

UIC

COURS DIGUES ET BARRAGES EN TERRE



Référence	COURS DIGUES ET BARRAGES
Date	10/09/2015
Emetteur	JELLOUL BRAHIM.

SOMMAIRE

1	GENERALITES.....	4
1.1	DES BARRAGES ANCIENS.....	4
1.2	BARRAGES AU MAROC	8
1.3	IMPACT ECONOMIQUE ET SOCIAL.....	9
1.4	EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT.....	10
1.5	DIVERS TYPES DE BARRAGES.....	11
2	FONCTION DE BARRAGE.....	12
2.1	IRRIGATION.....	12
2.2	ÉNERGIE	13
2.3	NAVIGATION	16
2.4	LUTTE CONTRE LES CRUES.....	16

2.5	EAU POTABLE	17
2.6	AUTRES ASPECTS DES BARRAGES	17
3	DIVERS TYPES DE BARRAGES.....	18
3.1	BARRAGES EN REMBLAI	18
3.1.2	BARRAGE A NOYAU.....	19
3.2	BARRAGES EN BETON.....	23
3.3	BARRAGES A CONTREFORT ET A VOUTES MULTIPLES.....	25
3.4	BARRAGES MOBILES	25
3.5	L'IMPORTANCE DU DRAINAGE	26
3.6	L'EVACUATION DES CRUES	27
3.7	LES BARRAGES A CLAPETS.....	27
4	CONCEPTION DE L'OUVRAGE.....	29
4.1	MISE HORS D'EAU ET EXCAVATION	29
4.2	LES FONDATIONS	30
4.3	BARRAGE EN REMBLAI	30
4.4	BARRAGE EN BETON	31

1 GENERALITES

Fondamentalement, un barrage est un mur placé en travers d'un cours d'eau, afin d'en relever le niveau pour créer une chute ou une réserve. Ce mur intègre un certain nombre d'ouvrages dits annexes lui permettant de remplir ses fonctions :

- un évacuateur de crue (également appelé déversoir pour les petits ouvrages), qui protège l'ouvrage des risques de submersion en cas de crue ;
- une vidange destinée à vider la retenue ;
- une ou plusieurs prises d'eau pour remplir ses missions : production d'énergie hydroélectrique, alimentation d'un réseau d'irrigation ou d'un canal de transport, fourniture d'eau potable...

Les avancées de la connaissance et des techniques ont permis d'élever progressivement la taille des ouvrages jusqu'aux records actuels (plus de 300 mètres de haut). Dans le même temps, l'accroissement des besoins a entraîné leur multiplication partout dans le monde : il existe aujourd'hui plus de 50 000 grands barrages (dépassant les 15 mètres).

Mais pour en arriver là, que de progrès ont été nécessaires ! Il a fallu comprendre comment s'exerçait la pression de l'eau, utiliser au mieux les propriétés des matériaux de construction ou en inventer de nouveaux, savoir évaluer les caractéristiques du sol sur lequel s'appuiera l'ouvrage, sans oublier de garantir une sécurité toujours plus grande.

1.1 Des barrages anciens

1.1.1 Égypte 2 600 av. J.-C.

Le barrage est un des tout premiers ouvrages que l'homme ait construit dès qu'il a voulu aménager son milieu naturel. On en trouve des exemples dans toutes les civilisations, L'ouvrage a été édifié à Sadd El Kafara, sur l'oued Garawi à 30 km au sud du Caire. Il a été bâti il y a plus de 2 600 ans, sans doute pour protéger la vallée à l'aval des crues rares mais brutales dans la région.

Le barrage de Saad El Kafara mesurait 12 mètres de haut et 108 mètres de long. Il était constitué de 2 murs de maçonnerie épais de 24 mètres à la base, enserrant un noyau en terre de 36 mètres d'épaisseur. En l'absence d'évacuateur de crue, il fut détruit par submersion en cours de construction.

Cet accident dissuada pendant longtemps les Égyptiens d'édifier d'autres barrages. Il faudra attendre le règne de Sethi Ier pour que soit construit un autre ouvrage, cette fois en enrochement, sur le Nahr El Asi près de Homs. Haut de 6 mètres et long de 2 km, il est toujours en service de nos jours.

1.1.2. Chine VIe siècle av. J.-C.

Privées de contacts entre elles, les civilisations les plus différentes n'en ont pas moins manifesté une approche étonnamment semblable dans leurs tentatives de maîtrise des eaux.

Tel est le cas de la Chine, avec des ouvrages comme le réservoir d'Anfangtang, construit entre 598 et 591 av. J.-C sous la gouverne de Sun Shuao, ministre du roi Ting. Cet ouvrage faisait partie d'un ensemble de sept réservoirs bâtis dans le centre et à l'ouest du pays, ainsi qu'aux environs de Shangai.

Retenant près de 100 millions de mètres cube d'eau, il a connu plusieurs périodes d'abandon, mais fut régulièrement remis en état et reste en activité de nos jours.

La Chine a légué bien d'autres ouvrages marquants aux temps anciens. On peut notamment citer le barrage en gabions de 30 mètres de haut et 300 mètres de long construit vers 240 av. J.-C. sur la rivière Gukow dans le Shansi. Ou, plus près de nous, la digue Ming de 100 km de long édifiée aux XVI-XVIIe siècles autour du lac Hungtsé, au Kansou.

1.1.3 Empire romain. IIe siècle après J.-C.

On connaît l'importance de l'eau dans la civilisation romaine et le savoir-faire de ses bâtisseurs dans ce domaine. Ainsi la Méditerranée est-elle parsemée de vestiges qui témoignent du talent des citoyens de l'Empire dans l'aménagement de leurs territoires.

Nombre de ces ouvrages ont traversé les siècles et fonctionnent encore, notamment en Espagne. Le barrage de Proserpina, près de Mérida, fut construit au début du IIe siècle. Haut de 22 mètres, il permettait de retenir 6 millions de mètres cube d'eau.

À l'époque romaine, cette eau était conduite à Mérida par l'aqueduc Los Milagros, long de plusieurs kilomètres. Elle était employée pour alimenter les fontaines et les thermes, ainsi vraisemblablement que pour un usage industriel. De nos jours, le barrage est toujours utilisé pour l'irrigation.

Cette permanence d'un ouvrage sur dix-neuf siècles prouve la valeur et la flexibilité de l'aménagement, mais aussi le soin apporté à son entretien à travers les différentes époques.

1.1.4 Le Moyen-âge en France

La digue de Jugon-les-Lacs (en Bretagne, près de Dinan, dans les Côtes d'Armor) est un bel exemple de ces ouvrages à buts multiples construits par milliers dans la France du Moyen-âge, et qui ont tant contribué à façonner son paysage.

Édifiées à partir du Xe siècle, ces digues ne dépassaient généralement pas 10 mètres de haut. Elles servaient aussi bien à l'élevage du poisson qu'à fournir de l'énergie aux roues de moulin et aux soufflets de forge des martinets et des foulons.

Haute de 8 mètres, la digue de Jugon retient 2,5 millions de mètres cubes d'eau juste au dessus du village niché à son pied. Elle fut réalisée il y a près de 800 ans pour élever du poisson, assurer la protection du château local et faire fonctionner deux moulins qui ne s'arrêtèrent qu'en 1920, ainsi qu'une forge au Moyen-âge.

1.1.5 Asie Centrale. XIIIe siècle

Les premiers barrages-voûtes apparus en Asie Centrale s'inspiraient d'une technique développée à partir du IIIe siècle par les Sassanides.

On en trouve les exemples les plus anciens en Iran, lorsque la dynastie mongole des Ilkahn reconstruisit le pays ravagé un siècle plus tôt par ses propres armées.

Édifié vers 1300 après J.-C., le barrage de Kebar, situé à 60 km de Kashan, serait le plus ancien barrage-voûte construit depuis l'époque romaine. Ses dimensions : 45 mètres de haut pour 55 mètres de long.

La palme de la hauteur revient cependant au barrage de Kurit, bâti à la fin du XIIIe siècle à 620 km de Téhéran. Avec ses 64 mètres de hauteur (pour seulement 28 mètres de long), il restera le barrage-voûte le plus élevé au monde jusqu'au début du XXe siècle.

L'un et l'autre servaient à la fois à l'irrigation et à l'alimentation en eau

1.1.6 L'Espagne de la Renaissance

L'Espagne a su tirer le meilleur parti de son double héritage, à la fois romain et musulman, pour devenir l'un des plus importants bâtisseurs de barrages à la Renaissance.

On a ainsi pu y dénombrer les vestiges de soixante-douze ouvrages romains, auxquels est venu s'ajouter le savoir-faire arabe en matière d'irrigation. Parmi les constructions léguées à la suite de la conquête musulmane, le barrage-poids d'Almonacid fut édifié au XIIIe siècle près de Saragosse. Haut de 29 mètres et long de 200, il a vu depuis son réservoir remblayé et a été mis en culture.

Autre édifice marquant de cette période, le barrage-voûte d'Almansa, a été bâti en 1384 au nord d'Alicante. S'élevant à 13 mètres à l'origine, il fut rehaussé au XVIe siècle pour atteindre ses 25 mètres actuels.

Ce riche héritage nourrit l'inspiration des bâtisseurs espagnols, avec des barrages comme celui de Tibi (1580-1594). De haut mètres pour une longueur de 65 mètres, ce dernier resta le plus haut barrage au monde jusqu'en 1856

1.1.8 L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

(FAO)

Barrages programmé en 2005,

104 grands barrages d'une capacité totale de 16,904 milliards de m³, ainsi que

17 petits et moyens barrages

67 barrages ou lacs collinaires, d'une capacité totale de 9,9 millions de m³

1.2 Barrages au Maroc

Depuis 1920, les autorités coloniales françaises, soucieuses des efforts de la Première Guerre mondiale, trouvaient dans le Maroc un grand réservoir compensateur des déficits en matière de production agricole.

Dans le cadre de la campagne du Maroc, la France a occupé les grandes plaines marocaines susceptibles de fournir les produits agricoles, tâche prise en charge par les colons encouragés par la propagande. Les régions occupées présentaient tous les avantages d'une agriculture prometteuse pour les investisseurs coloniaux.

