

1- Introduction :

Il existe dans le monde plus de 36 000 barrages dont la hauteur dépasse 15 m (figure 1) ; la plupart ont été construits depuis 1950. Ce rapide accroissement du parc (200 par an à l'heure actuelle) correspond à l'évolution de la population mondiale dans les pays en développement (figure 2), et à la nécessité toujours plus pressante de gérer de manière rationnelle les ressources en eau.

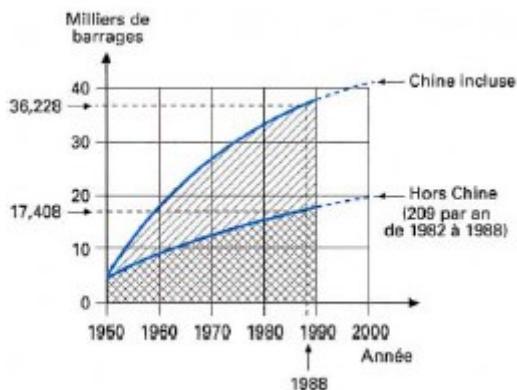


Figure 1 – Évolution du parc mondial de barrages (plus de 15 m)

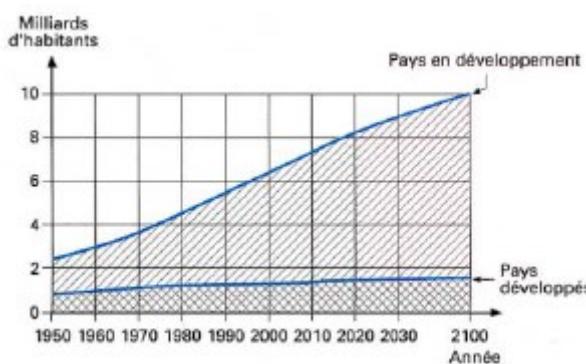


Figure 2 – Évolution de la population mondiale

Un barrage relève localement, de manière permanente ou temporaire, le niveau d'un cours d'eau et constitue, en association avec les rives naturelles, une réserve. C'est l'un ou l'autre de ces aspects qui prédomine, selon l'objectif recherché.

Les objectifs d'un aménagement comportant un barrage sont très variés :

- irrigation : 270 millions d'hectares sont irrigués dans le monde ; cela représente le cinquième des terres cultivées, et ce cinquième fournit le tiers de toute la nourriture disponible, ce qui représente les trois quarts de la consommation mondiale d'eau ; l'agriculture est donc de loin le premier consommateur de l'eau des réservoirs ;
- génération d'électricité : l'énergie hydroélectrique, avec une production annuelle de 2 100 TWh, représente actuellement 20 % de la production électrique totale, et 7 % environ de toute l'énergie consommée dans le monde ; ces valeurs varient considérablement d'un pays à l'autre ; les plus grosses proportions existent en Norvège (99,6 %), Brésil (90 %), Autriche (79 %) et Canada (66 %). Dans le tiers monde, c'est souvent la seule ressource

d'énergie disponible localement. En Europe, l'hydroélectricité a joué un rôle prépondérant dans le développement industriel du XIXe siècle, mais devient de moins en moins importante, les ressources naturelles ne pouvant suivre l'accroissement de la demande ;

- contrôle des crues : cela a été de tout temps une forte motivation pour l'édification de barrages, et souvent même l'objectif principal. Une protection permanente efficace de vastes contrés contre les crues a ainsi pu être obtenue, comme dans la vallée du Colorado aux États-Unis grâce au barrage Hoover, ou par les ouvrages plus récents qui protègent les vallées des grandes rivières chinoises. Le plus souvent, la protection contre les crues est un effet bénéfique secondaire des ouvrages construits dans un autre but.

Globalement, les autres objectifs des barrages sont mineurs en regard des trois buts principaux ; ils sont néanmoins d'importance dans l'aménagement des pays développés ou non ; il faut citer :

- l'alimentation en eau potable ou industrielle ;
- la régularisation en vue de la navigation ;
- les développements touristiques et de loisirs ;
- la recharge et l'assainissement des nappes phréatiques.

Dans la plupart des cas, c'est le volume du réservoir créé qui est le paramètre significatif des bénéfices apportés par le barrage :

- volume utile rapporté au volume des crues, pour la protection contre les crues ;
- volume utile rapporté aux variations saisonnières ou interannuelles du débit naturel de la rivière, pour les besoins agricoles, urbains ou industriels.

