

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000305738

RAPRACHS - RESERVOIRS

x
474

CONSTRUCTION
DES
BARRAGES - RÉSERVOIRS

CONFÉRENCE

FAITE A GRENOBLE LE 8 SEPTEMBRE 1902

PAR

M. A. DUMAS

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

F. Nr. 25602



Gj. 44

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

III 33092

Akc. Nr. 2151/49

CONSTRUCTION DES BARRAGES-RÉSERVOIRS

CONFÉRENCE

FAITE A GRENOBLE LE 8 SEPTEMBRE 1902

PAR

M. A. DUMAS

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

Il existe deux moyens de réaliser les chutes d'eau, c'est-à-dire de réunir en un même point, ou tout au moins sur une distance relativement très courte, la différence de niveau qui existe entre deux points déterminés d'un cours d'eau. On peut, ou bien établir sur le cours d'eau un barrage de retenue de la même hauteur que la chute à utiliser, ou bien construire un canal de dérivation continué par une conduite forcée à l'extrémité de laquelle se trouve l'usine contenant les récepteurs hydrauliques.

Chacun de ces deux systèmes présente ses avantages et ses inconvénients, mais, dans la plupart des cas, le choix du système à employer dépend de circonstances locales, de sorte qu'il est impossible de fixer des règles permettant de dire, *a priori*, quel est celui des deux qu'il est préférable d'employer.

Nous ne nous occuperons ici que des barrages de retenue, les barrages de dérivation et les dérivations elles-mêmes devant être discutés par d'autres auteurs.

Abstraction faite des difficultés d'exécution, l'emploi des barrages présente de très sérieux avantages sur celui des canaux de dérivation. En effet, non seulement le barrage crée la chute, tout aussi bien que la dérivation, mais encore il détermine un emmagasinement de l'eau, emmagasinement qui peut jouer le rôle d'une réserve à laquelle il est possible de faire appel dans les moments où l'usine doit fournir une puissance supérieure à celle correspondant au débit normal du cours d'eau utilisé.

Cette possibilité d'emprunter momentanément de l'eau à un réservoir pour accroître, à certaines heures de la journée, le débit du cours d'eau, c'est-à-dire la puissance de l'usine, est extrêmement importante dans certaines industries,

en particulier dans celles de l'éclairage et de la traction électrique. En effet, tandis que le débit, c'est-à-dire le travail fourni par le cours d'eau, est invariablement le même pendant les vingt-quatre heures de la journée, la puissance demandée par ces industries est extrêmement variable suivant le moment de la journée. Presque complètement nulle pendant certaines heures de la nuit, cette puissance croît brusquement au moment où l'on met les moteurs en marche ; elle varie encore dans tout le courant de la journée pour atteindre son maximum au moment où, tous les moteurs étant encore en marche, on effectue l'allumage des lampes électriques. La puissance demandée à l'usine pendant plusieurs heures, par exemple entre 5 heures et 10 heures du soir, peut être cinq fois, dix fois, vingt fois même supérieure à celle qui suffit aux besoins entre minuit et 5 heures du matin.

Pour que la puissance du cours d'eau soit bien utilisée, il est donc nécessaire que l'on puisse faire varier son écoulement à peu près dans les proportions où varie l'utilisation de la force motrice qu'il produit. Or ce résultat ne peut être atteint qu'avec un réservoir suffisamment grand pour emmagasiner l'excédent de l'eau qui est nécessaire pour alimenter l'usine aux heures de faible consommation et capable, ensuite, de restituer cette eau, sous forme d'appoint, au débit du cours d'eau, pendant les heures où la consommation est, au contraire, plus élevée que la moyenne.

Tout barrage d'une certaine hauteur, qui crée, par suite, un réservoir d'une assez grande capacité, permet donc de transformer la puissance constante d'un cours d'eau en une puissance aussi variable que l'on veut, suivant les heures de la journée, c'est-à-dire suivant les moments où elle peut trouver son emploi.

Si le barrage a une assez grande hauteur, c'est-à-dire si le réservoir a une assez grande capacité, ce réservoir, tout en continuant à jouer le rôle dont nous venons de parler, peut, en outre, jouer un rôle inverse.

En effet, si le débit d'un cours d'eau peut être considéré à peu près comme constant pendant une journée, il est au contraire très variable suivant les différentes époques de l'année. Quelquefois même, comme cela a lieu pour ceux qui sont alimentés par les glaciers, c'est pendant l'hiver, c'est-à-dire au moment où l'on a besoin de la plus grande puissance pour l'éclairage électrique, que le cours d'eau a son débit minimum. Cette période d'étiage est d'ailleurs d'assez courte durée, généralement trois semaines ou un mois, de sorte qu'il peut suffire d'un volume emmagasiné relativement assez faible pour permettre de rétablir, par des emprunts à cette réserve, le débit normal du cours d'eau.

En résumé, les réservoirs créés par les barrages permettent donc :

1° De rendre très variable, pendant les vingt-quatre heures de la journée, le débit et, par suite, la puissance d'un cours d'eau ;

2° De rendre, au contraire, à peu près constant le débit journalier utilisable du cours d'eau, quel que soit le moment de l'année, et, de plus, en portant ce débit journalier moyen à un chiffre sensiblement supérieur à celui qui correspond à l'étiage.

Les réservoirs remédient donc, tout au moins dans une certaine mesure, à un grave défaut que présente la *houille blanche* et qui constitue pour elle une infériorité marquée vis-à-vis de la *houille noire*. En effet, si les dépôts de cette dernière sont difficiles à atteindre, du moins ils constituent une réserve dans laquelle on peut ne puiser qu'au fur et à mesure des besoins, tandis qu'au contraire les dépôts de houille blanche fondent suivant les caprices des saisons, tantôt trop vite, et alors une grande partie est inutilisée, tantôt trop lentement, et alors il y a pénurie.

