE DE FAISABILITÉ GÉOLOGIQUE

L'expression « étude de faisabilité » appelle des remarques préliminaires :

- ◆ cette étape, importante dans l'élaboration d'un projet de barrage, est ainsi nommée pour signifier qu'elle constitue le point au-delà duquel ne doit subsister qu'un très faible taux d'échec (abandon du projet en raison de difficultés géologiques non décelées auparavant), et qui conditionne le lancement d'études plus poussées (donc plus coûteuses) ;
- ◆ cette appellation ne signifie cependant pas que la faisabilité géologique du projet ne puisse être remise en cause lors de phases d'études ultérieures, dans des cas particulièrement difficiles, et qui doivent rester l'exception ;
- ◆ il paraît préférable que la personne chargée de l'étude se donne les moyens de porter à ce stade un diagnostic objectif et le plus fiable possible, quitte à mettre en œuvre dans les cas douteux quelques reconnaissances plus poussées et non prévues initialement plutôt que de reporter ce diagnostic à l'APS (ce qui nécessite de mobiliser le financement pour un APS complet sans être assuré de le mener à bien jusqu'au bout) ;
- ◆ on note à ce sujet une certaine variété dans les pratiques des bureaux d'études, entre la position exposée ci-dessus et celle correspondant au report du diagnostic de faisabilité au stade de l'APS, en fonction du type et de l'importance des barrages, et peut-être des maîtres d'ouvrage concernés. Il se peut en particulier que la maîtrise d'ouvrage ne soit pas assurée par le même organisme lors des études préalables et lors de l'APS. L'essentiel demeure que le maître d'œuvre effectue une mission conforme à l'attente de son client, en lui apportant une aide à la décision tout au long de l'avancement du projet.

52

But poursuivi

Après le diagnostic préliminaire favorable du géologue sur le site considéré, il convient de procéder à un ensemble d'études et d'investigations plus poussées afin :

- ◆ de confirmer l'absence de conditions géologiques ou géotechniques rédhitoires pouvant invalider le diagnostic antérieur ;
- ◆ de préciser le contexte géologique de l'aménagement envisagé ;
- ◆ d'affiner progressivement la définition du type de barrage le mieux adapté à ce contexte et son implantation exacte ;
- ◆ de préciser, dans le cas d'un barrage en remblai, quel pourrait être le meilleur emplacement de l'évacuateur de crue ;
- ◆ d'orienter et de définir les reconnaissances qui seront nécessaires aux phases ultérieures du projet (APS).

Ces études de faisabilité géologique vont généralement de pair avec d'autres types d'études de faisabilité :

- ◆ *foncière* : d'une importance sans cesse croissante et qui parfois peut prendre le pas sur les autres aspects du projet ;
- ◆ *environnementale* : les aspects écologiques des projets de barrage font l'objet d'études d'impact qui doivent prendre en compte les conséquences des travaux envisagés sur le milieu, tant au niveau du site et de ses environs que sur le cours d'eau en aval ;
- ◆ *économique* : il convient d'étudier la viabilité du projet selon sa destination, qui peut être multiple (irrigation, soutien d'étiage et lutte contre la pollution, écrêtement des crues et protection contre les inondations, tourisme et loisirs) ;

◆ *aménagement local* : un projet de barrage est parfois l'occasion de lancer une réflexion sur le devenir de zones rurales en difficulté (revitalisation de l'économie locale par son attrait touristique éventuel...).

Bien qu'il puisse paraître logique de subordonner le lancement de ces diverses études à une conclusion favorable sur la faisabilité géologique, leur importance croissante et leurs délais de réalisation imposent le plus souvent un lancement simultané, et parfois même de suspendre les études géologiques à la conclusion favorable des autres études de faisabilité.

Ce dernier point renforce le poids de l'étude géologique de surface évoquée ci-dessus (voir *Étude géologique de surface*, p. 49) et motive les recommandations faites au sujet des conséquences potentielles d'un diagnostic trop optimiste en cas de doute.

Cette phase d'étude (faisabilité) est celle où doivent être reconnues les caractéristiques essentielles du site et décelés, dans toute la mesure du possible, les problèmes importants pouvant amener à un diagnostic défavorable.

S'il existe généralement une solution technique aux problèmes rencontrés, son coût peut être parfois disproportionné avec l'intérêt économique de l'ouvrage et en condamner la réalisation.

Méthodologie de l'étude de faisabilité géologique

Les études de faisabilité géologique nécessitent la mise en œuvre de techniques diverses, variables selon l'importance de l'ouvrage envisagé, la nature du contexte géologique, et/ou les habitudes du géologue.

La méthodologie recommandée ici pour la réalisation des études de faisabilité géologique de barrages du type de ceux visés par le présent ouvrage ne peut donc prétendre à l'universalité, et devra souvent être adaptée aux spécificités du cas étudié.