Pour les aménagements à buts multiples, on est parfois amené à attribuer à chacun des objectifs une fraction bien définie du volume utile disponible ; cela se traduit en pratique par des règles d'exploitation.

La différence entre le volume total du réservoir et le volume utile est constituée par le culot, fraction du réservoir située au-dessous des organes de vidange; sur les cours d'eau sur lesquels existe un fort transport solide (torrents de montagne, bassins versants déboisés à érosion active), le culot est plus ou moins rapidement comblé par les sédiments. Ce facteur est parfois déterminant dans le dimensionnement d'un barrage (figure 3).

Dans le cas de la production d'électricité, la hauteur de la chute (éventuellement augmentée par des moyens divers : galeries d'amenée et conduites forcées) joue au moins autant que le volume retenu.

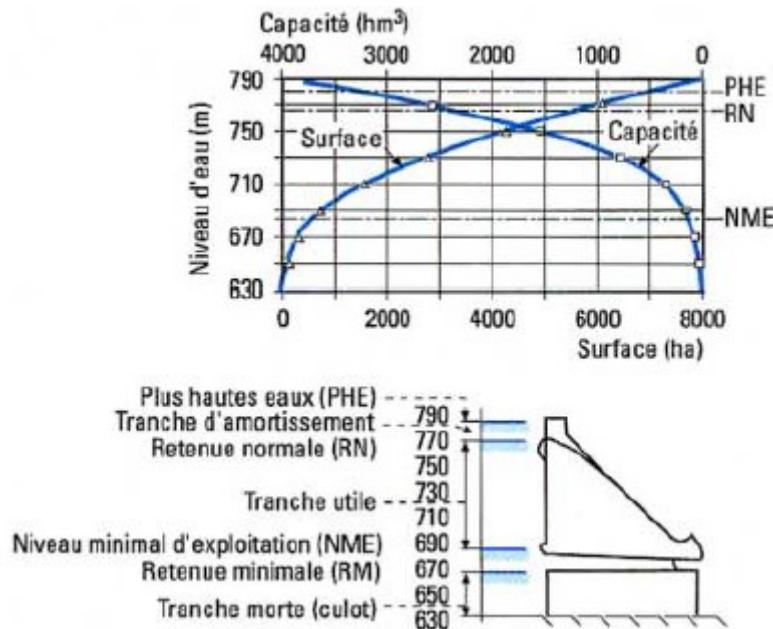


Figure 3 – Principe d'exploitation et dimensions d'une retenue

Dans les pays arides ou semi-arides, les objectifs assignés généralement aux petits barrages en terre sont surtout : l'alimentation en eau des populations et des animaux, le développement de l'agriculture irriguée. L'idée de projet peut provenir des populations, des autorités administratives et politiques ou de sociétés d'exploitation. L'envergure de l'ouvrage, son intérêt, son coût et ses impacts d'ordre social et économique exigent l'examen préalable de solutions alternatives intermédiaires qui peuvent satisfaire les objectifs,

L'étude préalable consiste à examiner soit certaines variables possibles du projet (comparaison d'un ensemble sites, intégration des objectifs), soit des solutions de rechange autre que le barrage (puits modernes, forages)

Solution	Avantages	Inconvénients
Puits	<ul style="list-style-type: none"> - Peu cher - Exécution rapide - Exhaure manuelle possible - Facile d'entretien - Occupation de l'espace minime 	<ul style="list-style-type: none"> - Implantation difficile sans moyen de prospection - Sécurité d'exploitation limitée (épuisement de la nappe ou abaissement sensible de son niveau pouvant conduire à des assèchements) - Eau pas toujours saine si le puits est non couvert - Débit pas toujours intéressant - Accessibilité limitée des personnes - L'emplacement techniquement favorable peut être rejeté par les populations pour des raisons socioculturelles,