Les réservoirs créés par les barrages peuvent d'ailleurs servir à de très nombreux usages ; non seulement ils permettent d'accumuler des réserves pour les irrigations ou l'alimentation des villes, mais ils peuvent supprimer, ou tout au moins atténuer, les dégâts causés par les grandes eaux en emmagasinant momentanément une partie du débit maximum. Nous n'avons pas à examiner ici les avantages considérables que leur établissement pourrait rendre, à ce point de vue, sur les cours d'eau à régime torrentiel, et nous devons nous borner surtout à envisager leur rôle dans la création des chutes d'eau.

En dehors des avantages déjà signalés, que présentent les barrages dans l'aménagement de ces chutes, il en est un très important dont nous devons dire quelques mots : c'est l'effet de décantation que produisent sur les eaux les réservoirs créés par eux. La plupart des cours d'eau à forte pente tiennent en suspension des matières plus ou moins sableuses, dont le passage dans les turbines a pour effet d'user rapidement certains organes de ces appareils. Ce fait est tellement général, que presque toutes les chutes d'eau aménagées par canaux de dérivation comportent des chambres de décantation pour permettre le dépôt de ces matières. Malheureusement ces sables sont tellement tenus que l'eau doit perdre presque complètement sa vitesse pour qu'ils se déposent, et il n'est, le plus souvent, pas possible d'avoir des chambres de décantation de dimensions suffisantes pour que cet effet soit obtenu. Au contraire, les grands réservoirs créés par les barrages constituent d'immenses chambres de décantation dans lesquelles la vitesse de l'eau s'annule presque complètement et qui produisent, à ce point de vue, une action très efficace.

Le plus grand reproche que l'on a pu faire aux grands barrages, c'est de constituer des ouvrages d'art dont la construction présente quelquefois de réelles difficultés et demande, dans tous les cas, les plus grands soins. Quelques catastrophes retentissantes ont même jeté sur eux un certain discrédit et créé à leur égard des appréhensions. Nous espérons montrer, au cours de cette étude, que ces appréhensions ne sont nullement justifiées et que ces ouvrages peuvent remplir toutes les conditions de sécurité désirables s'ils sont construits avec le soin qu'ils demandent.

Grâce aux nombreux usages en vue desquels ils peuvent être créés, il en existe du reste de fort anciens et qui n'ont cependant jamais donné le moindre sujet d'inquiétude.

Quel que soit le but qu'ils doivent remplir, les barrages sont d'ailleurs

construits de la même manière; les procédés employés dépendent des circonstances locales, des matériaux dont on dispose sur place et, quelquefois même, des caprices des ingénieurs, beaucoup plus que du rôle que doivent jouer ces ouvrages.

Nous nous proposons d'examiner ici leurs divers modes de construction, sans nous préoccuper de la destination du réservoir qu'ils permettent de créer.

Divers modes de construction des barrages.

Suivant les matériaux dont ils sont constitués, les barrages peuvent se diviser en trois catégories :

1° Les *barrages en terre*, constitués simplement par un remblai en terre convenablement choisie et préparée ;

2° Les *barrages mixtes*, composés de différentes manières et avec des matériaux très divers : terre, maçonnerie, métal, bois, rocaille, etc. ;

3° Les *barrages en maçonnerie*, dans la construction desquels il n'entre que de la pierre et du mortier.

Nous ne nous occuperons pas ici des barrages mobiles établis sur les rivières pour le service de la navigation et qui ne créent, d'ailleurs, que des retenues de faible hauteur.

Barrages en terre.

C'est évidemment avec de la terre, ou du moins avec les matériaux arrachés aux berges mêmes de la rivière à barrer, que l'on a construit les premiers barrages. Il existe encore en certains pays, surtout dans l'Inde, des ouvrages de ce genre dont la construction remonte à la plus haute antiquité.

Si ces ouvrages ont pu se conserver ainsi dans un état qui leur assigne une durée indéfinie, c'est qu'ils avaient été construits avec des soins particuliers et non pas simplement en entassant des matériaux quelconques. Pour qu'un barrage en terre soit capable de résister aux diverses causes de destruction que présente pour lui l'eau qu'il doit retenir, il faut qu'il constitue un remblai parfaitement étanche, c'est-à-dire ne laissant pas filtrer l'eau à travers sa masse. Tout barrage qui ne remplirait pas cette condition et qui se laisserait assez pénétrer par l'eau pour livrer passage à des filtrations appréciables, serait rapidement détruit par l'effet même de ces filtrations qui iraient toujours en augmentant d'importance. Le moins qui puisse arriver, alors, c'est que, au bout d'un certain temps, elles rendent le barrage inutile en le transformant en écumoire, mais il est à craindre qu'avant cela, le barrage, miné par ces infiltrations, ne cède brusquement à la poussée de l'eau qu'il retient encore et ne provoque ainsi un désastre en laissant échapper en un seul flot un énorme volume d'eau.

On est assez porté à croire qu'au contraire, avec le temps, les digues en

terre imparfaitement étanches devraient se colmater par les dépôts limoneux que contiennent les eaux au moment des crues. L'expérience montre que, sauf de très rares exceptions, il n'en est pas ainsi et qu'au contraire les filtrations vont, le plus souvent, en augmentant, malgré tous les artifices qu'on peut employer pour provoquer les colmatages.