Le Maroc, avec ses potentialités hydrologiques et la fertilité de ses terres, manquait d'infrastructures adéquates pour assurer l'irrigation des plaines marocaines, notamment la plaine de Tadla, la plaine d'Abda Doukala, de la Chaouia et celle des plaines atlantiques considérées comme zones faisant partie du Maroc utile.

L'introduction des aménagements modernes a débuté avec la réalisation des premiers grands barrages réservoirs dont l'objectif est de fournir de l'eau potable, de l'eau pour l'irrigation et de produire de l'électricité.

À partir des années 1950, les gouvernements successifs mettent en place une politique de construction et d'édification de barrages. Mais la véritable révolution est menée pendant le règne du roi Hassan II (1961-1999). Notamment avec l'objectif, d'atteindre le million d'hectares irrigués à la fin du siècle. Cette politique est visible dès le plan quinquennal 1968-1972, dans lequel les investissements publics liés à

l'irrigation représentent 41 % (2,088 milliards de dirhams) de l'enveloppe budgétaire prévisionnelle; jusqu'à 400 millions de dirhams par an sont consacrés à la construction de barrages.

La construction de grands ouvrages est largement préférée ; le soutien apporté à la petite et moyenne hydraulique y est bien inférieur. L'eau est essentiellement destinée à l'agriculture : dans les années 2010, la superficie agricole irriguée avoisine 550 000 hectares ; les barrages alimentent également en eau villes et usines.

Les grands barrages du Maroc en fonctionnement sont en 2011, selon le gouvernement marocain, au nombre de 128 et offrent une capacité totale d'environ 17,2 milliards de m³.

1.3 Impact Economique et Social

Les retombées économiques d'un barrage peuvent être considérables dès sa phase de construction, à travers l'embauche d'ouvriers de la région ou les commandes aux sous-traitants.

Une fois l'ouvrage mis en service, ses bienfaits se font également ressentir au niveau régional ou national à travers la production d'électricité, l'irrigation ou l'apport d'eau potable.

À proximité, en revanche, l'aménagement dernier peut provoquer la disparition d'activités agricoles et une modification des modes d'exploitation qui réclament un temps d'adaptation. Cette évolution peut prendre plusieurs années et s'avère souvent le fait des jeunes générations.

C'est pourquoi les décideurs doivent veiller à ce que le projet reçoive l'assentiment des populations locales, et que celles-ci soient impliquées dans son élaboration.

Une fois ces transformations assimilées, l'impact du barrage s'avère largement positif, à la fois par ses apports directs (énergie, irrigation...) et par le tourisme, devenu un secteur économique majeur. Les lacs de retenue favorisent en effet la création de plages artificielles et le développement d'activités nautiques.

1.4 Effets sur l'environnement

La lutte contre les inondations et les sécheresses, ainsi que la réponse à la croissance de la demande mondiale d'eau, vont nécessiter la construction de nombreux barrages supplémentaires partout dans le monde.

La question de l'eau ne cesse de prendre de l'importance. Selon les prévisions, la demande mondiale devrait croître de 2 à 3 % par an dans les prochaines décennies.

Maîtriser l'impact sur les écosystèmes.

Dans les pays développés, cette augmentation pourrait être en partie compensée par une gestion plus rationnelle et un effort de recyclage. En revanche, dans le reste du monde, inondations et sécheresses vont nécessiter la construction de barrages supplémentaires.

C'est pourquoi il est essentiel de maîtriser leur impact sur l'environnement. À cette fin, des études d'impact ont été rendues obligatoires dans de nombreux pays membres de la CIGB (Commission Internationale des Grands Barrages). En cas de constat négatif, le projet se verra modifié, voire remplacé par une solution mieux à même de préserver les espèces animales et végétales.

Une énergie de substitution

L'épuisement des réserves pétrolières et la pollution atmosphérique appellent également à une réorientation progressive des politiques énergétiques. L'hydroélectricité est une des sources de substitution envisageables pour répondre à l'essor de la demande sans léser l'environnement.

Des solutions plus modestes telles que les micro-chutes peuvent aussi contribuer à fournir de l'énergie tout en contribuant à créer des emplois. Une telle formule fournirait l'occasion de revitaliser des territoires entiers grâce à de petits établissements industriels.

1.5 Divers types de barrages

Quelques indications sommaires sur les divers types de barrages. Le principe général d'un barrage est de barrer une vallée, plus ou moins encaissée, pour accumuler l'eau. Cette accumulation peut avoir plusieurs objectifs.

Leurs caractéristiques géométriques et le principe de leur conception permettent aussi de regrouper les barrages en grandes familles.

On distingue donc, de façon schématique, divers types de barrages :

- suivant leur fonction, sachant qu'un même ouvrage peut en avoir plusieurs.

Accumulation d'eau restituée pour la production d'énergie, l'alimentation en eau

ou l'irrigation ;

régulation d'une voie d'eau pour la navigation ou la gestion des crues et des

étiages.

- Suivant leurs caractéristiques géométriques :

barrages réservoirs, de grande hauteur ;

barrages au fil de l'eau, sur le cours d'une rivière.

- Suivant leur conception :

barrages poids, pour lesquels, comme leur nom l'indique, c'est la masse de l'ouvrage qui s'oppose à la pression de l'eau ;

barrages voûtes, pour lesquels la pression de l'eau est transmise par l'ouvrage sur les parois latérales

Un barrage comporte toujours divers composants :

le barrage proprement dit, qui retient l'eau, avec un masque d'étanchéité ;

un évacuateur de crues, évitant un excès d'eau dans le réservoir ;

des dispositifs de contrôle et de surveillance.

Pour les barrages réservoirs :

- une prise d'eau, pour l'envoyer vers son utilisation ;
- une vanne de fond, pour permettre la vidange du réservoir.

Pour les barrages au fil de l'eau :

des vannes de régulation du débit ;

souvent des écluses et des passes à poissons.

2 FONCTION DE BARRAGE

2.1 Irrigation

L'irrigation est une des applications les plus anciennes et les plus courantes des barrages. Aujourd'hui encore, près de la moitié des ouvrages dans le monde sont construits dans ce but.

Historiquement, la première technique à se développer fut celle de la dérivation ;

elle consiste à dévier une partie des cours d'eau jusqu'aux terrains où l'on souhaite cultiver des plantes. La seconde technique, plus élaborée, est celle du stockage ; son avantage est de pouvoir se pratiquer de manière discontinue, en profitant des périodes de pluie pour reconstituer les réserves. Les deux méthodes continuent de se pratiquer de nos jours. Car les barrages par stockage, bien que généralement plus performants, ne sont pas adaptés à tous les sites : ceux qui ont subi une forte érosion, souvent par déforestation, vont provoquer de forts dépôts, débouchant sur un phénomène d'envasement.

Des réalisations plus modestes peuvent aussi apporter leur contribution. Ainsi, des milliers de petits barrages (5 à 10 mètres de haut) permettent de créer des "lacs collinaires" afin d'irriguer les terres agricoles.

L'avenir de l'irrigation passe par une meilleure gestion de l'eau et une connaissance plus fine de la consommation des plantes. Les performances pourraient encore être améliorées grâce à la mise au point de nouvelles techniques en collaboration avec des spécialistes d'autres disciplines : agronomes, etc

Au Maroc l'agriculture irriguée s'est imposée comme composante de l'économie nationale et régionale en tant que levier de production de richesses et de création d'emplois. En effet, l'agriculture irriguée au Maroc, bien qu'elle n'occupe que 15 % des superficies cultivées contribue à environ 45 % en moyenne de la valeur ajoutée agricole et intervient pour 75 % des exportations agricoles. Cette contribution est plus importante pendant les années de sécheresse où la production des zones Bour est sévèrement affectée. Durant la campagne 1994-1995, année sèche, cette contribution s'est par exemple située à 70% de cette valeur ajoutée.

Le secteur irrigué contribue en moyenne à hauteur de 99% pour la production de sucre, 82% pour les cultures maraîchères, 100% pour les agrumes, 75% pour les fourrages et 75% pour le lait. En outre, ce secteur assure près de 120 millions de journées de travail par an, soit environ 1 million 65 mille emplois dont 250 mille permanents. A cela il faut ajouter l'amélioration des revenus des agriculteurs qui, grâce à l'avènement de l'irrigation, ont été multipliés par 5 à 13 fois selon les périmètres, le désenclavement et l'accès aux autres services publics communaux comme l'eau potable, l'électrification, etc., ainsi que les retombées importantes à l'amont sur les secteurs des travaux publics, de l'industrie et des services, et à l'aval sur le secteur de l'agro-industrie.

Le poids du secteur de l'irrigation dans l'économie nationale est tel que la gestion rationnelle des infrastructures hydro-agricoles mérite une attention toute particulière.

2.2 Énergie

L'hydroélectricité est une source d'énergie essentielle, propre et renouvelable.

Son exploitation permet de réduire l'appel à d'autres sources plus polluantes ou non renouvelables.

Bien avant l'essor de l'électricité, l'eau fut utilisée pour produire de l'énergie hydromécanique, grâce aux moulins. Puis, au XVe-XVIe siècles, elle sert à alimenter les hauts-fourneaux de l'industrie métallurgique alors en plein essor. Des barrages sont construits ou surélevés pour alimenter les « lacs des forges » qui se répandent bientôt dans tout le pays.

En 1860, l'énergie hydraulique apporte ainsi 75 % de la puissance fixe des machines installées dans les usines, contre 25 % à la vapeur. En revanche, la prise de conscience de la nécessité d'équipements hydroélectriques n'intervient que tardivement. La loi sur l'eau de 1919 marque un tournant en imposant une véritable nationalisation des ressources hydrauliques.

Parallèlement, un vaste programme de construction de barrages est lancé. Ralenti par la crise des années 30, il ne décollera vraiment qu'après 1946.

L'hydroélectricité n'en reste pas moins une ressource essentielle : il s'agit en effet d'une énergie de pointe, mobilisable en quelques minutes seulement, contrairement à celle fournie par les autres types de centrales.