Une étude de faisabilité-type pourra se dérouler, tout ou partie, selon les étapes suivantes

ÉTAPE 1 : recherche bibliographique

Pour tous les barrages, même les plus petits, il est très intéressant de consulter les cartes géologiques existantes et leur notice. Pour les barrages d'une vingtaine de mètres ou plus, il peut être intéressant de rechercher dans la littérature géologique régionale (articles de revues spécialisées, thèses, monographies, notices de cartes géologiques) d'éventuelles études antérieures sur la région du site considéré, ou de simples mentions de détails pouvant s'avérer utiles pour la compréhension du contexte et de l'histoire géologique du secteur (localisation et description d'affleurements, de gisements fossilifères, de gîtes de divers matériaux utiles, de structures particulières, de cavités, de sources ou pertes de ruisseaux...).

...

...

ÉTAPE 2 : visite approfondie du site - cartographie

Le géologue se livre à une visite de terrain détaillée du site du barrage et de la cuvette de retenue et cartographie tous les détails. Si l'altitude de la retenue conduit à prévoir qu'une digue de col risque d'être nécessaire, son site devra faire l'objet d'études géologiques attentives. En effet, bien que leur hauteur soit généralement très faible, leur rupture peut libérer un volume d'eau très important. D'autre part, les cols correspondent souvent à des zones où le substratum est de qualité médiocre. Si le contexte s'y prête, une carte géologique peut être levée à cette occasion (échelle : 1/25 000 à 1/5 000 selon l'étendue concernée).

Inversement, la géologie locale peut dans certains cas rendre inopérante l'observation superficielle, par absence d'affleurements (exemple des molasses du Bassin Aquitain), et cette étape, certes toujours nécessaire, sera beaucoup plus réduite.

Parmi les observations à réaliser, une attention particulière doit être apportée à la détection de phénomènes d'instabilité, tant au niveau du site de barrage proprement dit, que dans et autour de la cuvette de retenue (glissements de terrains, coulées de solifluxion, chutes de blocs, talus, parois rocheuses ou versants entiers instables).

Cette recherche doit être systématique, surtout dans les régions où les phénomènes d'instabilité sont fréquents.

L'activité et l'ampleur des phénomènes éventuellement observés doit être appréciée, ainsi que les risques de remobilisation ou d'aggravation sous l'effet des travaux (fouilles, emprunts) et de l'exploitation de l'ouvrage (vidanges), de façon à définir les dispositifs de confortement ou de drainage des versants éventuellement nécessaires.

La présence d'instabilités de grande ampleur constitue généralement une circonstance très défavorable pour les barrages, et la poursuite d'un projet dans un tel contexte doit être accompagnée des plus grandes précautions concernant la sécurité des ouvrages, et mûrement réfléchie afin de prendre en compte les contraintes que ces problèmes ne manqueront pas de poser au maître d'ouvrage ou à son exploitant au cours de la vie du barrage.

ÉTAPE 3 : études hydrogéologique et structurale

Ces études sommaires sont réalisées au cours de la visite approfondie du site et peuvent conduire, selon les cas, soit à une cartographie particulière, soit à de simples renseignements sur la carte géologique d'ensemble.

♦ *étude hydrogéologique sommaire*

Il s'agit à ce stade de définir les grands traits de l'hydrogéologie de la fondation du barrage envisagé, de la cuvette de retenue correspondante, et de leur contexte local.

On procède généralement à un inventaire des puits (avec recueil de données telles que : niveau d'eau et ses variations, horizons traversés, débit d'exploitation...), sources, résurgences ou pertes diverses.

Selon la densité des points inventoriés, on peut esquisser l'allure de la piézométrie naturelle de la zone d'implantation de l'ouvrage et en tirer des indications préliminaires sur son comportement probable sous l'effet de la création d'un plan d'eau (présence dans les versants d'une nappe à un niveau supérieur à celui de la future

...

...

retenue, ce qui lui fera jouer le rôle de barrage hydraulique et empêchera les fuites latérales même si les terrains y sont perméables ; présence d'un réseau karstique à une cote inférieure à celle du futur plan d'eau avec risque de contournement si un exutoire existe plus bas que celle-ci à l'aval du site ou dans une vallée adjacente...). Les résultats de l'étude hydrogéologique peuvent dépendre assez fortement de la saison de sa réalisation et de la pluviométrie des mois ou des années antérieures. Les conséquences sur le projet doivent donc en être tirées avec précaution, en s'assurant notamment que les cas les plus défavorables ont bien été identifiés et envisagés.

◆ *étude structurale sommaire*

Lorsque le terrain s'y prête (fondations rocheuses), un relevé sommaire des principaux traits structuraux du site (pendages, directions et densité de fracturation, accidents faillés importants, structures plissées...) permet d'étayer le diagnostic pour ce qui concerne la valeur mécanique et les conditions d'étanchéité de la fondation. Il oriente parfois le choix du type d'ouvrage le mieux adapté et contribue en général à la définition et à l'implantation des travaux de reconnaissance ultérieurs.

Par ailleurs, la recherche bibliographique de données sur le contexte structural régional peut orienter l'étude locale, ou aider à l'interprétation des observations de terrain. Elle permet, par exemple, de distinguer des familles de directions régionalement significatives, de les rattacher par là-même à telle ou telle phase tectonique, de prévoir leur état probable (cassures ouvertes ou fermées), ou d'expliquer ultérieurement leur comportement vis à vis des essais *in situ*, en fonction de leur orientation par rapport au champ de contraintes tectoniques régional actuel.