Nous rappellerons à ce propos la rupture d'une digue naturelle après vingt-huit ans d'existence, alors qu'elle aurait pu sembler consolidée à tout jamais. C'est la digue formée accidentellement dans la vallée de la Romanche, à la fin du douzième siècle, dans des conditions d'ailleurs assez peu connues. Cette digue, qui constituait, paraît-il, une retenue de vingt mètres de hauteur, formait un lac qui reçut le nom de lac Saint-Laurent, inondant toute la vallée du Bourg d'Oisans, visitée par le Congrès. Elle s'effondra brusquement, après vingt-huit ans d'existence, ce qui semble bien prouver que les dépôts charriés ou tenus en suspension par la Romanche avaient été incapables de lui donner la solidité nécessaire pour assurer sa durée.

Composition du remblai. — Un remblai convenable pour former une digue doit donc être constitué à l'aide de matériaux choisis et convenablement mis en place. D'une part, il faut écarter les terres trop argileuses, à cause des variations de volume qu'éprouve l'argile suivant la plus ou moins grande quantité d'eau qu'elle contient, variations qui produisent des dislocations et des éboulements ; d'autre part, il faut proscrire les terres trop sablonneuses comme trop sujettes aux infiltrations. Le massif de la digue doit être formé avec un bon corroi, c'est-à-dire avec une substance homogène et imperméable. L'idéal est d'avoir un terrain argilo-sableux ne contenant que juste ce qu'il faut d'argile pour relier entre eux les grains de sable, de façon à constituer une espèce de mortier dans lequel la chaux serait remplacée par l'argile.

Un pareil terrain ne se trouve naturellement pas toujours à proximité du lieu d'emploi, et, dans certains cas, il devient nécessaire de composer un corroi artificiel avec les terres dont on dispose. Dans d'autres cas, on peut améliorer la nature déjà satisfaisante du corroi en le mélangeant avec une petite quantité de chaux hydraulique, soit à l'état de poudre, soit sous forme de lait de chaux, suivant que le terrain est plus ou moins humide.

Toutes les précautions qui précèdent ne suffisent d'ailleurs pas, et il faut, en outre, pendant la mise en place des matériaux, opérer un battage ou un pilonnage très soignés et en procédant par couches de peu d'épaisseur.

Ce mode de construction des digues par un remblai aussi homogène que possible est celui employé en France. En Angleterre, où il en existe un assez grand nombre, dont quelques-unes atteignent 30 mètres de hauteur, on procède le plus souvent autrement. Le corps de la digue est constitué par un énorme remblai en matériaux tout-venants comprenant en son milieu une sorte de mur en argile corroyée. Au lieu d'une digue homogène dont la masse tout entière contribue aussi bien à l'étanchéité qu'à la résistance, on a, au contraire, un ouvrage dans lequel l'étanchéité est fournie par un corroi spécial.

Formes et dimensions. — La forme donnée aux barrages en terre, c'est-à-dire à leur profil transversal, est extrêmement variable suivant les circonstances locales, les matériaux dont on dispose et les soins apportés dans leur mise en œuvre.

A cause même de la nature des matériaux qui les constituent, ces ouvrages ne se prêtent pas à un calcul méthodique, et leur épaisseur n'est déterminée que par des règles empiriques plus ou moins justifiées. Il en résulte que leur profil est extrêmement variable, aussi bien pour le talus d'amont que pour le talus d'aval. Voici cependant, d'après M. Guillemain, ancien professeur à l'École des Ponts et Chaussées, le profil qui, en France du moins, paraît réunir aujourd'hui le plus de suffrages :

Du côté amont, une inclinaison générale de $1\frac{1}{2}$ de base pour 1 de hauteur, dessinée soit par un plan incliné, soit par les gradins en maçonnerie qui constituent le revêtement ;

Du côté aval, une succession de surfaces inclinées raccordées par des banquettes horizontales et dont l'ensemble dessine, en quelque sorte, une courbe ayant sa convexité tournée vers le remblai et analogue au talus que prennent les terres abandonnées à elles-mêmes.

Le talus d'amont est sujet à être dégradé, soit par les projections d'eau qui le pénètrent et tendent à l'affouiller, soit par le choc des glaçons ou autres masses pesantes qui tendent à le renverser. Tant que la profondeur est peu considérable, on peut, en général, se borner à revêtir ce talus par de simples perrés ordinaires, de 0^m,50 à 0^m,80 d'épaisseur, qui constituent une sorte de tapis perméable détruisant la force affouillante du clapotis. Mais un pareil revêtement, solidaire dans toute l'étendue de la digue, est difficile à réparer et, lorsque la profondeur augmente, il devient convenable de fractionner l'inclinaison générale en gradins d'environ 2 mètres de hauteur, de façon que les avaries se trouvent localisées. Enfin, lorsque la profondeur devient importante, et que le réservoir est exposé à des vents violents qui poussent à la digue, le parement est exposé à des chocs redoutables auxquels on ne peut résister qu'avec l'aide de la maçonnerie.

Quant au talus d'aval, il ne demande pas, à beaucoup près, les mêmes précautions. On peut se borner à le gazonner, mais il est bon, toutefois, de le drainer jusqu'à une certaine profondeur, afin d'éviter tout ramollissement du corroi.