Parmi les plus grands barrages au Maroc :

Le barrage de Bin el Ouidane est un barrage marocain situé dans la province d'Azilal (région de Tadla-Azilal),



il a une double vocation : la production d'énergie et l'irrigation. Il est considéré comme le plus haut barrage en voûte d'Afrique et le plus grand du Maroc en production énergétique. Outre sa capacité d'irrigation concernant la plaine de Tadla, qui appartient à la plaine intérieure pré-

atlasique du Tadla (3 500 km²), prolongée dans la région de Marrakech-Tensift-Al-Haouz par la plaine des Sraghna. Le barrage a permis de mettre en valeur 69 500 ha de terres fertiles sur 125 km de longueur.

Le barrage de Daourat, situé à 50 km environ à l'aval d'Imfout et à 46 km à l'amont du barrage Sidi Saïd Maâchou, a été conçu comme un ouvrage à vocation exclusivement hydro-électrique. Mis en service en 1950, ce barrage contrôle un bassin versant de 28 000 km³. Il est ancré sur des barres de quartzites très dures, à pendage vertical et peu tectonisées. Il permet en fin d'aménagement de produire en année moyenne 320 Gwh.

Les aménagements du Haut Sebou comprennent, de l'amont vers l'aval :

- Le barrage M'dez en construction par la Direction des Aménagements Hydrauliques ;
- La chute El Menzel constituée du barrage Ain Timedrine et de l'usine hydroélectrique d'El Menzel (125 MW) prévue à son aval ;
- La chute de Matmata constituée du barrage Allal El Fassi et de l'usine hydroélectrique en dérivation du même nom. Cet aménagement Hydroélectrique est en exploitation depuis 1994.

Le barrage Aït Ouarda est situé dans la province d'Azilal (région de Tadla-Azilal). Il a été construit de 1948 à 1957 à quelques kilomètres à l'aval du barrage de Bin El Ouidane, ouvrage principal de la mise en valeur de 69 500 ha de terre fertile des Béni Moussa faisant partie de l'importante plaine du Tadla d'une superficie de plus de 3 600 km² s'étendant entre la chaîne du haut atlas et le plateau des phosphates.

Le barrage en arc d'Aït Ouarda de 43 m de hauteur et de 120 m environ de longueur, est édifié dans les roches calcaires d'une gorge étroite et profonde. Il a été créé ainsi en bassin de compensation d'une capacité de 4 millions de m³, dont le remous de la retenue s'étend pratiquement jusqu'à l'usine de Bin El Ouidane. De cet ouvrage de compensation et de prise, une galerie d'amenée en légère pente de 10,5 km et d'un diamètre de 4,5 m, calibrée pour un débit de 48 m³/s, aboutit à une cheminée d'équilibre d'où deux conduites forcées et une conduite de décharge en superstructure dévalent sur une hauteur de 225 m jusqu'à l'usine d'Afourer, qui produit annuellement 350 millions de kWh.

L'une des particularités de cette installation réside dans le fait que deux des conduites forcées amènent l'eau à l'usine, tandis que la troisième a été aménagée à la fois pour servir de décharge et pour assurer la conduite des irrigations de la zone des Béni Moussa en cas de panne d'une turbine ou de l'ensemble de l'installation. Le barrage du type voûte, à parements cylindriques d'un rayon de courbure de 60 m est équipé de 5 vannes segments permettant d'évacuer un débit de 2700 m³/s.

Dans cet aménagement, seule la construction de la galerie d'amenée des Aït Ouarda à Afourer, à travers des roches calcaires et dolomitiques, a présenté de très grandes difficultés, car il fallut non seulement traverser près de 3 km de couches marno-gypseuses mais faire face à l'afflux

d'abondantes venues d'eau à 15 kg/cm² de pression, qui nécessitent de nombreuses injections sur quelque 2,8 km de galerie. Ces venues d'eau ont imposé une quasi-imperméabilisation préalable du terrain d'attaque à l'aide de sondages injectés suivant 2 à 3 auréoles en forme de troncs de cône emboîtés. Les injections subhorizontales ont été faites jusqu'à 90 m à l'intérieur du terrain

2.3 Navigation

Les barrages facilitent le transport fluvial en régulant les cours d'eau naturels et permettent l'alimenter des canaux.

Les barrages contribuent à favoriser le transport fluvial en régulant les cours d'eau naturels et en alimentant les canaux artificiels construits à cet effet. La première tâche est confiée à des barrages de navigation, généralement associés à des écluses. La seconde est obtenue en dérivant des cours d'eau voisins, ou grâce à des barrages réservoirs.

La construction d'ouvrages de stockage pour l'alimentation des canaux connaît son apogée en France entre 1820-1840, avec pour emblème le Canal de Bourgogne. L'invention des barrages mobiles, par Poiré en 1837, va permettre de concilier les nécessités du transport et de la régulation du débit fluvial.

Le transport fluvial va bientôt souffrir de la concurrence du chemin de fer ; les dimensions des canaux ne correspondent plus aux exigences du transport de marchandises moderne.

À partir des années 1950 s'amorce pourtant une renaissance du transport fluvial. La Seine, la Moselle, le Rhin et le Rhône sont canalisés à grand gabarit, soit 22% du réseau navigable français (pour un total de 1900 km) en 2002.

Son développement devrait se poursuivre dans les années à venir, avec un objectif de rééquilibrage des modes de transport. Quant aux anciens canaux tels que ceux du Midi ou de Bourgogne, ils se voient offrir une nouvelle vie. au service du tourisme

2.4 Lutte contre les crues

Les barrages, par le stockage temporaire de l'eau et l'écrêtement des débits, permet de limiter efficacement les dégâts dus aux crues.

Le vaste mouvement d'urbanisation du XIXe siècle a donné une acuité nouvelle à la question de la lutte contre les crues. Il ne s'agit plus seulement de protéger les habitations, mais aussi les installations industrielles.

L'année 1856 va marquer un tournant, du fait de crues exceptionnelles sur tout le territoire français. Elles conduisent à la création de services des inondations à Aix (Durance), Saint-Étienne et Orléans (Loire), Lyon (Rhône) et Paris (Seine).

Certains aménagements ont été réalisés spécialement dans ce but, comme par exemple sur la Seine et ses affluents (Aube, Marne, Yonne). Ces installations peuvent d'ailleurs cumuler plusieurs fonctions, comme celle qui assure le refroidissement de la centrale nucléaire de Nogent.

Des barrages à pertuis ouvert, permettant de ralentir les crues, ont aussi été mis en place, comme dans le Gard à partir des années 1950.

Le barrage des Trois Gorges, inauguré début 2006 en Chine, a également été bâti avec l'objectif affiché de lutter contre les crues. Celles-ci pouvaient se révéler ravageuses, comme à l'automne 1998 où elles causèrent la mort de 300 000 personnes !

La lutte contre les crues passe aussi par le développement d'une véritable « culture de l'inondation ». Cela suppose, par exemple, d'éviter de construire dans les zones menacées.

-

2.5 Eau potable

En stockant l'eau, les barrages permettent de régulariser et de sécuriser l'alimentation en eau potable des villes.

L'alimentation en eau potable est une des plus grandes conquêtes auxquelles les barrages aient participé. C'est l'objectif à l'origine, par exemple, du barrage Zola, inauguré à Aix-en-Provence en 1854.

Parmi les réalisations les plus marquantes du XIXe siècle figure également le barrage du Furens à Saint-Étienne, inauguré en 1866. Celui-ci servait tout à la fois à alimenter la ville en eau, à lutter contre les crues et à maintenir l'étiage de la rivière afin de garantir le fonctionnement d'usines hydromécaniques.

L'utilisation des barrages pour l'alimentation en eau est d'autant plus nécessaire que les nappes souterraines, surexploitées, ne peuvent plus subvenir à elles seules aux besoins. Les eaux stockées dans les retenues permettent ainsi de s'adapter aux variations du cycle hydrologique.

Cet usage peut aussi être industriel, soit directement comme dans l'industrie chimique ou le raffinage, soit indirectement comme pour le refroidissement des centrales électriques. L'eau stockée peut même servir à diluer les rejets polluants, afin de maintenir les cours d'eau à un niveau de qualité acceptable.

2.6 Autres aspects des barrages

réservoir...

Les barrages servent aussi aux loisirs et à la pisciculture. Ils ont même, autrefois, été utilisés pour la défense des villes en cas d'attaque !

• Loisirs

L'utilisation des barrages pour l'approvisionnement de plans d'eau récréatifs ne date pas d'hier. Un de ses vestiges les plus étonnants est le gigantesque système mis en place pour l'alimentation du château de Versailles et de son parc sous Louis XIV.

Le XXe siècle est marqué la démocratisation des loisirs nautiques et des aménagements qui les accompagnent. Des espaces spécifiques ont ainsi été mis en place ..

- **Pisciculture**

L'élevage de poissons fut sans doute une des premières finalités des petites retenues créées à proximité des monastères au Moyen-âge. Certains ouvrages anciens, dans la Brenne, la Sologne ou les Dombes, continuent de remplir cette fonction.

Les grands ouvrages modernes, en revanche, ne l'intègrent plus qu'à titre accessoire. De nombreux aménagements spécifiques ont cependant été réalisés afin de permettre la préservation ou la réintroduction d'espèces locales.

- Défense des villes

L'utilisation des barrages à des fins militaires fut mise en pratique notamment dans la Chine ancienne, ou aux Pays-Bas durant la guerre de 39-45. En France, en revanche, elle resta toujours à l'état d'ébauche.

Des projets furent toutefois élaborés aux XVIIe et XVIIIe siècles, notamment dans les régions du nord, plus vulnérables aux invasions.