*ÉTAPE 4 : Tranchées de reconnaissance à la pelle hydraulique
(site et zones d'emprunt de barrages en remblai)*

C'est le complément indispensable de la visite approfondie évoquée ci-dessus. Son importance est d'autant plus grande que les conditions d'affleurement sont mauvaises.

En terrains rocheux, la profondeur d'investigation est en général limitée à la tranche d'altération superficielle, mais on obtient au moins des indications sur la profondeur des premiers horizons résistants, et notamment celle du substratum sous les alluvions très généralement présentes en fond de vallée.

Il convient en particulier de vérifier s'il n'existe pas de lit fossile du cours d'eau, décalé du lit actuel par les divagations de celui-ci ou par l'intervention humaine.

Selon les principes énoncés précédemment (voir *Tranchées à la pelle hydraulique p. 40*), il est recommandé de réaliser au moins :

- ◆ une ligne de tranchées selon l'axe envisagé pour le barrage, à raison d'une tranchée tous les 15 à 20 mètres de distance horizontale en moyenne,
- ◆ des tranchées réparties dans la (ou les) zone(s) envisagée(s) pour l'extraction des matériaux de construction du barrage, à raison d'une par hectare en moyenne, selon une maille hectométrique la plus régulière possible. Leur but est d'obtenir des indications préliminaires sur l'épaisseur et la nature des matériaux meubles disponibles dans la cuvette de retenue, et/ou celles de la découverte nécessaire pour l'exploitation de matériaux rocheux le cas échéant, ce qui contribuera à orienter le choix du (ou des) type(s) de barrages possible(s) pour le site considéré.

...

...

ÉTAPE 5 : forages carottés le cas échéant

Leur réalisation à ce stade des études est généralement réservée aux ouvrages d'une certaine importance ou présentant des problèmes géologiques particulièrement délicats, pour lesquels seule cette technique est jugée susceptible de permettre au géologue de porter un diagnostic objectif (risque de perméabilité importante en fondation conditionnant la faisabilité, substratum inaccessible par sondages à la pelle...).

ÉTAPE 6 : topographie sommaire

Le nivellement des tranchées et surtout des forages est indispensable afin de permettre de bonnes corrélations entre leurs coupes respectives. Un cheminement au niveau automatique de chantier et à la chaîne donne une précision suffisante.

Il est judicieux de laisser des repères (piquets, bornes) qui pourront être intégrés dans les levés topographiques réguliers des phases d'étude ultérieures (ces forages pourront alors être recalés plus précisément).

ÉTAPE 7 : interprétation et rédaction du rapport final

L'interprétation des observations faites lors des visites de terrain et dans les diverses tranchées, ou forages réalisés, nécessite la construction de profils géologiques dont le nombre et l'emplacement sont à adapter à chaque cas d'espèce (généralement, un profil selon chaque axe envisagé pour le barrage, assorti de coupes perpendiculaires ou obliques à cet axe pour traduire la constitution géologique de la fondation ; des coupes dans les zones d'emprunt de matériaux du site prospectées peuvent aussi être dessinées).

Le diagnostic final est ensuite porté sous forme d'un rapport passant en revue les différents problèmes pouvant se présenter sur un site de barrage, en suivant par exemple le plan-type suivant :

- 1 *Introduction*
 - 1.1 But de l'étude
 - 1.2 Situation géographique
 - 1.3 Rappel des études antérieures
- 2 *Géologie du site de barrage*
 - 2.1 Morphologie
 - 2.2 Lithologie
 - 2.3 Structure
 - 2.4 Qualité de la fondation - stabilité des appuis
 - 2.5 Étanchéité de la fondation
- 3 *Géologie de la cuvette de retenue*
 - 3.1 Morphologie
 - 3.2 Lithologie
 - 3.3 Structure
 - 3.4 Stabilité des versants
 - 3.5 Étanchéité de la cuvette
- 4 *Matériaux disponibles à proximité du site*
- 5 *Conclusions*
 - 5.1 Programme de reconnaissances
 - 5.2 Diagnostic sur la faisabilité

Un élément important de la conclusion de l'étude de faisabilité est le choix du type (éventuellement des types) de barrage le (ou les) mieux adapté (s) au contexte géologique mis en évidence par l'étude, avec une attention particulière apportée à la valeur de la fondation, et en tenant aussi compte des disponibilités en matériaux utilisables sur le site.

La définition précise des campagnes de travaux de reconnaissance à entreprendre lors des phases ultérieures d'étude est aussi d'une grande importance. Elle permet une continuité dans la progression des investigations, en prévoyant les moyens nécessaires pour répondre aux questions soulevées ou combler les lacunes d'observation subsistant à l'issue de l'étude de faisabilité.