Avantages. — Parmi les avantages que présentent les barrages en terre, il faut citer en première ligne la possibilité de pouvoir être établis sur un sol médiocrement résistant, à condition toutefois qu'il soit imperméable. Tandis que le sol de fondation des barrages en maçonnerie, outre cette condition, doit être très résistant et même incompressible, les barrages en terre peuvent, au contraire, être établis sur un sol peu résistant, par suite de leur très grande surface d'appui. De plus, si, malgré cette grande surface, la pression qu'ils exercent sur le sol naturel est trop grande pour que ce dernier puisse les sup-

porter sans s'affaisser un peu, c'est-à-dire si ce sol est compressible, il n'en résulte pas de graves inconvénients, le remblai en terre pouvant supporter ces faibles mouvements sans qu'il s'y manifeste des dislocations qui mettraient, au contraire, en péril, un barrage en maçonnerie.

Cette faculté que possèdent les digues en terre, de pouvoir être établies sur un sol impropre à supporter un barrage en maçonnerie, est leur raison d'être dans beaucoup de cas, et elles peuvent présenter alors une sérieuse économie sur ces derniers qui, pour être admissibles, exigeraient des fondations très profondes et très coûteuses. Il peut même se présenter des terrains absolument inaptes à supporter un barrage en maçonnerie, quelle que soit la profondeur de fondation qu'on voudrait bien lui donner, tandis qu'ils seraient au contraire parfaitement suffisants pour recevoir des digues en terre.

Nous donnons ci-après, à titre d'exemple, les profils de quelques-unes de ces digues choisies parmi les plus importantes et les plus caractéristiques.

Digue de Montaubry. — Cette digue (*fig. 1*) a été construite en 1860 pour créer un réservoir destiné à l'alimentation du canal du Centre. Elle détermine une retenue de 15^m,20 de hauteur. Le côté en contact avec l'eau est entièrement recouvert par un revêtement en maçonnerie à gradins.

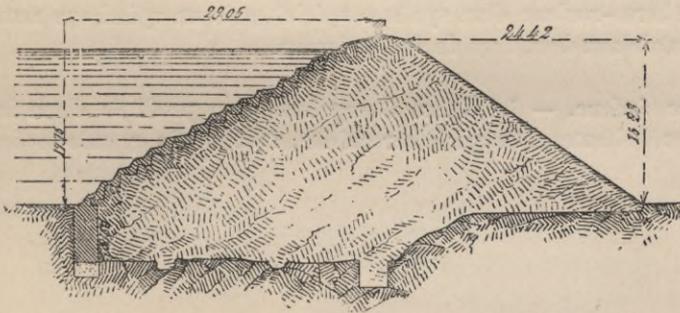


Fig. 1. — Digue de Montaubry (canal du Centre).

Les terres composant ce remblai étaient de nature à former un excellent corroi, car elles contenaient environ deux tiers de sable pour un tiers d'argile. Leur corroyage a été fait en partie avec des battes à main, mais surtout à l'aide de rouleaux traînés par des chevaux. Le mètre cube de corroi est revenu à environ 1 franc à la batte à main et à 0^{fr},40 au rouleau.

Digue de la Liez. — Cette digue (*fig. 2*) forme un réservoir servant à l'alimentation du canal de la Marne à la Saône. Quoique un peu moins haute que la précédente, son profil présente un empattement beaucoup plus grand. Elle a été formée avec un mélange artificiel de deux sortes de terres. Les terres dont on disposait à proximité étaient, en effet, trop argileuses, car elles ne

renfermaient guère qu'un tiers de matières sableuses, et on les a mélangées avec un menu gravier provenant, du reste, d'une tranchée qui s'exécutait simultanément pour le canal. Le mélange a été fait dans la proportion de deux volumes de terre pour un de gravier, ce qui a ramené la proportion d'argile à 44 p. 100

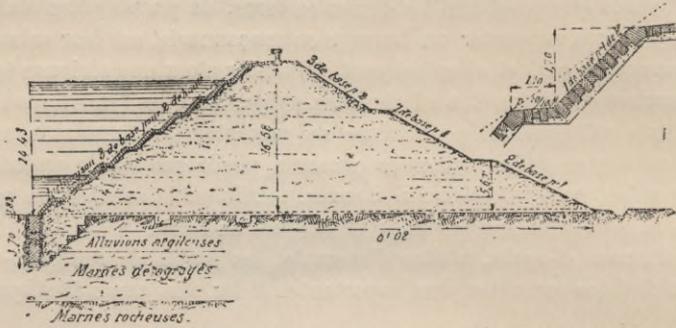


Fig. 2. — Digue de la Liez (canal de la Marne à la Saône).

du volume total contre 56 p. 100 de matières sableuses. La terre était d'abord répandue sur une épaisseur de 0^m,133 et soigneusement émietlée, puis elle était recouverte d'une couche de gravier de 0^m,063 d'épaisseur. Le mélange était fait avec une herse-rouleau d'un système spécial, puis un cylindrage ramenait la couche totale aux deux tiers de son épaisseur.

Digue indoue. — La figure 3 représente un profil de digue indoue de 30 mètres de hauteur. Ce qui la caractérise, c'est la très grande inclinaison de

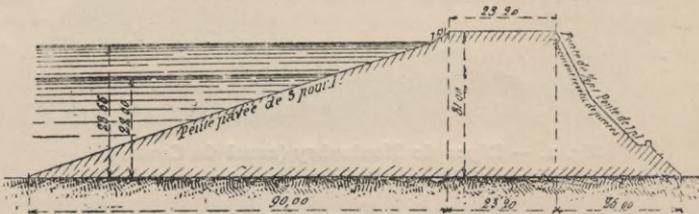


Fig. 3. — Profil-type d'une ancienne digue de l'Inde.

son talus en contact avec l'eau, tandis qu'au contraire sa face extérieure est, relativement, très peu inclinée. Comme les deux précédentes, elle est constituée par un remblai homogène fortement pilonné.