Forage	<ul style="list-style-type: none"> - Plus cher que le Puits mais toujours très bon marché par rapport au barrage - Permet une exploitation de la nappe meilleure car peut être fore profondément - Eau saine - Occupation de l'espace infime 	<ul style="list-style-type: none"> - Exige un Moyen d'exhaure mécanique - Risque d'épuisement de la nappe - Réalisation délicate (personnel et matériel spécialisés) - Débit pas toujours intéressant - Emplacement technique favorable quelque fois rejeté par les populations pour des raisons socioculturelles,
Barrage	<ul style="list-style-type: none"> - Stockage d'un volume important - Facilite d'exploitation de l'eau stockée (écoulement gravitaire) - Réalimentation possible des nappes environnantes - Ouvrage antiérosif, - Autorise plusieurs activités socio-économiques - Peut permettre de désenclaver des localités (barrages - route) 	<ul style="list-style-type: none"> - Très coûteux - Sites favorables peu nombreux - Eau stockée fréquemment polluée - Forte évaporation de l'eau stockée - Entretien difficile et complexe - Occupe de l'espace ; donc très sensible aux problèmes fonciers (expropriation des propriétaires terriens, ouvrage entre plusieurs collectivités villageoises), - Développement de maladies d'origine hydrique - Envasement progressif de la cuvette - Menace la sécurité des personnes et des biens en cas de rupture

Procédures de conception des ouvrages hydrauliques :

Lors de la conception d'un ouvrage hydraulique, comme dans tout autre projet de Génie Civil, on peut distinguer trois phases bien caractérisées :

1.6.1- Première phase : études préliminaires ou Avant-Projet Sommaire (APS) :

Elle concerne les **reconnaissances** et les études générales de la zone développer en vue :

- d'établir l'inventaire des réalisations susceptibles de satisfaire des besoins soit déjà exprimés soit répertoriés dans la zone
- d'apprécier l'intérêt économique de la réalisation de ces aménagements, elle comprend les étapes suivantes :
 - **collecte des données disponibles** : documents cartographiques, données climatiques, renseignements géologiques, données relatives aux pratiques agricoles et aux besoins d'eaux.
 - **inventaires des sites potentiels et Critères de choix** : topographiques, géologique et géotechnique, hydrologique, proximité des lieux d'utilisation, critères économiques, reconnaissance des lieux, reconnaissance géologique et géotechnique, examen des sites topographique rapide, reconnaissance du périmètre irrigable et/ou des agglomérations rurales

Les études préliminaires à réaliser sont :

- 1- Etude topographique.
- 2- Etude hydrologique.

- 3- Etude géologique et géotechnique.
- 4- Evaluation des besoins.
- 5- Evaluation des caractéristiques de l'aménagement.
- 6- Choix des sites.
- 7- Schémas des aménagements - Estimations des coûts.
- 8- Programme de réalisation.
- 9- Etablissement du rapport de synthèse.

1.6.2- Deuxième phase : étude d'Avant-Projet Détailé (APD) :

Elle concerne les études des variantes présélectionnées lors de la phase préliminaire. Il s'agit des études d'avant-projet détaillé qui permettront la réalisation des aménagements.

Les études d'avant-projet détaillé comprennent :

- 1- Levés et études topographiques.
- 2- Etudes hydrologiques.
- 3- Etudes géologiques et géotechniques.
- 4- Evaluation des besoins en eau.
- 5- Etude de régularisation.
- 6- Etudes d'impacts du projet.
- 7- Types, caractéristiques et dimensionnements des ouvrages.
- 8- Les prescriptions techniques.
- 9- Avant-métré et détail estimatif.

1.6.3- Troisième phase : études de réalisation des ouvrages (dossier d'exécution) :

Elle concerne les conditions d'organisation, les prescriptions techniques pour une bonne exécution et les contrôles qui doivent être mis en œuvre pendant la construction des ouvrages.

Ces études intéressent les aspects suivants :

- Moyens pour la réalisation du projet (engins, matériaux, matières consommables, personnel)
- Organisation du chantier
- Exécution des travaux (séquence des opérations, principaux travaux, contrôle des travaux)

1.1- Le risque rupture de barrage :

La destruction partielle ou totale d'un barrage peut être due à différentes causes :

-Techniques : défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des eaux lors de crues ; vices de conception, de construction ou de matériaux, vieillissement des installations

-Naturelles : séismes, crues exceptionnelles, glissements de terrain (soit de la fondation ou des appuis de l'ouvrage, soit des terrains entourant la retenue et provoquant un déversement sur le barrage)

-Humaines : insuffisance des études préalables et du contrôle d'exécution, erreurs d'exploitation, de surveillance et d'entretien, malveillance.

Le type de rupture dépend des caractéristiques propres du barrage. Ainsi, elle peut être :

-Progressive : dans le cas des barrages en remblais, par érosion régressive, suite à une submersion de l'ouvrage ou à une fuite à travers celui-ci ;

-Brutale dans le cas des barrages en béton, par renversement ou par glissement d'un ou plusieurs plots.