ÉTUDES GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE D'APS

But poursuivi

Les études spécialisées préalables à l'établissement de l'APS (Avant-Projet Sommaire) de l'ouvrage sont réalisées en cas de conclusion favorable de l'étude de faisabilité, et devraient permettre au Maître d'Ouvrage de décider l'engagement du processus de construction du barrage.

Le but de l'APS est de définir les grandes lignes de l'ouvrage, répondant aux besoins exprimés par le client et adapté à son contexte, en passant si nécessaire en revue les différentes variantes envisageables et en chiffrant de manière approchée, mais réaliste, le coût de chacune.

L'importance de cette première estimation de l'investissement est grande, car c'est elle qui bien souvent va servir de base à la recherche des financements, et à apprécier l'opportunité économique de la réalisation des travaux.

C'est pourquoi il convient de garantir le maître d'ouvrage de mauvaises surprises ultérieures en essayant d'approcher ce coût par excès - sans pour autant cumuler les sécurités - en n'occultant notamment aucun des problèmes techniques mis en évidence ou simplement suspectés.

Cette phase d'étude correspond en France, pour les barrages de hauteur égale ou supérieure à 20 mètres, au *Dossier Préliminaire* à soumettre au C.T.P.B. (Comité Technique Permanent des Barrages). Inversement, pour les plus petits des ouvrages concernés par le présent document, il est fréquent que cette phase d'étude soit regroupée avec celle d'APD¹ (Avant-Projet Définitif) sous forme d'études spécialisées d'avant-projet.

1. ADP : l'expression « avant projet définitif » est celle des décrets d'application du 29 novembre 1993 de la loi MOP (Maîtrise d'Ouvrage Publique) ; elle remplace l'appellation « avant projet détaillé ».

Méthodologie des études géologiques et géotechniques d'APS

Les études spécialisées de géologie et géotechnique préalables à l'établissement de l'APS d'un barrage comprennent usuellement les étapes suivantes :

Reconnaisances détaillées de terrain

Le géologue suit le déroulement des travaux de reconnaissance dont la consistance a été définie lors des études de faisabilité, en modifiant éventuellement ce programme pour l'adapter aux informations recueillies (implantation, profondeur, nombre des sondages, nature des essais *in situ*, prise d'échantillons...).

À cette occasion, il peut pratiquer des observations complémentaires sur le terrain, parfois après amélioration des conditions de visibilité (débroussaillage, dans le cas des ouvrages relativement importants), réaliser une cartographie géologique de détail si nécessaire, pratiquer des relevés de fracturation ou fissuration sur affleurements ou en fond de tranchées (dans le cas de fondations rocheuses).

Les reconnaissances pratiquées sont généralement les suivantes :

- ◆ *lever topographique détaillé* : c'est généralement lors de cette phase d'étude que sont réalisés les levés topographiques du site de barrage et de la cuvette de retenue décrits en page 39 (voir *Topographie*). Il y a lieu de faire reporter tous les sondages et tranchées réalisés dans la fondation de l'ouvrage étudié et dans la cuvette sur les plans détaillés.
- ◆ *tranchées à la pelle sur le site* : cette technique est souvent utilisée au stade des reconnaissances d'avant-projet pour compléter les investigations, éclaircir d'éventuelles zones d'ombre, étudier une ou plusieurs variantes d'implantation du barrage et s'il y a lieu de l'évacuateur de crues.

La réalisation de tranchées continues, selon des directions significatives par rapport à l'ouvrage ou aux structures géologiques (généralement selon l'axe du barrage et selon l'intersection du barrage avec la topographie préexistante), est recommandée à ce stade des études pour les ouvrages importants ou dont la géologie est particulièrement complexe.

- ◆ *géophysique* : les fondations rocheuses font à ce stade l'objet de reconnaissances par sismique réfraction ou par petite sismique. Un dispositif classique consiste à réaliser :
 - un profil sismique selon l'axe du barrage (débordant assez largement l'emprise de celui-ci dans chaque versant) ;
 - un ou plusieurs profils perpendiculaires à cet axe (par exemple un en fond de vallée et un sur chaque versant) ;
 - un ou plusieurs profils sur les axes envisagés pour les ouvrages annexes.
- ◆ *forages carottés* : ils sont très généralement pratiqués à ce stade des études, essentiellement sur l'axe du barrage (et/ou celui de l'organe d'étanchéité), plus rarement dans la cuvette de retenue ou sur les gîtes de matériaux (étude de problèmes particuliers, couverture importante, reconnaissance d'emprunts sur de grandes épaisseurs ou de carrières d'encrochements...).
- ◆ *prospection détaillée des zones d'emprunt (cas des barrages en remblai), avec prélèvements d'échantillons* : elle consiste en des tranchées à la pelle selon une maille plus serrée que lors des premières investigations, avec prise d'échantillons remaniés.

À ce stade des études, la maille des tranchées ne devrait pas être inférieure à 50 mètres (quatre tranchées par hectare, à adapter aux conditions locales). Il est préférable dans toute la mesure du possible de respecter une répartition assez régulière des tranchées, tout en les organisant selon des profils topographiques parallèles entre eux et perpendiculaires aux courbes de niveau.