Digues anglaises. — Ainsi que nous l'avons déjà dit, les digues anglaises se différencient des précédentes par l'interposition d'une âme en argile au milieu du remblai. Souvent même, comme dans l'exemple représenté par la figure 4, entre le remblai proprement dit, constitué en matériaux tout-venants déposés

sans grands soins, et l'âme en argile, on interpose un remblai spécial constitué en matériaux choisis.

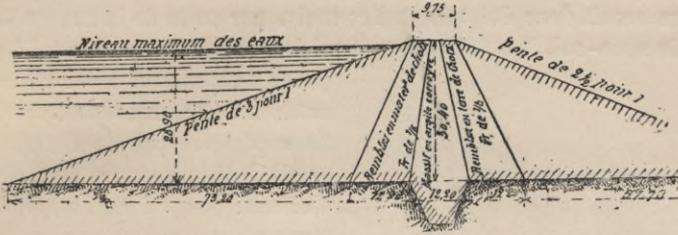


Fig. 4. — Profil-type d'une digue anglaise.

Les figures 5, 6 et 7 représentent trois profils de digues anglaises qui mon-

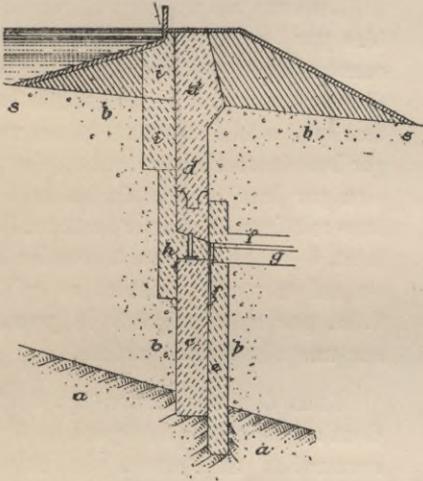


Fig. 5. — Digue de Den-of-Ogil (Ecosse).

ss, surface du sol naturel; — a, roc; — bb, gravier; — c, premier mur en béton; — d, premier mur en corroi; — e, deuxième mur en béton; — h, troisième mur en béton; — i, troisième mur en corroi.

trent bien la possibilité d'établir des ouvrages de ce genre sur des terrains où des barrages en maçonnerie seraient impossibles.

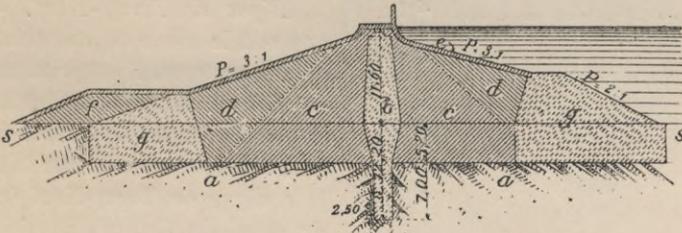


Fig. 6. — Digue du réservoir de Dowdeswell (Angleterre).

ss, surface du sol; — a, argile bleue du lias; — b, mur en corroi; — c, c, matières argileuses; — d, d, matières les plus sèches; — e, perré; — f, matières molles extraites à la base de la digue; — g, g, argile cuite.

La figure 5 est la coupe d'une digue construite en Ecosse pour créer une

retenue de 15 mètres de hauteur seulement, dans une vallée très étroite, puisque la digue n'a que 94 mètres de longueur à son couronnement. Avec un bon terrain, le barrage aurait donc été très facile; mais, par suite de la nature très perméable du sous-sol, il a fallu descendre l'âme destinée à assurer l'étanchéité

jusqu'à 25 mètres au-dessous du sol naturel. Cette âme, constituée à la partie supérieure par de l'argile et à la partie inférieure par du béton, n'a d'ailleurs pas été suffisante et a dû être renforcée après une première mise en service du réservoir, ainsi qu'on peut s'en rendre compte d'après la légende de la figure 5.

Les deux autres digues, représentées par les figures 6 et 7, ont été construites en Angleterre. Elles se distinguent, non plus par la grande hauteur qu'il a fallu donner à l'âme, mais par leur énorme empattement, c'est-à-dire par leur grande épaisseur à la base relativement à leur hauteur. Cela tient à ce qu'elles sont fondées sur un sol très peu résistant et qu'il a fallu, par suite, répartir la pression sur une très grande surface.

Nous donnons encore (*fig. 8 et 9*) deux autres profils de digues en terre, construites en France, afin de dire quelques mots des ouvrages spéciaux qui les accompagnent.

Digue de Torcy-Neuf. — Quel que soit le mode de constitution des digues en terre, il est prudent de placer les ouvrages de prise d'eau en dehors du remblai. C'est ce qui a été fait, comme on le voit sur la figure 8, à la digue de Torcy-Neuf (réservoir du canal du Centre). La prise d'eau

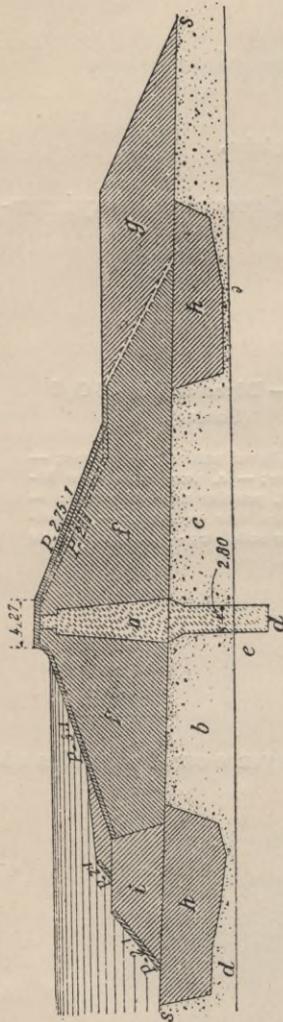


Fig. 7. — Digue du réservoir de Monkswood (Angleterre).