Une rupture de barrage entraîne la formation d'une onde de submersion se traduisant par une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval.

2- Conditions naturelles d'un site

2.1 Recherche du site et faisabilité :

L'étude de la faisabilité d'un barrage passe avant tout par le choix du site d'implantation en prenant en compte la capacité de la retenue ainsi que le choix et la conception des ouvrages.

Une fois que les objectifs et les contraintes qui en résultent pour le barrage et la retenue sont connus, il convient de rechercher le site le plus apte et de préciser dans quelles conditions l'ouvrage pourrait être réalisé sur ce site pour se prononcer en toute connaissance de cause sur sa faisabilité et sur les suites à donner au projet.

Les principaux paramètres à prendre en compte dans le choix du site et du type de barrages sont les suivants :

- la topographie et les apports du bassin versant ;
- la morphologie de la vallée ;
- les conditions géologiques et géotechniques ;
- le contexte météorologique et le régime des crues.

Dans plusieurs cas, après considération de ces aspects, plusieurs types de barrages resteront possibles. Des considérations économiques permettront alors de départager les solutions.

2.2. Données topographiques

Si l'on excepte le cas des plans d'eau à vocation touristique et les petits barrages hydroélectriques, c'est le volume de la retenue qui conditionne toute la conception du barrage. On cherche en effet à disposer d'un volume d'eau pour le soutien d'étiage, l'irrigation ou l'eau potable, ou bien d'un volume disponible pour amortir une crue.

Le tout premier travail consiste donc à calculer le volume d'eau d'une cuvette, en plusieurs sites éventuellement. Un premier dégrossissage peut être fait à l'aide d'une carte au 1/25 000, sauf pour les retenues de quelques dizaines de milliers de m³. Le deuxième travail consiste à

vérifier si le bassin versant autorise le remplissage de la retenue et à calculer avec quel risque de défaillance.

Un site de barrage, au sens topographique, se place sur un verrou, resserrement de la vallée situé juste en aval d'une cuvette naturelle susceptible, une fois fermée, de constituer un réservoir de volume suffisant. Une fois fixée approximativement la position envisagée pour le barrage, la cuvette est définie par un graphique sur lequel sont portés la surface et le volume en fonction de la cote du plan d'eau (figure 3) ; il servira à définir la hauteur souhaitable du barrage (c'est-à-dire celle qui sera adoptée, sous réserve que toutes les autres conditions, notamment géotechniques, soient satisfaites).

La forme du site proprement dit influe sur le choix du type de barrage ; on peut réduire cette forme à deux caractéristiques : la largeur relative (L/H), qui varie en pratique de 1 à 4, parfois plus ; et la forme en U (vallées glaciaires) ou en V (figure 4).

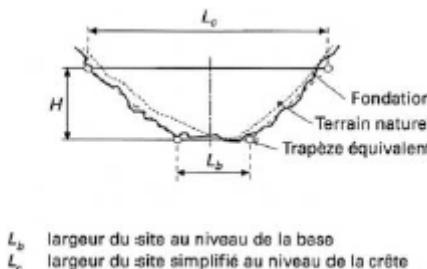


Figure 4 – Géométrie simplifiée d'un site de barrage

Tout barrage est nécessairement lié à son environnement. La morphologie de la vallée joue un rôle important dans le choix du site du barrage et du type d'ouvrage le mieux adapté. Bien entendu, l'emplacement idéal et le plus économique est celui d'un site étroit, précédé à l'amont par un élargissement de la vallée, à condition que les appuis du barrage soient sains (resserrement indépendant d'une zone d'éboulement ou d'un glissement). Ce type de site est peu fréquent, soit parce qu'il n'existe pas toujours de resserrement de vallée dans la nature, soit parce que le choix du site n'obéit pas toujours aux seules considérations techniques.

En première approximation, une vallée large conviendra mieux à l'aménagement d'un barrage en remblai. Un site étroit conviendra aussi à un barrage poids et un site très étroit conviendra aussi à une voûte. Tout cela bien sûr sous réserve que les fondations le permettent.

2.3 Données géologiques et géotechniques

La constitution même d'une retenue d'eau requiert du massif dans lequel elle est située des propriétés minimales en matière d'étanchéité naturelle ; il serait en effet très coûteux de généraliser l'étanchement artificiel à tout le fond du bassin, et de telles réalisations sont exceptionnelles.