3 Divers types de barrages

3.1 BARRAGES EN REMBLAI

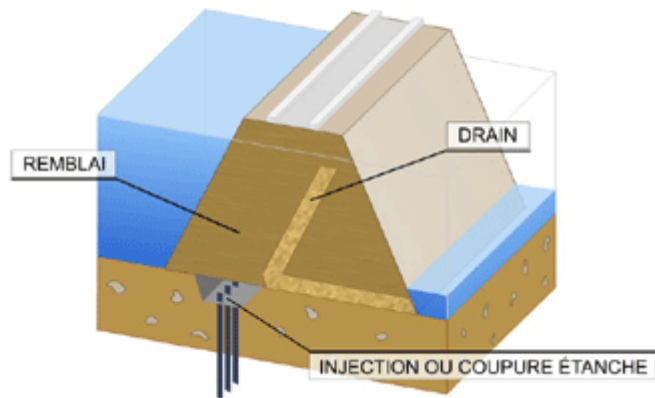
- Les barrages en terre présentent notamment l'avantage de pouvoir reposer sur des fondations de médiocre qualité, c'est-à-dire compressibles.

- Tous les barrages en terre peuvent être considérés comme des barrages poids, c'est-à-dire qu'ils résistent à la pression de l'eau par leur propre poids. C'est ce qui explique leur section de forme trapézoïdale. On en trouve de trois types :

- homogène,
- à noyau,
- à masque.

-3.1.1 Barrage homogène

Un barrage en terre est dit homogène lorsqu'il est constitué d'un même matériau à dominante argileuse, relativement imperméable. Selon les ouvrages, la pente des talus sera plus ou moins forte, en fonction notamment des caractéristiques du matériau employé.

BARRAGE HOMOGÈNE**3.1.2 BARRAGE A NOYAU**

Dans un barrage à noyau, les fonctions de résistance et d'étanchéité sont en quelque sorte séparées. La résistance est assurée par les recharges placées sur les flancs de l'ouvrage, et l'imperméabilité par le noyau central.

Le noyau au centre de l'ouvrage va être constitué de la terre la plus imperméable possible. Il sera tenu de part et d'autre par des recharges composées, selon les cas, de terre plus perméable, d'alluvions ou d'enrochements.

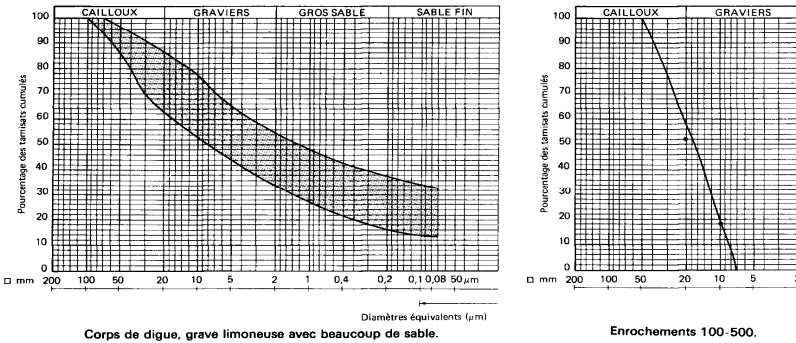


Fig. 3 Granularité des sols constitutifs de la digue.

TABLEAU I

	Origine du matériau	w_L	I_p	ES
Corps de digue (0-80)	Éboulis à « fines » du col de Forcle et des Quillis (distance de transport $\approx 1,7$ km)	22	5	19
Filtres et drains (0-100)	Éboulis « gravelo-sableux » des Quillis (distance de transport $\approx 0,5$ km)	(¹)	(¹)	30
Enrochements (100-500)	Éboulis « crus » du Roc du Diable (distance de transport $\approx 1,3$ km)			
(¹) indéterminé				

CONCEPTION

Les possibilités en matériaux et l'imperméabilisation suffisante (estimée par une reconnaissance visuelle) du socle quartzitique ont conduit le laboratoire à proposer finalement une digue homogène fondée au rocher, soigneusement décapé, sans injection a priori, avec un système de drainage interne par tapis monocouche et une protection générale par enrochements. Cette protection était rendue nécessaire par les conditions atmosphériques difficiles liées à l'altitude (eau, neige, gel) et par l'amélioration de la protection du talus aval pour le cas où des filets d'eau y resurgiraient. Les pentes finales amont et aval retenues ont été de $\arctg 1/2$ après une vérification des stabilités à pleine eau et en vidange rapide, dans les conditions géométriques de construction indiquées sur les figures 4 et 5.

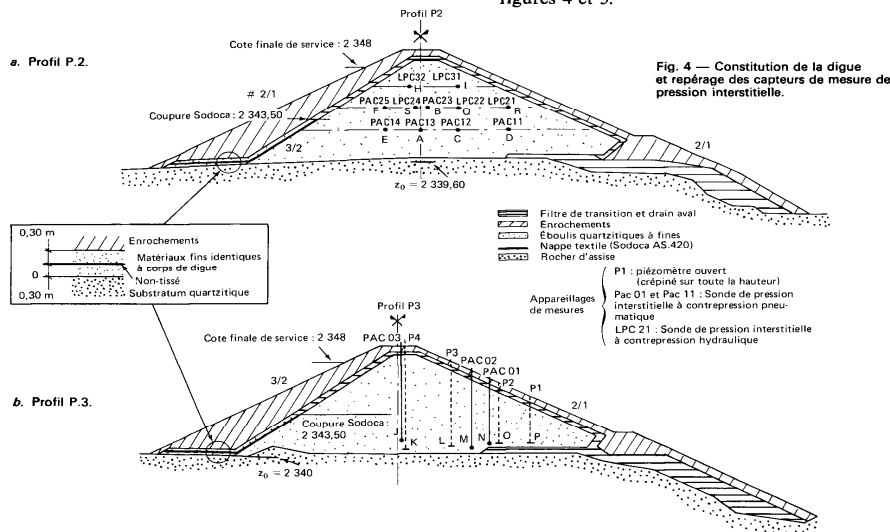
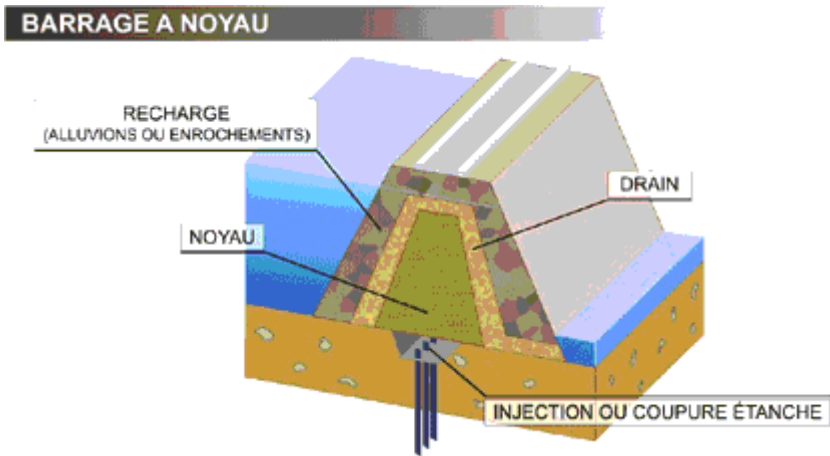
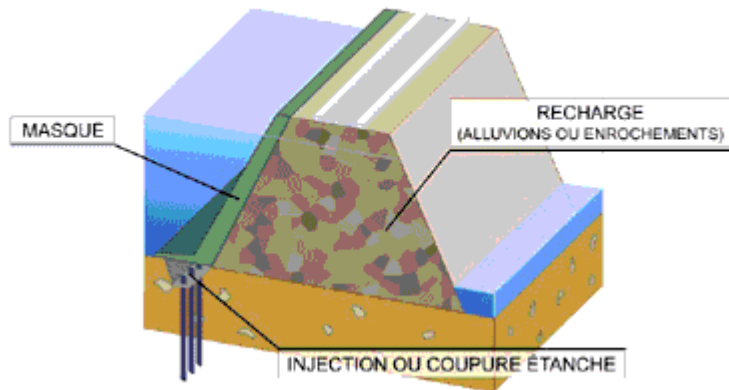


Fig. 4 — Constitution de la digue et repérage des capteurs de mesure de pression interstitielle.



3.1.3 BARRAGE A MASQUE

Il peut aussi exister des sites où aucune terre n'est disponible, mais seulement des enrochements. Ceux-ci sont alors employés pour réaliser le corps du barrage, tandis que l'étanchéité est assurée par un masque de béton, ciment ou béton bitumineux posé sur l'ouvrage lui-même, côté amont

BARRAGE A MASQUE**3.1.4 ETUDE DE DIGUE EN TERRE**

L'étude d'un projet de digue en terre nécessite la vérification de la stabilité de l'ouvrage aux principaux stades de son histoire et notamment lorsque ses conditions de service sont les plus défavorables, c'est-à-dire lorsque l'eau de la retenue atteint son niveau maximal. L'étude de stabilité correspondante comporte généralement l'étude de l'écoulement permanent à travers la digue et sa fondation et l'étude de stabilité en rupture circulaire du talus aval, cette dernière étant faite à partir des contraintes effectives et prenant en compte les pressions interstitielles obtenues à partir de l'étude d'écoulement. Initialement, la procédure suivie dans les laboratoires des Ponts et Chaussées pour l'étude de la stabilité en service était la suivante : étude de l'écoulement par analogie électrique (méthode du papier conducteur), relevé des charges hydrauliques en divers points du modèle analogique, calcul des pressions interstitielles correspondantes et introduction manuelle de celles-ci dans le programme de stabilité PETAL ou de sa version originale NIXES et TROLLS.

L'étude de stabilité d'une digue comporte deux phases : le calcul de l'écoulement dans la digue et dans sa fondation, et le calcul de sa stabilité vis-à-vis d'une rupture circulaire.