ss, surface du sol; — b, sable oolithique d'alluvion; — c, tourbe et dépôts mêlés; — d, argile bleue résistante; — e, argile pierreuse; — f, remblai en sable gypseux et argile; — g, remblai en sable oolithique, tourbe et dépôts d'alluvion; — h, i, pierres sèches; — l, pierres sèches; — o, mur en corroi.

est constituée par une tour en maçonnerie percée d'ouvertures à différentes hauteurs. Suivant la hauteur de l'eau dans le réservoir, on manœuvre la vanne qui correspond à l'ouverture par laquelle on veut faire écouler l'eau. La hauteur d'eau, et par suite la pression sur cette vanne, peut alors être relativement faible.

qu'il est amorcé. C'est un tuyau métallique de 0^m,70 de diamètre, recourbé et formant un siphon qui est amorcé ou désamorcé automatiquement par un petit tuyau de 0^m,15 de diamètre dont l'orifice supérieur est disposé d'une façon particulière.

Barrages mixtes.

Nous comprenons dans cette catégorie tous les barrages fixes qui ne sont pas uniquement constitués soit en terre, soit en maçonnerie.

Suivant les contrées dans lesquelles doivent être établis les réservoirs, on dispose de matériaux différents pour la construction des digues qui doivent les former et il existe une très grande variété de ces sortes d'ouvrages. Dans certaines régions, il n'est pas possible de songer aux digues en terre, à cause des soins minutieux qu'elles exigent, et il est en même temps impossible de recourir aux murs en maçonnerie, soit à cause de leur prix de revient élevé, soit que les dispositions locales ne permettent pas de leur assurer des fondations convenables. On a eu alors recours aux matériaux les plus divers, tels que métaux, bois, équarris ou non, fascines, rocaille, pierres sèches, etc., qui, judicieusement employés, ont parfaitement rempli le but qui leur avait été assigné. Dans d'autres cas, on a cru obtenir un supplément de garantie, pour les retenues de grande hauteur, en alliant aux digues en terre des murs en maçonnerie ; mais cette combinaison n'a, en général, pas été heureuse et le plus souvent il eût été préférable de concentrer tous les efforts soit sur la digue, soit sur le mur.

Il n'est pas possible de donner des indications générales s'appliquant à la fois à des ouvrages aussi divers. Nous nous bornons à signaler les barrages les plus caractéristiques, constituant en quelque sorte des types auxquels peuvent être ramenés ou assimilés tous les barrages construits avec plusieurs sortes de matériaux.

Barrage de Saint-Ferréol. — L'idée de remplacer l'âme en argile des digues anglaises par de la maçonnerie est sans doute fort ancienne. Elle a été appliquée, en France, pour la première fois, par Riquet, dans la construction du réservoir de Saint-Ferréol, destiné à l'alimentation du canal du Midi.

La fermeture de la vallée a été obtenue par un énorme massif en terre (*fig. 10*), soutenu à ses extrémités par des murs fondés sur le rocher, et dans l'intérieur duquel se trouve encastré un troisième mur, plus important, reposant également sur le rocher et destiné à jouer le rôle d'écran. Les remblais constituant le massif sont des matériaux tout-venants, composés de cailloux et de terre, incapables de procurer l'étanchéité, qui est alors demandée au mur central, de même que dans les digues anglaises elle doit être fournie par le corroi argileux. Ces remblais sont d'ailleurs recouverts par une couche de terre glaise de 2 mètres d'épaisseur.

Ce barrage est traversé par plusieurs prises d'eau situées à diverses hauteurs, et la figure 10 montre l'importance que prennent les ouvrages de ce genre dans

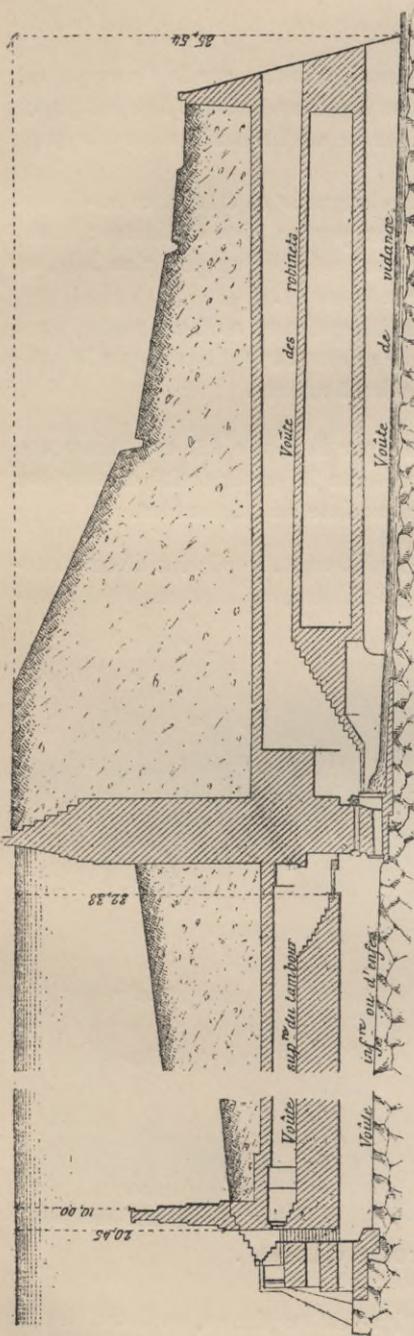


Fig. 10. — Prise d'eau du barrage de Saint-Ferréol (canal du Midi).