La nature, la résistance, l'épaisseur, le pendage, la fracturation et la perméabilité des formations rencontrées au droit du site constituent un ensemble de facteurs souvent déterminants dans la sélection du type de barrage.

Par ailleurs, chaque type de barrage requiert des propriétés mécaniques minimales spécifiques en matière de déformabilité et de résistance des appuis, lorsque ceux-ci sont soumis :

- aux forces appliquées directement par le barrage ;
- aux forces internes induites par la percolation de l'eau au sein de la fondation.

Tout projet de barrage commence donc par une étude géologique, géophysique et géotechnique qui est progressivement affinée au fur et à mesure que le projet se développe et que les choix se précisent sur le type et la hauteur du barrage. Le géologue intervient en premier lieu pour expliquer la nature et la structure du site, mettre en évidence les principales incertitudes ; les reconnaissances géotechniques par sondages, galeries de reconnaissances, prélèvements, essais de laboratoire et essais in situ sont réalisées pour lever les inconnues.

Ces études aboutissent à la détermination de la nature des différentes formations (sols ou roches) présentes sur le site, leur extension géométrique, leurs propriétés en matière de perméabilité, déformabilité, résistance mécanique, altérabilité à l'eau ; les discontinuités (failles, fractures, diaclases, zones de dissolution ou karsts) sont recherchées avec le plus grand soin.

2.3.1 Fondations rocheuses

Sauf en cas de roches très fissurées ou de caractéristiques très médiocres, les fondations rocheuses se prêtent à l'édification de tous types de barrages, moyennant des dispositions adéquates concernant la purge des matériaux très altérés et le traitement éventuel par injection. L'aspect important est le régime des fractures (failles, joints, diaclases, schistosité).

Les barrages en remblai conviennent toujours. Pour les autres, les exigences vont en croissant du BCR, au béton conventionnel et à la voûte.

2.3.2 Fondations graveleuses

Sous réserve qu'elles soient suffisamment compactes, ces fondations conviennent en général pour des barrages en terre ou en enrochements, du moins au plan mécanique. Le contrôle des fuites doit être assuré par un dispositif d'étanchéité et de drainage approprié.

Dans la pratique, ce type de fondation se rencontre surtout pour les rivières ou fleuves à débit important. L'ouvrage doit donc évacuer des crues importantes, ce qui exclut les barrages en terre. Des barrages en béton de très petite hauteur peuvent également être édifiés moyennant des précautions concernant les fuites et les percolations (risque de renard) et les tassements différentiels.

2.3.3 Fondations sablo-silteuses

Des fondations de silt ou de sable fin peuvent convenir à l'édification de barrages en terre, voire exceptionnellement à de très petits barrages poids en béton moyennant de sérieuses précautions.

2.3.4 Fondations argileuses

Des fondations argileuses impliquent presque automatiquement le choix de barrages en remblai, avec des pentes de talus compatibles avec les caractéristiques mécaniques des formations en place.

2.4. Matériaux disponibles

La disponibilité sur le site, ou à proximité, de matériaux utilisables pour la construction d'un barrage a une incidence considérable, souvent même prépondérante sur le choix du type de barrage :

- sols utilisables en remblai ;
- enrochements pour remblai ou protection de talus (rip-rap) ;
- agrégats à béton (matériaux alluvionnaires ou concassés) ;
- liants (ciment, cendres volantes ...).

La possibilité d'extraire ces matériaux de l'emprise de la retenue permet d'accroître la capacité de stockage. En outre, cela minimise généralement les coûts de transport et de remise en état des zones d'emprunts.

D'une manière générale, si l'on dispose de sols limoneux ou argileux de qualité (teneur en fines, plasticité, état) et en quantité suffisante (1,5 à 2 fois le volume du remblai), la solution barrage en terre homogène ou pseudo-zoné - en réservant les matériaux les plus grossiers en recharge aval - s'impose comme la plus économique, du moins tant que les débits de crue à évacuer demeurent modestes.

Si l'on dispose de matériaux imperméables en quantité limitée, et par ailleurs de matériaux grossiers ou d'enrochements, il est envisageable de construire un barrage en terre zoné ou en enrochements avec noyau. Cette solution présente l'inconvénient d'une mise en œuvre par zones, d'autant plus compliquée que le site est restreint et contrarie l'évolution des engins.