Une coupe détaillée de chaque tranchée est levée, avec mention des prélèvements d'échantillons réalisés ; penser à noter l'épaisseur de terrains inexploitable à décaper en surface (couche végétale organique), la profondeur des venues d'eau et si possible celle de la nappe phréatique (et ses variations prévisibles), l'épaisseur d'éventuels horizons intermédiaires à purger, l'instabilité éventuelle des parois.

La prise d'échantillons est à faire en fonction des changements de nature du terrain, ce qui conduit souvent à un prélèvement tous les mètres de profondeur en moyenne, avec comme limite celle des terrains a priori exploitables (au-dessus de la nappe phréatique notamment).

Le poids des échantillons doit être suffisant pour la réalisation des essais géotechniques envisagés (environ 2 kg pour une simple identification, au moins 20 kg pour des essais de compactage, voire plus en cas de granulométrie grossière). Il convient si possible que ces prélèvements soient effectués par le laboratoire chargé des essais.

- ◆ *reconnaissance des gîtes d'agrégats pour béton (classique ou BCR)* : ils sont reconnus à la pelle comme pour les zones d'emprunt ; quant à la prospection de carrières potentielles, elle comprend l'étude des niveaux rocheux concernés (nature pétrographique, étude structurale, densité de fracturation, épaisseur de découverte), assortie si nécessaire de forages carottés, et de géophysique. En général, l'ouverture de carrières nouvelles est exclue, sauf celles qui seront noyées par la retenue.

- ◆ *essais in situ* : les essais évoqués en page 47 (*voir Essais et mesures in situ*) peuvent le cas échéant être réalisés, si l'importance du barrage ou les problèmes rencontrés le justifient.

Interprétation des reconnaissances

L'ensemble des informations apportées par les travaux de reconnaissance est interprété par le géologue qui affine sa connaissance du site. Selon l'importance de l'ouvrage envisagé, la nature géologique du site et les problèmes rencontrés, il établit en tant que de besoin les documents suivants : coupes géologiques, profils de perméabilité et de fracturation, diagrammes structuraux.

Essais géotechniques en laboratoire

Une partie plus ou moins importante des essais nécessaires (*voir Essais géotechniques en laboratoires, p. 46 et s.*) est réalisée à ce stade d'étude, en fonction de divers critères (taille de l'ouvrage, contraintes budgétaires ou foncières, habitudes du bureau d'études...). Mais il est économiquement intéressant d'avoir fait l'ensemble des prélèvements en une seule fois, même si une partie seulement est étudiée en laboratoire au niveau de l'APS surtout pour les plus petits barrages. En tout état de cause, l'ensemble des essais préconi-

sés doit être fait au niveau de l'APD. Il est admissible de ne réaliser qu'un nombre restreint d'essais lors de l'APS, par exemple en se limitant à des essais de définition.

Synthèse géotechnique

Elle est établie sur la base des comptes rendus d'essais en laboratoire, de reconnaissances et de mesures *in situ*, et s'attache à distinguer des familles de matériaux homogènes, tant en fondation que dans les zones d'emprunt, en indiquant pour chacune les fourchettes de valeur des différents paramètres mesurés.

Les premiers calculs de stabilité peuvent être réalisés à partir de cette synthèse et permettent de définir le(s) profil(s) probable(s) pour les barrages en terre, le niveau de fondation pour les autres types de barrages.

La synthèse géotechnique doit aussi comporter un diagnostic sur la disponibilité en matériaux du site, selon le type de barrage envisagé, et attirer éventuellement l'attention sur la nécessité de prospector de nouvelles zones d'emprunt avant le début des travaux.

Rapport final

Établi après réalisation de toutes les étapes précédentes, il comprend :

- ◆ une synthèse de toutes les études géologiques entreprises depuis le début des études ;
- ◆ la synthèse géotechnique évoquée ci-dessus (étude géotechnique préliminaire) ;
- ◆ la définition des reconnaissances d'APD (forages carottés, prélèvements intacts ou remaniés, géophysique, essais géotechniques en laboratoire et *in situ*...) ;
- ◆ le choix argumenté du type d'ouvrage le mieux adapté au site ;
- ◆ une esquisse préliminaire du barrage (zonage, pentes, ancrage, purge...) et un avis sur le traitement de la fondation et le cas échéant de la cuvette.

ÉTUDES GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE D'APD (AVANT-PROJET DÉFINITIF)

Dans le cas des plus petits barrages, cette phase pourra être confondue avec celle d'APS.

But poursuivi

Sauf cas particulier, la géologie est déjà bien connue à ce stade, et seules des reconnaissances ponctuelles sont généralement nécessaires (en particulier : fondation des ouvrages annexes tels qu'évacuateur de crues, galeries de vidange, de dérivation, de visite, tour de prise, barrages secondaires s'ils n'étaient pas envisagés lors de l'APS).

Cependant, en cas de modification significative de l'implantation du barrage (ou du seul axe de l'organe d'étanchéité) depuis les reconnaissances d'APS, de nouveaux forages carottés avec essais d'eau sont nécessaires sur le nouvel emplacement.