Les programmes généraux correspondants, NSAT et PETAL,

On distingue donc les trois étapes :

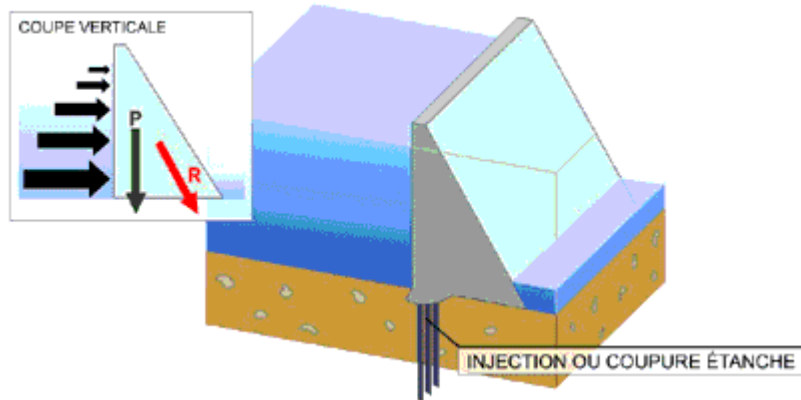
- Étape I : description géométrique, hydraulique et mécanique de la digue.
- Étape II : calcul de l'écoulement, notamment sous la forme d'un réseau de Pression interstitielle.
- Étape III : calcul de la stabilité à la rupture circulaire

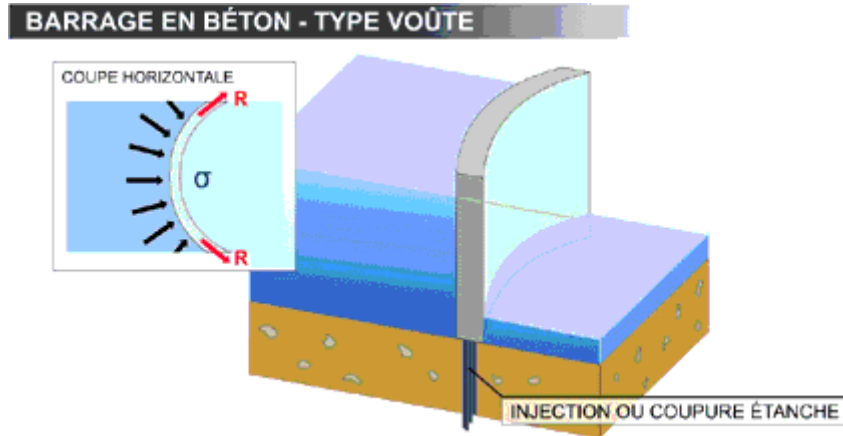
3.2 BARRAGES EN BÉTON

L'avantage du béton est notamment d'autoriser l'édification d'ouvrages plus résistants. Il en existe deux principaux



BARRAGE EN BÉTON - TYPE POIDS





- types de barrage:
 - les barrages poids,
 - les barrages en voûte.
- S'y ajoutent les barrages à contrefort et à voûtes multiples, variantes des deux Premiers.

3.2.1 BARRAGE POIDS

Comme son nom l'indique, ce type de barrage oppose son poids à l'eau pour la retenir. En fonction des propriétés de résistance du matériau, la forme triangulaire à l'aval de l'ouvrage s'est peu à peu imposée.

3.2.2 BARRAGE VOÛTE

Le barrage voûte représente l'ultime aboutissement de l'utilisation des propriétés du béton en termes de résistance. Il permet des économies de volume d'au moins 30 % par rapport à un barrage-poids.

On pourrait comparer sa forme à celle d'un pont couché sur l'un de ses côtés, et qui chargerait de l'eau au lieu de véhicules. L'effort de résistance est ainsi en partie reporté par l'arc central sur les rives, permettant de construire des ouvrages moins volumineux, à performance égale.

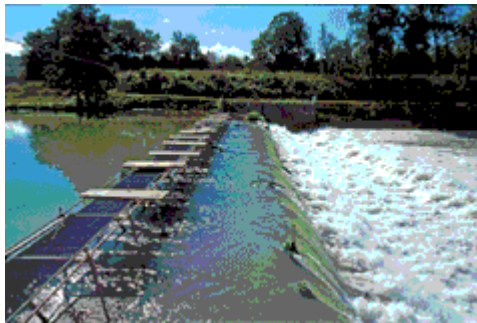
En revanche, les fondations, sur lesquelles se reporte une grande partie de l'effort, doivent posséder des caractéristiques mécaniques élevées

afin de supporter celui-ci.

3.3 BARRAGES A CONTREFORT ET A VOUTES MULTIPLES

Les autres formes de barrages voûtes sont des variantes des deux premiers types. Le barrage à contrefort est ainsi un barrage poids allégé de l'intérieur. Le barrage à voûtes multiples, quant à lui, repose sur des appuis intermédiaires, lorsqu'une trop grande portée sépare les deux rives d'un cours d'eau

3.4 BARRAGES MOBILES



Les barrages mobiles sont conçus pour rendre les rivières navigables en les canalisant.

Grâce à ces ouvrages, le niveau de la rivière va être relevé de quelques mètres pour créer des biefs successifs où pourront circuler des bateaux. Cependant, ils doivent pouvoir s'effacer en cas de crue, lorsque le débit de la rivière augmente brutalement.

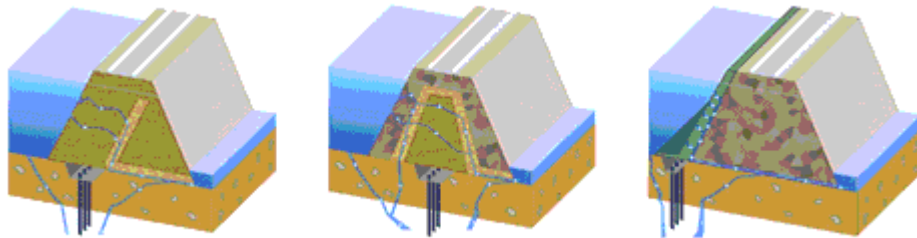
Les premiers aménagements de ce type sont apparus sur l'Yonne en 1842 : il s'agissait de barrages dits « à aiguilles », c'est-à-dire constitués d'aiguilles de bois montées sur un bâti en fer.

Par la suite, des perfectionnements ont été apportés, permettant d'abaisser les ouvrages plus efficacement lorsque les crues survenaient.

Les barrages mobiles sont équipés de vannes-volets ou vannes-secteurs, appuyées sur des piles qui reprennent leurs efforts.

3.5

L'IMPORTANCE DU DRAINAGE



L'eau possède la capacité à s'infiltrer à travers toutes les structures, d'argile comme de béton. Elle imprègne les barrages et leurs fondations, exerçant des effets insidieux qui peuvent s'avérer lourds de conséquence.

Il existe aujourd'hui deux manières complémentaires de contrecarrer son action ; soit en diminuant la quantité d'eau qui traverse structures et fondations, c'est-à-dire en renforçant l'étanchéité ; soit par le drainage, canalisant l'eau vers les parties de ces structures où ses effets seront les moins nocifs. La quantité d'eau circulant dans les barrages en terre est plus diffuse et plus importante. Pour lutter contre ses effets, on va introduire des organes de drainage, matériau perméable du type sable ou véritables tuyaux. Par ailleurs, la répartition granulométrique du matériau est conçue pour éviter la formation de « renards », infiltrations d'eau entraînant les particules du sol et minant petit à petit la structure.

Dans les barrages en béton, le parement va être renforcé afin d'augmenter son étanchéité, tout en intégrant des conduits qui vont drainer les infiltrations.

Enfin, concernant les fondations, on coupe les infiltrations grâce à des injections de ciment, tout en pratiquant si nécessaire : des puits de drainage à l'aval du barrage (ouvrages en terre) ; des trous de drainage pour réduire l'eau percolant sous les fondations et détourner le reste (ouvrages en béton).

3.6 L'ÉVACUATION DES CRUES



La gestion de l'évacuation des crues peut avoir des conséquences sur le choix du type de barrage, selon les conditions hydrologiques et topographiques du site concerné.

En effet, un barrage en terre peut plus difficilement intégrer un évacuateur de crue, notamment dans le cas des ouvrages les plus grands. Dans un tel cas, les concepteurs pourront être amenés à préférer un barrage en béton.

En outre, un barrage en terre s'avère plus sensible à la submersion en cours de travaux qu'un barrage en béton.

L'évacuation des crues comporte en effet deux aspects :

- pendant la construction du barrage ;
- une fois celui-ci achevé.

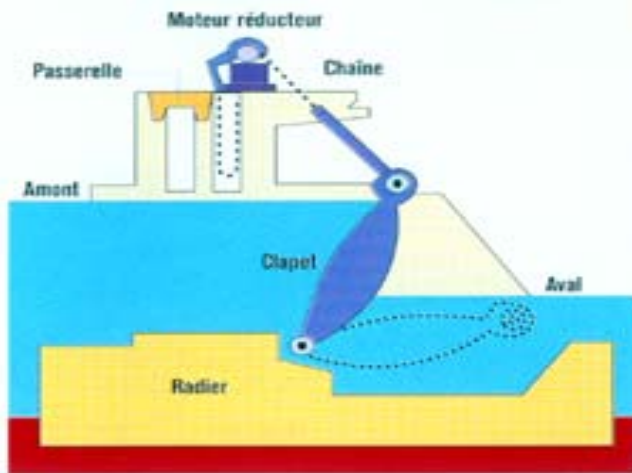
Au cours du chantier, celui-ci va être protégé contre une crue d'une fréquence donnée, au minimum dix ans - souvent plus en fonction de sa durée. Le risque sera calculé de telle façon que les conséquences économiques soient supportables et qu'il ne puisse se produire de pertes humaines.

Certains ouvrages de dérivation construits alors, notamment des tunnels, seront réutilisés ultérieurement dans le fonctionnement du barrage lui-même, par exemple comme vidange de fond définitive ou comme évacuateur de crues.

Une fois le barrage en service, il existe plusieurs solutions pour évacuer les crues. Mais la hauteur croissante des ouvrages et l'énergie à dissiper lors de celles-ci amènent généralement les concepteurs à opter pour la réponse suivante : un seuil, commandé ou non par des vannes, suivi par un coursier en saut à ski pour dissiper l'énergie, avec, éventuellement, à son extrémité un bassin de dissipation

3.7 LES BARRAGES A CLAPETS

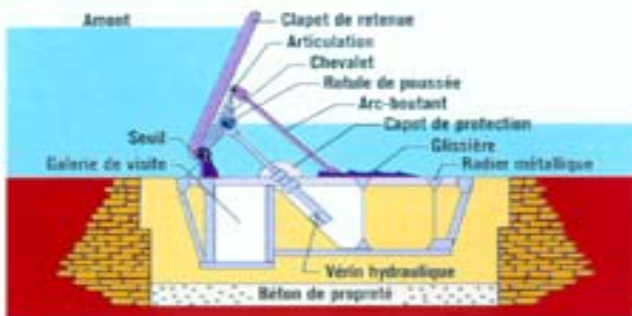
Le principe d'un barrage à clapet



Barrage à clapet. Dispositif de contrôle d'ouverture du clapet.