Si l'on ne dispose que de matériaux grossiers, ceux-ci peuvent être exploités pour édifier un remblai homogène, l'étanchéité étant assurée par une paroi au coulis construite après montée du remblai en son centre, ou par une étanchéité amont artificielle (béton, membrane ou béton bitumeux).

Si l'on ne dispose que d'enrochements, un barrage en enrochements compactés avec étanchéité rapportée sur le parement amont éventuellement adouci (membrane, masque en béton hydraulique ou béton bitumineux) conviendra. La solution béton, en particulier la solution BCR, peut également s'avérer compétitive, sous réserve de fondation suffisamment bonne (rocher ou terrain compact) ne nécessitant pas de fouilles excessives.

2.5 Données sismologiques

L'étude, sur une base historique ou déterministe (sismo-tectonique), de la sismicité du site est entreprise et aboutit à la définition de deux séismes de référence :

- le séisme de projet, que l'ouvrage doit être en mesure de supporter sans aucun dommage ;

- le séisme maximal probable, auquel le barrage doit pouvoir résister sans ruine ni mise hors service de ses organes de sécurité.

Chacun d'eux est défini par un niveau d'accélération et un spectre de fréquence, qui serviront dans les calculs de la structure.

2.6 Conditions générales d'environnement

D'autres natures de données, moins importantes dans la mesure où elles n'influent que rarement sur la faisabilité d'un barrage, sont toutefois indispensables pour mener le projet à son terme : citons notamment les conditions climatiques (températures extrêmes, gel), qui constituent des sollicitations supplémentaires du futur ouvrage, les propriétés chimiques de l'eau, parfois agressive vis-à-vis de certains matériaux notamment le béton, la disponibilité de matériaux de construction de qualité à proximité, les accès, etc.

3. Crues et ouvrages hydrauliques

Le coût des ouvrages d'évacuation des crues dépend des caractéristiques hydrologiques du bassin versant.

Dans le cas de bassin versant étendu et de crues prévisibles sévères, il peut être intéressant de combiner évacuateur de crues et barrage dans un ouvrage en béton déversant.

Au contraire, un déversoir de petites dimensions favorise plutôt le choix d'un barrage en remblai, toutes choses égales d'ailleurs.

Lorsque la construction d'un évacuateur requiert des excavations significatives, la possibilité d'utiliser les produits de déblais favorise aussi un barrage en remblai.

Lorsqu'une galerie est requise pour assurer la dérivation provisoire du cours d'eau durant les travaux, cette galerie peut être avantageusement intégrée aux ouvrages d'évacuation des crues, moyennant, si besoin est, une légère augmentation de sa section.

Le choix d'un barrage en BCR peut s'avérer attractif, dans la mesure où il permet de comprimer les délais d'exécution et de s'affranchir des risques liés à l'arrivée d'une crue qui obligeraient, dans les autres solutions, à des ouvrages de dérivation ou de protection onéreux.

4. Critères économiques

Dans plusieurs cas, les considérations précédentes auront permis de retenir plusieurs types de barrage. Par exemple, des fondations rocheuses, la présence de matériaux meubles proches du site, un débit de crue important, conduiront à mettre en balance un barrage en BCR et un barrage en terre équipé d'un évacuateur de crue coûteux.

Il convient alors de poursuivre les études pour les deux types d'ouvrages, en veillant à affiner les estimations de coût au fur et à mesure de la progression des études. Dès que l'un des types de barrages paraît significativement plus économique, il est préférable de ne pas s'entêter sur l'autre option.

5. Conclusion sur le choix du type de barrage

Le choix du type de barrage s'impose tout naturellement dans bien des cas, sans qu'il soit nécessaire de faire des investigations poussées. Ainsi, lorsque le substratum rocheux est à une profondeur supérieure à environ 5 mètres, seul un barrage en remblai est raisonnablement envisageable, du moins pour les ouvrages de hauteur inférieure à 25 mètres. Dans certaines régions, le contexte géologique est tel que le type de barrage est presque toujours le même.

Dans d'autres cas, le choix du type de barrage sera un compromis entre les différents aspects suivants : nature de la fondation, disponibilité de matériaux à proximité, hydrologie, pour aboutir au meilleur choix économique. Mais il y aura toujours intérêt à choisir le plus rapidement possible, en règle générale à l'issue des études de faisabilité.