C'est en revanche à ce stade des études que la plus grande partie des études géotechniques proprement dites (mécanique des sols ou des roches selon le cas) est généralement réalisée et nécessaire :

- ◆ prélèvement d'échantillons en nombre adapté à la taille de l'ouvrage et aux conditions

rencontrées (degré de complexité géologique et de variabilité des sols), en fondation et dans les zones d'emprunt envisagées ;

- ◆ réalisation d'essais de laboratoire (programme adapté pour bien connaître la fondation des ouvrages et les zones d'emprunt de matériaux). Leur but est de fournir au projeteur les éléments nécessaires à la conception détaillée du barrage et de permettre la définition des recommandations d'ordre géologique et géotechnique pour la conduite des travaux et le suivi ultérieur de la vie de l'ouvrage. Cette phase d'étude correspond en France, pour les barrages de hauteur supérieure ou égale à 20 mètres, au *dossier définitif* à soumettre au Comité Technique Permanent des Barrages.

Méthodologie des études géologiques et géotechniques d'APD

Les études géologique et géotechnique d'APD comprennent tout ou partie des éléments suivants, de manière très variable selon les caractéristiques de chaque ouvrage (importance, complexité, type de barrage...).

- ◆ Reconnaissance complémentaire éventuelle de la fondation du barrage et des ouvrages annexes, notamment en cas de terrains peu consistants, de changement d'implantation, ou de reconnaissances antérieures insuffisantes (problèmes fonciers par exemple) : tranchées à la pelle, sondages carottés avec essais d'eau et/ou prélèvement d'échantillons « intacts », essais *in-situ* (pénétromètre...).
- ◆ Reconnaissance détaillée des zones d'emprunt de matériaux par tranchées à la pelle, avec prélèvements pour essais en laboratoire (notamment : prospection de nouveaux casiers en cas d'insuffisance du volume des matériaux disponibles, parfois en raison d'une augmentation de celui du barrage, ou en cas de changement tardif de type de barrage).
- ◆ Essais géotechniques en laboratoire (mécanique des sols et/ou des roches) sur échantillons intacts et remaniés, de la fondation et des emprunts.
- ◆ Analyses chimiques, radiométriques, sur les matériaux d'emprunt ou sur des terrains de fondation.
- ◆ Synthèse géotechnique (et géologique le cas échéant) de la fondation et des matériaux d'emprunt, débouchant sur la réalisation de calculs de stabilité permettant de définir le profil du barrage (en terre) ou le niveau de fondation des ouvrages rigides.
- ◆ Choix définitif des axes (ouvrages principal et annexes, étanchéité), du type d'ouvrage, de ses matériaux constitutifs.
- ◆ Définition précise de la nature et de la forme des organes d'étanchéité, de la zonation du barrage (selon le cas), des casiers d'emprunt, des conditions de mise en œuvre des matériaux, des dispositifs d'auscultation de la fondation et du barrage.
- ◆ Recommandations pour la conduite des travaux et le suivi de l'ouvrage en service (précautions à prendre, notamment pour la stabilité des versants et talus d'excavations en cours de travaux et lors de vidanges de la retenue ; maîtrise de la teneur en eau pour l'édification de barrages en remblai ; points d'arrêt nécessitant une réception par le géologue avant poursuite des travaux ; dispositions de détail à arrêter en fonction des observations faites lors des travaux...).

GÉOLOGIE ET GÉOTECHNIQUE AU STADE DU PROJET

Elles concernent essentiellement la rédaction des parties géologique et géotechnique du *Cahier des Clauses Techniques Particulières*¹ (CCTP) des marchés de travaux (selon les cas : terrassements, travaux préparatoires des ouvrages de génie civil, injections, paroi moulée, auscultation...).

Ce CCTP a notamment pour but de préciser à l'intention des entreprises participant aux appels d'offres les points particuliers à prendre en considération pour l'établissement de leurs offres et surtout pour la réalisation des travaux. Il comporte les documents d'information aux entrepreneurs consultés : hydrologie, géologie, résultats des reconnaissances.

Les points particuliers devant faire l'objet de *Spécifications Techniques Détaillées* (STD) sont les suivants (liste indicative et non exhaustive) :

- ◆ conditions de tri, sélection et mise en œuvre des matériaux de remblai, normes de compactage (fourchette de teneur en eau et de compacité, valeurs limites du degré de saturation et/ou de la pression interstitielle, fuseaux granulométriques, modalités du contrôle des matériaux...);
- ◆ critères d'arrêt et de réception des fouilles et purges ;
- ◆ pentes de talus après excavation à respecter (fouilles, emprunts) ;
- ◆ spécifications particulières concernant, le cas échéant, les injections (profondeurs, pressions, critères d'arrêt : pression/volume...);
- ◆ spécifications particulières concernant, le cas échéant, la paroi moulée (critères d'arrêt, conservation d'échantillons, précautions concernant la piézométrie...);
- ◆ spécifications particulières concernant, le cas échéant, le voile de drainage (orientation des forages par rapport au pendage, espacement, profondeur, traitement des zones au large) ;
- ◆ spécifications concernant les piézomètres (nature, zones sensibles à surveiller éventuellement...).