Le principe d'un barrage à hausses



Barrage à hausses Aubert.



Le principe d'un barrage à vanne secteur



Barrage à vanne secteur.



4 Conception de l'ouvrage

La phase de conception dure plusieurs années. Celle-ci repose avant tout sur une connaissance rigoureuse du milieu physique :

- son hydrologie (régime du cours d'eau) ;
- sa géologie (au plan régional et sur le site lui-même), ainsi que les propriétés mécaniques des terrains de fondation.

De plus, un projet est souvent modifié en cours de construction. En effet, le contact du terrain va amener à recueillir de nouvelles données, et à adapter l'ouvrage en conséquence.

Les différentes étapes d'une conception

La conception de l'ouvrage atteint différents niveaux de précision selon le stade d'avancement du projet. Cela passe principalement par :

- les études préliminaires et un avant-projet sommaire, tant que la faisabilité de l'ouvrage est à l'étude ;
- un dossier d'appel d'offre détaillé, permettant aux entrepreneurs de présenter leurs solutions pour la réalisation de l'ouvrage.

Parmi ces études, les reconnaissances sur le terrain jouent un rôle fondamental. Le chantier lui-même constitue un véritable laboratoire où maître d'œuvre et entrepreneur expérimentent des solutions aux problèmes souvent imprévus qu'ils rencontrent.

Une fois l'ouvrage mis en service, sa surveillance permettra de confirmer ou de corriger les hypothèses avancées.

4.1 MISE HORS D'EAU ET EXCAVATION

Avant la phase de construction proprement dite se situent des étapes qui vont préparer celle-ci: la mise hors d'eau du chantier, l'excavation des terrains impropres à recevoir l'ouvrage et la préparation des fondations.

La mise hors d'eau du chantier consiste à isoler tout ou partie du barrage, grâce à des ouvrages de dérivation qui seront réutilisés plus tard comme structures annexes de l'aménagement. Des digues provisoires (batardeaux) construites en amont permettent de dévier le cours d'eau dans des tunnels aux dimensions souvent considérables (plus de 10 mètres de diamètre).

Le site étant désormais au sec, il est possible d'entreprendre les travaux d'excavation destinés à asseoir les fondations du futur barrage. On enlève tous les terrains impropres à recevoir celles-ci. C'est au cours de cette phase que seront validées - ou revues - les hypothèses sur la nature des terrains appelés à recevoir ces fondations.

Certains travaux d'excavation, en particulier pour des barrages voûtes dans des sites montagneux, relèvent d'un véritable exploit technique du

fait des nombreuses contraintes qui pèsent alors : terrains très pentus, nécessité de respecter la stabilité des rives, de bien mesurer les charges d'explosifs à utiliser...

4.2 LES FONDATIONS

La préparation des fondations est une étape essentielle du chantier. Pour les barrages en terre, le principal problème est celui de l'étanchéité, particulièrement dans le cas d'alluvions : il est alors nécessaire d'améliorer cette étanchéité en procédant à des injections.

On peut également être amené à dresser, dans les fondations mêmes, un mur destiné à stopper totalement ou partiellement les infiltrations. C'est une variante des injections, appelée la technique des parois moulées.

Pour les barrages en béton le rocher doit toujours être amélioré, parce qu'il n'est jamais tout à fait imperméable. De plus, les explosifs utilisés pour enlever les rochers les plus mauvais contribuent également à le détériorer. On va donc réaliser un rideau d'injections qui aura pour but de réduire les infiltrations et les fuites sous la fondation du barrage.

Pour les barrages en terre comme pour ceux en béton, ces injections peuvent s'opérer :

soit au moment de l'ouverture des fouilles ;

soit (éventuellement en complément) à la fin de la construction de l'ouvrage, à partir d'une galerie spécialement aménagée.

Ces injections postérieures au chantier s'avèrent souvent plus efficaces, car elles bénéficient d'une compression par la structure existante.

4.3 BARRAGE EN REMBLAI

Un barrage en remblai est constitué de trois éléments fondamentaux : de la terre ou des enrochements, de l'eau et de l'énergie. Sa construction consiste à étaler des couches de matériau successives, préalablement humidifiées si nécessaire pour obtenir le compactage recherché.

Celui-ci est réalisé à l'aide de rouleaux, autrefois dits « à pieds de mouton », puis à pneus. Aujourd'hui, il s'agit le plus souvent de rouleaux lisses vibrants.

La terre utilisée est prélevée le plus près possible du site des travaux, jamais plus de quelques kilomètres en tout cas. Celle-ci est ensuite convoyée jusqu'au chantier par dumpers (camions pouvant transporter jusqu'à 100 tonnes de charge utile). L'éventuelle humidification des terres est opérée sur la zone d'emprunt, selon diverses techniques.

Le mode de compactage peut également varier selon la nature du matériau : une terre plus argileuse ou plus graveleuse ne sera pas traitée de la même manière, drains et filtres assurant la transition entre matériaux à granulométrie différente.

Les différentes épaisseurs de terre seront ensuite montées les unes sur les autres par couches successives.

4.4 BARRAGE EN BETON

Une fois les fondations creusées, le barrage est divisé en plots verticaux, aux dimensions variables selon les bétons employés. Celles-ci dépendent principalement du temps de refroidissement nécessaire au béton, bien que dans certains cas il puisse être refroidi artificiellement.

Les plots, décalés les uns par rapport aux autres, sont alors clavés, c'est-à-dire que du ciment est injecté entre eux pour transformer l'ensemble qu'ils forment en une masse monolithique.

Comme pour les barrages en terre, l'objectif va être de rechercher les matériaux le plus près possible du site du chantier. Le ciment, lui aussi, provient en général d'usines proches de l'aménagement. Dans certains pays à l'infrastructure peu développée, il peut cependant s'avérer nécessaire de l'importer par bateau sur de longues distances.

Le béton est ensuite mis en place en le serrant avec des aiguilles vibrantes, ce qui a pour propriété de le rendre liquide et d'occuper ainsi tout l'espace prévu entre les coffrages.

L'évolution des techniques a favorisé l'apparition de nouvelles techniques d'exécution pour les barrages : ainsi les barrages compactés au rouleau (BCR), qui permettent d'employer un béton à faible teneur en ciment pour une mise en place analogue à celle des ouvrages en remblai.

5 INFILTRATIONS DANS LE CORPS DE BARRAGE

Les infiltrations qui se produisent à travers le corps du barrage et ses fondations, doivent être considérées sous deux aspects :

- le premier : la perte d'eau réduit le volume emmagasiné,
- le deuxième : les pertes d'eau peuvent compromettre la stabilité de l'ouvrage sous l'influence du phénomène de renard et des pressions de l'infiltration.

Pour l'étude de stabilité du barrage, nous allons intéresser à la longévité d'un barrage, qui est liée à la rupture de ses talus amont et aval.

Nous nous essayerons de montrer le mécanisme qui conduit à la rupture de ces talus en pentes naturelles et nous étudierons les méthodes de calcul qui permettent de déduire la stabilité du talus.

Toutefois, l'étude de la stabilité peut être procédée d'une reconnaissance géotechnique très fine, qui permet souvent de mettre en évidence des facteurs qui ont une influence le coefficient de sécurité.

La perméabilité dans un barrage en terre existe toujours, même si les pertes d'eau par infiltration sont faibles et pour déterminer ces infiltrations, il est impératif d'évaluer les éléments suivants :

- la ligne de saturation ou phréatique,
- le débit de fuite de l'eau par infiltration,
- l'épaisseur du drain

1) La ligne de saturation

1-1. Détermination de l'équation de la ligne de saturation

La ligne de saturation peut être déterminée par les différentes méthodes suivantes :

Le calcul numérique

Le calcul numérique est réalisé sur l'ordinateur, il peut résoudre le problème des infiltrations par le biais des programmes mis au point, afin de déterminer la position de la ligne de saturation, le potentiel hydraulique et, le débit de fuite.

a) Le modèle électrique

L'analogie électrique est basée sur le fait que le potentiel électrique est régi par la même loi que le potentiel hydraulique.

b) Le modèle graphique

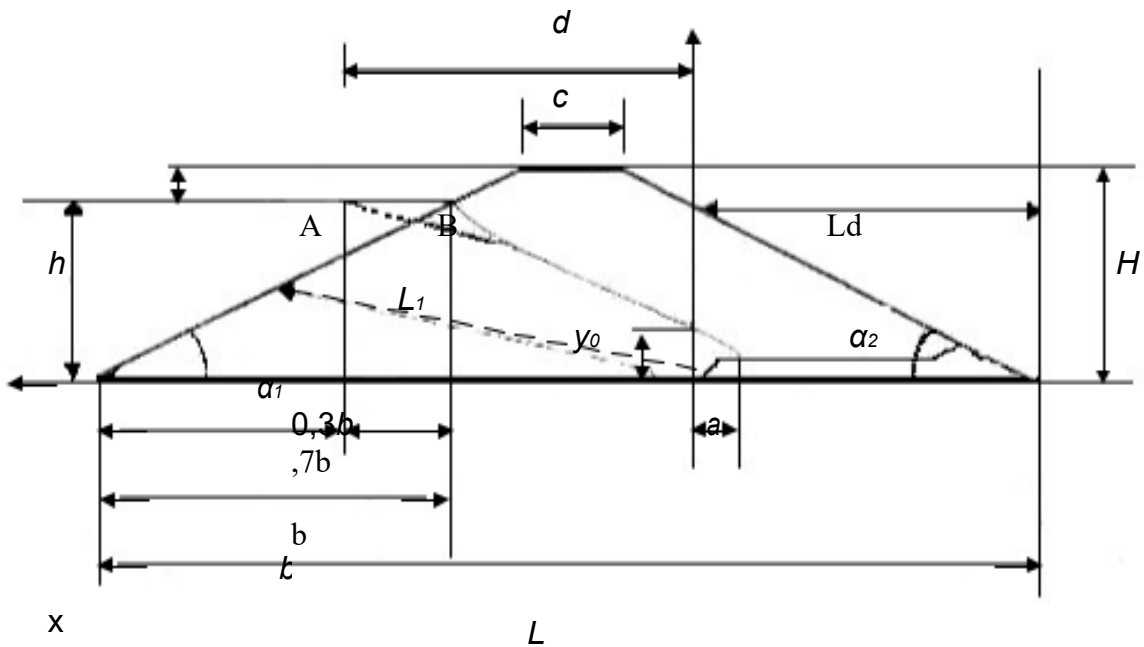
Il représente une méthode simplifiée, la plus souvent utilisée. Cette méthode donne des résultats approchés, mais en général suffisants. L'écoulement des eaux d'infiltrations dans le barrage est régi par la loi de DARCY, $V = K * i$ (K : coefficient de perméabilité en (m/s) et i : le gradient hydraulique).