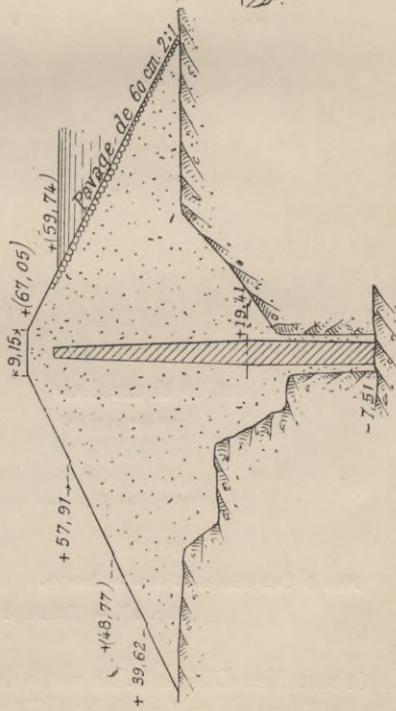


Fig. 11. — Barrage du Croton (Etats-Unis).

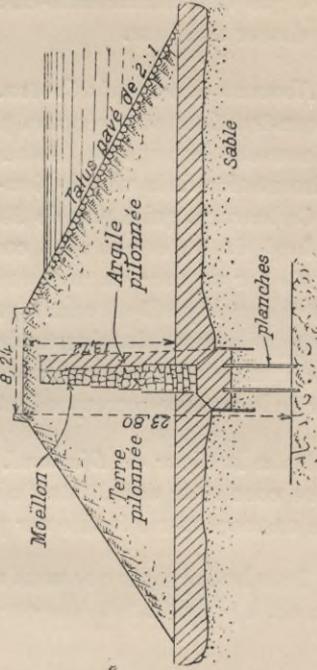


Fig. 12. — Barrage de Diamond (Etats-Unis).

une digue qui, comme celle-ci, a plus de 30 mètres de hauteur et 140 mètres d'épaisseur à la base.

Nouveau barrage du Croton. — La digue représentée par la figure 11 est de construction toute récente, puisqu'elle est à peine terminée. Elle fait partie du nouveau barrage du Croton destiné à créer un immense réservoir pour l'alimentation de la ville de New-York.

Ce barrage, qui a plus de 250 mètres de longueur et 50 mètres au-dessus du fond du lit, est en effet composé de deux parties bien distinctes; l'une, formée par un mur en maçonnerie dont nous parlerons un peu plus loin, et l'autre dont le profil est celui représenté par la figure 11.

On remarquera la très grande profondeur à laquelle on a dû descendre l'âme en maçonnerie; la hauteur totale de la digue atteint 74^m,50 tandis que la hauteur de la retenue correspondante n'est que de 25 mètres.

Enfin la *digue de Diamond*, représentée par la figure 12, est encore une digue construite aux Etats-Unis et qui présente la particularité d'avoir son âme en maçonnerie fondée sur pilotis avec enceinte en palplanches.

Dans les barrages que nous allons voir maintenant, le principe de construction est à peu près le même que dans les précédents, mais les matériaux em-

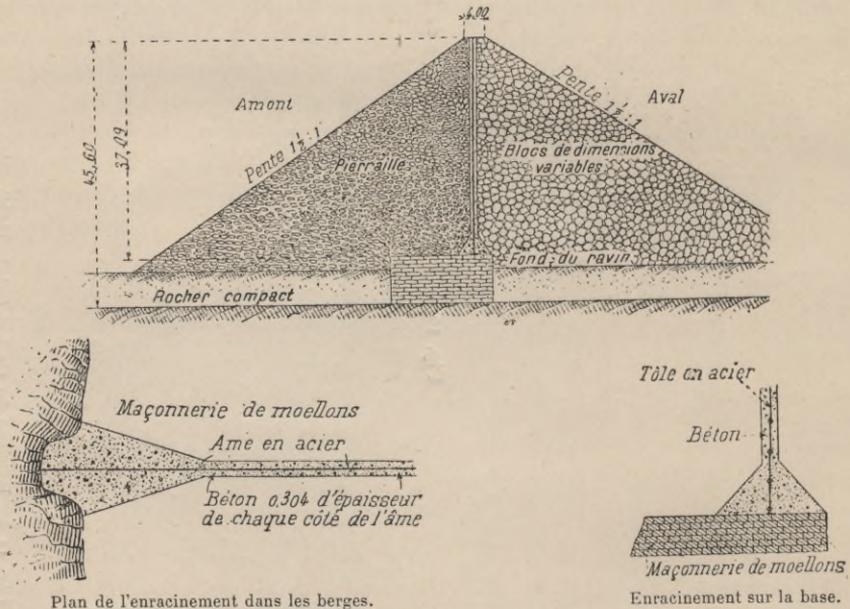


Fig. 13. — Barrage de l'Otay (Californie).

ployés sont bien différents. Le corps de la digue est en pierres, au lieu d'être en terre, et l'âme est en fer, au lieu d'être en maçonnerie.

Ces ouvrages sont d'ailleurs de construction récente et ils sont situés en Californie, dans des régions où les conditions climatiques et économiques sont telles que les procédés employés peuvent être justifiés.