SUIVI GÉOLOGIQUE DES TRAVAUX

But poursuivi

L'intervention de la personne ayant réalisé l'ensemble des études géologiques préliminaires et participé à l'élaboration du projet est indispensable pendant le déroulement des travaux de construction du barrage.

En effet, des adaptations de détail ou parfois plus importantes peuvent être nécessaires à un moment ou à un autre des travaux, car les reconnaissances préliminaires, même très détaillées, ne concernent réellement qu'une faible partie du volume de terrain. Ceci est d'autant plus vrai que la variabilité des paramètres géologiques et géotechniques est importante.

Il importe de bien noter que la phase de réalisation des travaux fait partie intégrante des études, car c'est à ce seul moment que la géologie peut être vue en vraie grandeur et en

1. On trouvera au chapitre IV, p. 101 les indications nécessaires à l'établissement du CCTP d'un barrage en remblai.

continu, et que peuvent être décelés d'éventuels problèmes ou éléments importants, ayant pu échapper aux reconnaissances. Il convient d'en tenir compte moyennant des adaptations ou des modifications des dispositions constructives initialement prévues. Par exemple en approfondissant localement des organes d'étanchéité, en purgeant des terrains peu consistants, en adaptant le zonage du remblai, en ajoutant des drains, en adaptant la profondeur de piézomètres....

Ces modifications, qui sont parfois à décider très vite sur le chantier, en raison du rythme souvent rapide des travaux, doivent être notifiées en temps utile aux entreprises concernées, sous forme écrite (ordre de service, compte rendu de visite, inscription au journal de chantier) accompagnée de plans et croquis.

Elles sont à archiver ensuite dans le cadre du *Dossier des Ouvrages Exécutés* ou *Plans de Récolement*, constituant la mémoire du chantier et utiles lorsqu'il est nécessaire de chercher la cause de désordres ou de comportements « anormaux » plusieurs mois ou années après la fin des travaux. Cette recommandation garde toute sa valeur pour les plus petits barrages.

Méthodologie du suivi géologique des travaux

Pour atteindre ce but, le géologue doit être étroitement associé au déroulement du chantier, sous forme de visites périodiques, pour une part programmées en fonction des phases de travaux nécessitant son intervention (réception de fond de fouilles...), et pour le reste selon une périodicité à adapter aux caractéristiques du chantier (importance des ouvrages, complexité géologique, expérience des entreprises).

Il importe donc que le géologue soit tenu informé en temps utile de l'avancement des travaux, afin de pouvoir programmer ses visites et éviter :

- ◆ de ne pouvoir faire les observations et « réception » prévues ;
- ◆ de retarder les travaux (arrêt ou remblaiement de fouille...), ce qui est toujours difficile et générateur de conflits généralement nuisibles à la qualité du travail.

La liste, non exhaustive, des tâches à accomplir au cours des travaux de construction d'un barrage est la suivante :

- ◆ *Suivi de la réalisation des fouilles de toutes natures (ancrage, clef d'étanchéité, purge, décapage superficiel, galeries creusées dans le rocher...) :*
 - comparaison aux prévisions, décision d'arrêt ou de poursuite des fouilles (adaptation du niveau d'arrêt des fouilles aux conditions géologiques rencontrées) ;
 - surveillance de la stabilité des excavations, des versants naturels et talus (en déblai ou remblai), avec si nécessaire décision de mise en œuvre de confortements (épinglage de blocs rocheux instables, adoucissement, cloutage ou épaulement de talus meubles...).
- ◆ *Lever géologique des fonds de fouilles (ancrage, purge, clef d'étanchéité, ouvrages annexes en béton : galeries, évacuateur de crues, tour de prise) :* il est généralement fait, pour les ouvrages d'une certaine importance, à l'occasion de la réception contractuelle des fonds de fouille prévue au marché, et peut s'accompagner de prise de photographies, prélèvement d'échantillons, relevés de fracturation, levés topographiques précis de points particuliers visibles en fond de fouille.