Tracé de ligne de saturation

Dans le cas d'une digue homogène drainée, reposant sur une assise imperméable, KOSENY a montré que la ligne de saturation (ligne phréatique) est une parabole d'axe horizontal, dont le foyer est l'extrémité amont du drain, auquel se raccorde la ligne phréatique.

Elle a pour équation : $y^2 - y_0^2 - 2xy_0$

v



Avec : $Y_0 = \sqrt{\frac{h^2 + d}{2}} - d$

A Ligne phréatique B Parabole KOSENY

En appliquant la loi de DARCY, on évalue approximativement le débit de fuite à travers le corps du barrage. Pour un mètre linéaire du barrage, la loi de DARCY s'écrit comme suit :

$$q = K * S * i = K * S * \frac{H}{L}$$

Avec

- q : débit par mètre linéaire du barrage ;
 S : longueur mouillée du parement amont du barrage,
 K : coefficient de perméabilité de DARCY ;
 H : la hauteur d'eau à l'amont du barrage ;

1- 2. Dispositifs de protection

1-2-1. Le drain

C'est un organe qui est destiné à évacuer les eaux infiltrées à travers le massif. Il est constitué soit de gravier perméable, de tuyau en béton poreux ou en plastique perforé, ces derniers sont entourés d'une couche de gravier. Ils existent plusieurs types de drains à savoir le drain horizontal, le drain vertical et, le drain tapis filtrant. Les systèmes de drainage sont constitués des matériaux ayant une forte perméabilité ($K = 10^{-4}$ m/s). De ce fait la circulation des eaux d'entraîner des particules adéquates. Pour maîtriser ces phénomènes on renforce le drain par un filtre.

6 CONDITION DE FILTRES

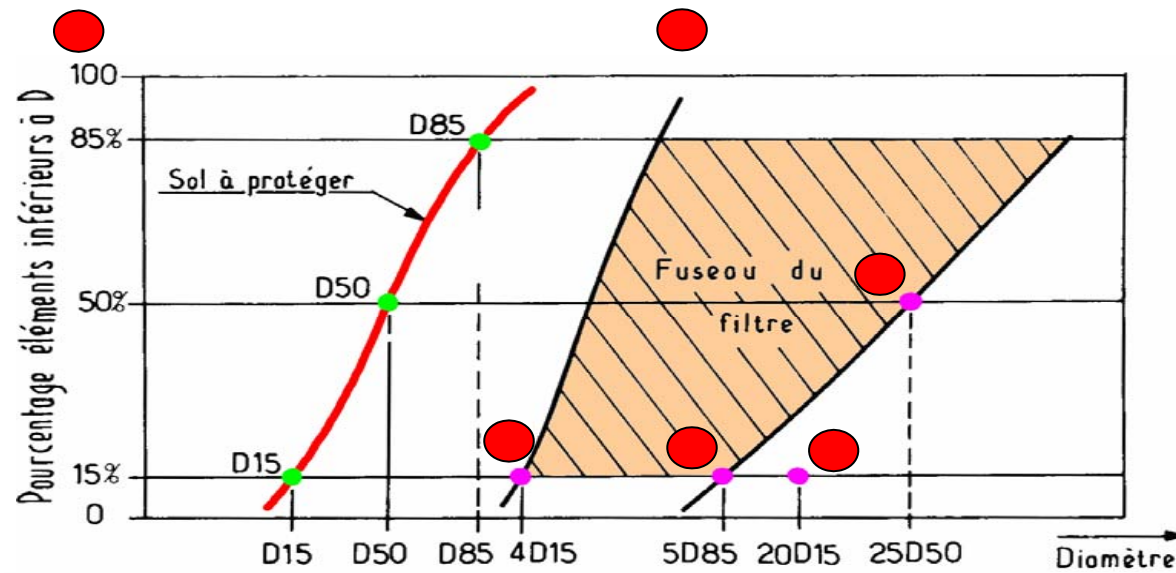
Le filtre est destiné à retenir les fines particules du massif entraînés par les filets d'eau. Pour éviter le colmatage et la dégradation du filtre, il est conseillé d'utiliser une couche de filtre ayant les conditions suivantes :

D15 filtre > 4 D15 sol à protéger

D15 filtre < 20 D15 sol à protéger

D15 filtre < 5 D85 Sol à protéger

D50 filtre < 50 D50 sol à protéger



Connaissant la courbe granulométrique du sol à protéger, ces règles permettent de définir un fuseau dans lequel doit s'inscrire la granulométrie du filtre. Si l'écart de granulométrie entre les deux matériaux est important, il est nécessaire d'interposer plusieurs couches de granulométrie croissante vers le drain en respectant entre elles les règles des filtres.

7 STABILITE DE PENTE

7.1 GENERALITES

D'une façon très générale et très schématique, on peut envisager le problème sous deux points de vue :

— Le massif de sol est le siège d'un certain système de contraintes qu'il suffit de déterminer pour savoir en quels points la résistance au cisaillement du sol est atteinte et pour en déduire l'état de sécurité qui règne. Ce raisonnement a retenu l'attention de nombreux auteurs. Signalons que Jurgenson (1931) a examiné ce problème, en phase élastique, et que la théorie de la plasticité et les équations de Kötter ont été largement appliquées : Sokolovski par exemple : Mandel (1948) a distingué les zones du massif siège d'un équilibre surabondant ou de l'équilibre limite. La difficulté principale reste dans la détermination des relations « contrainte-déformation » ; en outre, la définition d'un coefficient de sécurité n'est pas simple.

— L'observation de très nombreux glissements qui ont affecté les ouvrages du Génie Civil ont donné des idées sur la forme des surfaces de rupture : le massif de sol en mouvement est connu et il suffit de lui appliquer les équations générales de la mécanique ; l'obstacle de la détermination des contraintes le long de cette surface de glissement subsiste : moyennant quelques hypothèses :

Anciennement, Coulomb (1776) a appliqué ces idées à une ligne de rupture droite, ainsi que Resal (1910), Caquot (1934).

Le cercle a fait son apparition avec Hultin et Petterson (1916): c'est l'origine de la « méthode suédoise », poursuivie par Fellenius (1927) ; l'utilisation du cercle a été très longuement étudiée : entre autres y ont apporté leur contribution, Taylor (1936, 1937), Caquot (1954), Bishop (1954-1960), Biarez (1962-1965).

D'autres surfaces géométriquement bien définies ont été proposées et appliquées : par exemple la cycloïde (Frontard, 1948), la spirale logarithmique (Rendulic).

Toutefois, l'étude des grands glissements a révélé que des surfaces de rupture plus complexes se développaient dans le sol, on doit toutefois retenir que, parmi toutes les

méthodes de calcul à la rupture, c'est-à-dire celles qui ont été citées ci-dessus et d'autres qui ne l'ont pas été (et de nombreuses variantes), la plus largement utilisée a été celle du cercle de glissement, principalement à cause de la simplicité de sa forme géométrique.

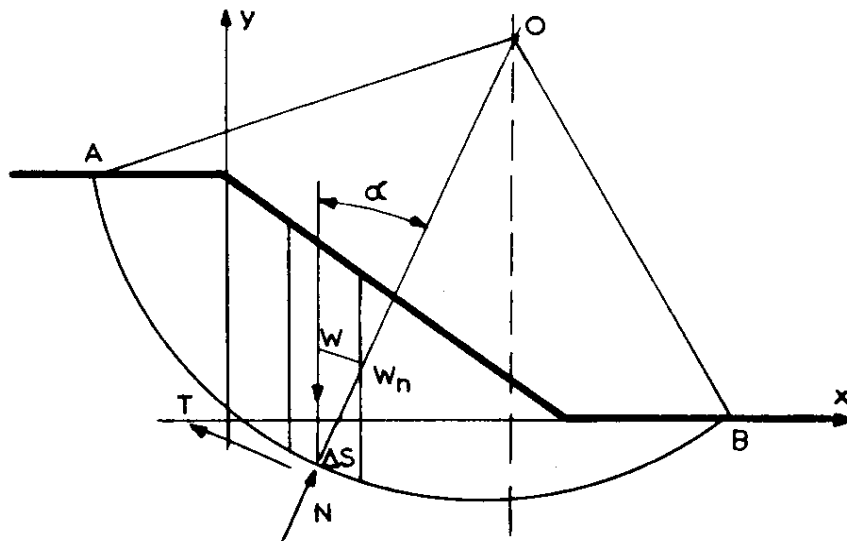
Parmi ces méthodes l'une d'entre elles, celle « des tranches », au prix d'une approximation raisonnable altérant peu la valeur du coefficient de sécurité, permet de tenir compte de l'hétérogénéité des sols et des répartitions variées des pressions interstitielles ; c'est celle-ci qui a été retenue et utilisée au Groupe des Fondations.

7.2 LA METHODE DES TRANCHES

Les développements en ont été assurés par l'Ecole suédoise, puis par l'Ecole britannique.