- ◆ *Lever géologique des galeries creusées dans le rocher (réservées en général aux plus grands des ouvrages visés ici) :* représentation de la nature des terrains traversés et de leur structure (fracturation, pendages, schistosité, porosité) sur un plan développé de la section de la galerie, avec report de tous indices hydrogéologiques (cavités, venues d'eau, pertes...).
- ◆ *Suivi des prélèvements de matériaux d'emprunt pour les barrages en terre :*
 - comparaison des terrains effectivement rencontrés avec les prévisions, et contrôle de la conformité de la conduite des emprunts avec les spécifications du marché ;
 - recherche de nouveaux casiers si nécessaire ;
 - adaptation des conditions d'exploitation : tri des matériaux, zonage du remblai, traitement des matériaux (séchage, humidification, criblage...) ;
 - surveillance de la stabilité des talus résiduels, et adaptation de la conduite des emprunts en cas de problèmes.
- ◆ *Suivi de l'exploitation des gîtes d'agrégats et des carrières (pour BCR, protections en enrochements...) :*
 - comparaison avec les prévisions ;
 - contrôle de la conformité des matériaux exploités aux spécifications du marché (granulométrie ou blocométrie, nature, forme, caractéristiques mécaniques...).
- ◆ *Suivi de la réalisation des drains et puits drainants en fondation.* L'attention doit porter essentiellement sur :
 - la vérification de la traversée effective et correcte des zones à drainer ou décompresser (suivi des forages, examen des cuttings, enregistrement de paramètres, diagraphies...), et l'adaptation éventuelle de la profondeur et de l'orientation des drains ;
 - l'absence de colmatage lors de la foration (pas d'utilisation de boues de forage, nettoyage soigné en fin de foration jusqu'à l'obtention d'eau claire) ;
 - le développement des puits éventuellement nécessaires ;
 - la conformité des dispositifs filtrants (dimension, nature et disposition des crépines) aux spécifications et aux conditions réellement rencontrées, et leur adaptation si nécessaire ;
 - la réalisation correcte, le cas échéant, de l'isolation de certaines zones ne devant pas être mises en communication hydraulique ;
 - la vérification finale du fonctionnement (qui peut n'avoir lieu parfois qu'après remplissage partiel ou total de la retenue), avec en particulier l'absence de tout entraînement de particules de sol dans l'eau recueillie (qui pourrait constituer l'amorce d'un renard).
- ◆ *Suivi de la réalisation des voiles d'injection (le cas échéant) :*
 - définition, en liaison avec les spécialistes de l'entreprise, du plot d'essai et des consignes d'injection (pressions et/ou volumes limites, critères d'arrêt) ;
 - établissement de coupes géologiques reconstituées par enregistrement des paramètres de forage destructif ;
 - modifications éventuelles de la profondeur du voile (approfondissement au niveau d'accidents perméables...), ou de son extension latérale (allongement des voiles au large) ;
 - modifications éventuelles de l'espacement entre forages, du dosage et parfois de la nature du coulis, des paramètres d'injection (pression, volume, débit) ;
 - définition et suivi de sondages de reconnaissance ou de contrôle avec essais d'eau ;
 - décision éventuelle de retraitement en cas de mauvais résultats des essais de contrôle ;
 - synthèse et interprétation des absorptions de coulis et des pressions d'injection.

◆ *Suivi de la réalisation des parois moulées (le cas échéant) :*

- établissement de la coupe des terrains traversés par prélèvement d'échantillons à la sortie de la benne, si le type d'outil utilisé et/ou la nature des terrains le permettent ;
- « réception » du fond d'excavation (prélèvement d'un échantillon à la benne en fin de creusement), notamment lorsqu'un niveau d'ancrage particulier doit être atteint ;
- surveillance particulièrement attentive de la continuité de la paroi ;
- surveillance de la stabilité des parois, de la largeur et de la verticalité de l'excavation (observer le centrage des câbles ou tiges par rapport aux bords de celle-ci lors de la descente et de la montée de la benne) ;
- contrôle d'éventuels hors-profils de creusement (visibles sur les courbes de bétonnage, dans le cas des parois au béton plastique où l'on substitue ce dernier à la boue de creusement) ;
- suivi de la piézométrie de part et d'autre de la paroi au cours des travaux (il convient de s'assurer en permanence que la boue ou le coulis dans l'excavation est à un niveau supérieur d'au moins 1,5 à 2 mètres à celui de la surface piézométrique dans le terrain naturel, afin d'assurer la stabilité des parois) ;
- décisions éventuelles de modification de la géométrie (augmentation ou diminution de la profondeur et de l'extension latérale) en fonction des conditions géologiques effectivement rencontrées.

BIBLIOGRAPHIE

Antoine (P.), Barbier (R.), 1973 - *Les problèmes géologiques posés par les barrages de faible hauteur*, Annales I.T.B.T.P., série sols et fondations, S.A. le Bâtiment éd., supp. au n° 312, pp. 27 - 46.

Antoine (P.), Fabre (D.), 1980 - *Géologie appliquée au génie civil*, Paris, Masson, 291 p.

Couturier (B.), 1985 - *Géologie des barrages collinaires*, Bulletin de l'A.I.G.I., n° 31, Paris, pp. 51 - 57.

Couturier (B.), 1987 - *Les études géologiques dans les projets de barrages*, Thèse doctorat d'État, Univ. Grenoble I, 350 p., 97 fig.

Gignoux (M.), Barbier (R.), 1955 - *Géologie des barrages*, Paris, Masson, 343 p., 176 fig., 28 photos.

Habib (P.), 1980 - *Cours de mécanique des sols*, ENGREF, 109 p.

Lautrin (D.), 1990 - *Géologie des barrages et des retenues de petites dimensions*, Série Hydraulique Agricole n° 7, Cemagref, 144 p., 68 fig., 17 photos.

AFNOR, 1995 - *Norme expérimentale XP P 94.202 - Sols : reconnaissance et essais. Prélèvement des sols et des roches : méthodologie et procédures.*