La méthode consiste essentiellement à découper le talus en tranches verticales et à étudier l'équilibre de ces tranches ; chaque cercle retenu comme surface de glissement potentiel est ainsi étudié : celui qui fournit la plus faible valeur du coefficient de sécurité représente la solution du problème (fig. 1).

Fig. 1



7.3 . HYPOTHESES GENERALES

La rupture se produit d'un coup sur la surface unique de glissement ; à cet égard, on note que si le massif en mouvement et le massif non

sollicité sont tous les deux considérés comme rigides, le cercle satisfait à la condition cinématique de possibilité du mouvement.

La résistance au cisaillement du sol est entièrement mobilisée sur toute la surface de rupture.

b) Acceptons comme première définition du coefficient de sécurité le rapport du moment des forces résistantes au moment des forces motrices, les moments étant pris par rapport au centre du cercle. Si on raisonne en contraintes totales, les forces motrices sont uniquement constituées par le poids W des tranches, les forces résistantes comprennent la résistance au cisaillement T ; les réactions normales N ont un moment nul par rapport à O .

$$\text{Alors : } F = \frac{M_R}{M_M}$$

$$\text{avec : } M_R = \sum M^t / O \quad T$$

$$\text{et : } M_M = \sum M^t / O \quad W$$

$$\begin{aligned} M_R &= \sum T \cdot R = R \sum T \\ &= R \sum (c \cdot \Delta s + N \operatorname{tg} \varphi) \end{aligned}$$

où c est la cohésion et $\operatorname{tg}(\varphi)$ l'angle de frottement interne.

$$\begin{aligned} M_M &= \sum W \cdot R \cdot \sin \alpha = R \sum W \sin \alpha \\ &= R \sum W_n \end{aligned}$$

si on admet que N est précisément la réaction normale directement opposée à W_n ,

$$F = \frac{\sum (C \Delta s + W_n \operatorname{tg} \varphi)}{\sum W_n}$$

si le sol est homogène,

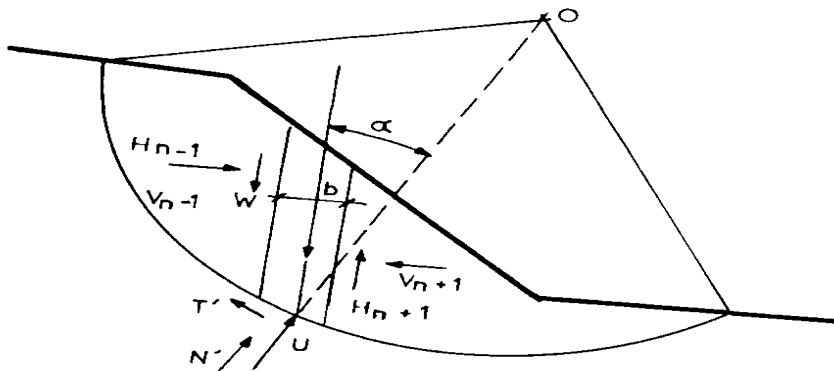
$$F = \frac{C \cdot \widehat{AB} + \operatorname{tg} \varphi \sum W_n}{\sum W_n}$$

La résolution de cette relation s'obtient assez rapidement sous forme graphique.

On observera que ce mode de résolution n'a pas fait intervenir les forces latérales de part et d'autre des tranches.

c) Examinons le problème sous forme analytique, en tenant compte des contraintes effectives (fig. 2).

Fig. 2



La tranche n a un poids W . Elle subit de la part de la tranche $n-1$ une force \vec{H}_{n-1} horizontale et une force \vec{V}_{n-1} verticale ; de même, la tranche $(n+1)$ transmet \vec{H}_{n+1} et \vec{V}_{n+1} . Par commodité, on conviendra que ces forces comprennent les forces intergranulaires et les forces hydrauliques.

La réaction extérieure au massif comprend :

- la force hydraulique normale \vec{U} $\left(U = \frac{ub}{\cos \alpha} \right)$
où $u =$ pression interstitielle)
- la force intergranulaire normale N' $\left(N' = \frac{\sigma' b}{\cos \alpha} \right)$
- la force intergranulaire tangentielle T' $\left(T' = \frac{\tau b}{\cos \alpha} \right)$

La question se pose de savoir quelle valeur de la résistance au cisaillement τ , fraction de la résistance au cisaillement maximale τ_{\max} , doit être retenue.

On définira le coefficient de sécurité comme rapport de ces deux résistances au cisaillement :

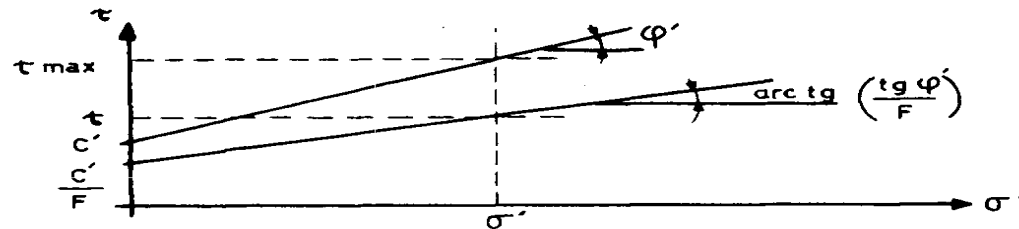
$$F = \frac{\tau_{\max}}{\tau}$$

En un point, soient c' et $\text{tg } \varphi'$ les paramètres de la résistance au cisaillement :

$$\tau_{\text{max}} = c' + \sigma' \text{tg } \varphi'$$

σ' étant la contrainte normale effective (fig. 3).

Fig. 3



Cette définition du coefficient de sécurité revient à admettre que τ suit la loi de Coulomb d'un matériau dont les paramètres de cisaillement sont :

$$\frac{c'}{F} \text{ et } \frac{\text{tg } \varphi'}{F}$$

Alors :

$$\tau = \frac{c'}{F} + \sigma' \frac{\text{tg } \varphi'}{F}$$

Le polygone des forces relatif à l'équilibre de la tranche est le suivant (fig. 4) :

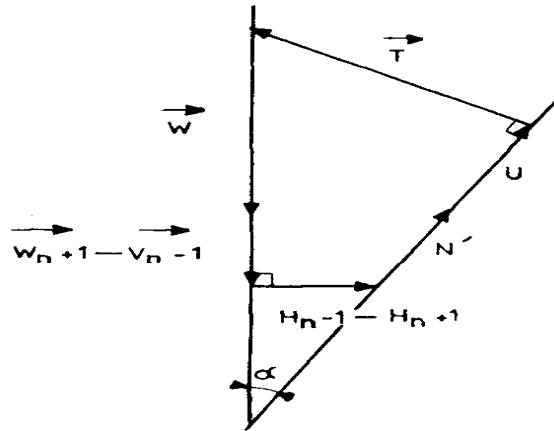


Fig. 4

On notera que les forces latérales interviennent par les différences.

Le problème se résout en considérant les équations de projection relatives à une tranche et l'équation des moments de l'ensemble du massif.

L'équation de projection sur la normale au cercle donne :

$$U + N' - [W + (V_{n-1} - V_{n+1})] \cos \alpha + (H_{n-1} - H_{n+1}) \sin \alpha = 0 \quad (1)$$

L'équation de projection sur la tangente au cercle fournit :

$$\frac{1}{F} (c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi') \frac{b}{\cos \alpha} - [W + (V_{n-1} - V_{n+1})] \sin \alpha - (H_{n-1} - H_{n+1}) \cos \alpha = 0 \quad (2)$$

L'équation de moments par rapport au centre du cercle, pour l'ensemble du massif donne :

$$F = \frac{\sum (c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi') b / \cos \alpha}{\sum W \sin \alpha} \quad (3)$$

Ces trois relations fournissent l'expression suivante du coefficient de sécurité :

$$F = \frac{\sum \{c'b + [W + (V_{n-1} - V_{n+1}) - ub] \operatorname{tg} \varphi'\} \frac{1}{M(\alpha)}}{\sum W \sin \alpha}$$

avec :

$$M(\alpha) = \cos \alpha \left(1 + \operatorname{tg} \alpha \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{F} \right)$$

La détermination exacte de F nécessiterait donc une suite d'évaluations et de rajustements des fonctions ($V_{n-1} - V_{n+1}$).

- Si on admet que $V_{n-1} - V_{n+1} = 0$ (Bishop, auteur de la méthode, indique que l'erreur serait alors inférieure à 1 %), on obtient :

$$F = \frac{\sum \{c'b + [W - ub] \operatorname{tg} \varphi'\} \frac{1}{\cos \alpha \left(1 + \operatorname{tg} \alpha \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{F}\right)}}{\sum W \sin \alpha}$$

(Formule de Bishop)

- Si on avait admis, dans les équations (1), (2) et (3) que :

$$H_{n-1} - H_{n+1} = 0$$

$$V_{n-1} - V_{n+1} = 0$$

(hypothèses de la méthode suédoise), on aurait obtenu l'expression suivante de F :

$$F = \frac{\sum \{ c'b + (W \cos^2 \alpha - ub) \operatorname{tg} \varphi' \} \frac{1}{\cos \alpha}}{\sum W \sin \alpha}$$

d) En conclusion :

- Si on néglige les actions entre tranches, le coefficient de sécurité F s'exprime explicitement par :

$$F = \frac{\sum \{ c'b + (W \cos^2 \alpha - ub) \operatorname{tg} \varphi' \} \frac{1}{\cos \alpha}}{\sum W \sin \alpha}$$

(Méthode de Fellenius)

- Si on ne néglige que l'influence des efforts inter-tranches verticaux, il vient :

$$F = \frac{\sum \{ c'b + (W - ub) \operatorname{tg} \varphi' \} \frac{1}{\cos \alpha \left(1 + \operatorname{tg} \alpha \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{F} \right)}}{\sum W \sin \alpha}$$

(Méthode de Bishop)

Cette expression ne fournit pas directement la valeur de F : il est nécessaire de faire des itérations à partir d'une valeur initiale de F ; cette valeur peut être obtenue assez simplement par la méthode de Fellenius.