Le barrage de l'Otay (fig. 13) crée une retenue de 70 mètres de hauteur. Son constructeur a pensé que l'emploi d'une âme en acier, encastrée elle-même dans un mur en béton de faible épaisseur, serait plus économique que celui d'une âme en maçonnerie et que l'ouvrage ainsi constitué serait moins susceptible d'être disloqué et mis hors d'usage par les tremblements de terre si fréquents dans cette région. Le projet primitif comportait d'ailleurs une âme en maçonnerie qui a reçu un commencement d'exécution, ainsi qu'on le voit sur la coupe. Les autres figures montrent l'enracinement de l'âme dans les berges et sur la base.

Le barrage de l'East-Canyon Creek (fig. 14) est encore plus curieux que le précédent. Il est établi dans une gorge très étroite et pour le constituer on a tout d'abord pratiqué de grosses mines dans les berges, de façon à créer d'un seul coup le remblai. On est venu ensuite introduire dans ce massif de blocs

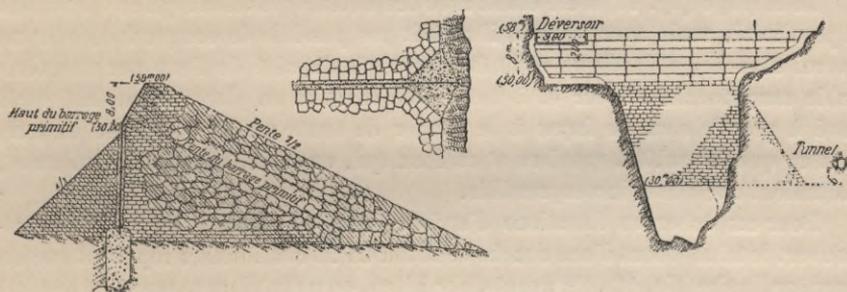


Fig. 14. — Barrage de l'East-Canyon Creek (Californie).

enchevêtrés, dont quelques-uns avaient un volume de plus de 300 mètres cubes, une âme en acier noyée dans du béton.

On a ainsi construit un barrage suffisamment étanche et créant une retenue de 20 mètres de hauteur pour le prix de 100 000 francs, chiffre qui doit être considéré comme très faible si l'on a égard à ce que la main-d'œuvre est très chère dans le pays dont il s'agit.

Malgré son mode de construction très économique, ce barrage s'est cependant assez bien comporté pour que, quatre ou cinq ans après sa mise en service, on se soit décidé à le surélever pour augmenter la hauteur de la retenue de 8 mètres. Cette surélévation a été obtenue en augmentant de pareille hauteur le remblai d'aval et en exhaussant la tôle d'acier donnant l'étanchéité. Dans cet exhaussement cette tôle, qui du côté d'aval est reliée au remblai par des ancrages, est du côté amont directement en contact avec l'eau.

Dans le Colorado on vient de construire une digue en remblai rocheux, dont

la partie située du côté de l'eau est simplement recouverte par un masque métallique.

Un autre exemple de barrage construit en Californie avec les matériaux les plus divers est celui de *Bowman*, représenté par la figure 15. Ce barrage, construit dans une région où le bois est abondant, est constitué par des cadres superposés en bois de grande dimension, non équarris et simplement fixés les uns aux autres par de gros clous. L'intérieur de ces cadres est rempli de pierres et de terre et la surface amont protégée contre l'eau par des planches clouées sur les cadres et dont les joints sont calfatés.

Barrage du lac d'Orédon. — Dans la digue qui a été construite pour surélever le niveau du lac d'Orédon, on a employé un procédé un peu analogue à celui dont nous venons de parler, c'est-à-dire qu'on a eu recours, pour obtenir l'étanchéité, à un revêtement directement en contact avec l'eau.

Ce lac étant situé dans les Pyrénées, à 1 850 mètres d'altitude, c'est-à-dire dans une région peu accessible, on a, par raison d'économie, renoncé à employer un mur en maçonnerie pour constituer le barrage destiné à exhausser son niveau.

Le barrage (*fig. 17*) a été établi avec des déblais graveleux qui se trouvaient à proximité, mais avec lesquels il n'était pas possible de songer à obtenir un corroi étanche, et la digue a dû être protégée du côté de l'eau par une véritable maçonnerie. Au fur et à mesure de sa mise en place, le remblai était lavé à grande eau, de façon à le purger de toute matière terreuse et à ne laisser que les sables, graviers et cailloux qui, en se mélangeant intimement, formaient une masse incompressible.

Pour empêcher les filtrations d'arriver jusqu'au remblai, on a d'abord recouvert le talus amont d'une couche de béton de 20 centimètres reposant sur un perré ordinaire (*fig. 16*). En avant de ce béton, on a établi un autre perré destiné à servir de drain et reposant à sa base sur une galerie d'écoulement avec laquelle il communique par des barbacanes et qui conduit les eaux provenant des filtrations dans l'aqueduc de vidange. Sur ce perré s'appuie un fort revêtement en béton de 1^m,60 d'épaisseur à la base et de 1^m,20 au sommet, protégé lui-même par une chape en bitume de 2 centimètres d'épaisseur, mise à l'abri de la gelée et du choc des vagues par un troisième perré d'un mètre d'épaisseur.

Il est à peine besoin de faire remarquer que ce revêtement joue un rôle tout différent de ceux que nous avons déjà vus dans les premières digues en terre dont nous avons parlé. Dans ces digues, les revêtements n'avaient pour but que de protéger le talus contre les érosions, l'étanchéité étant assurée par le massif du remblai, tandis qu'ici, non seulement ce revêtement concourt au même but, mais encore c'est lui qui procure l'étanchéité.

Enfin le *barrage de South Fork* (*fig. 18*) qui a été construit récemment aux Etats-Unis, dans une région où la maçonnerie est également très chère, est presque entièrement métallique. L'étanchéité est assurée par une surface en

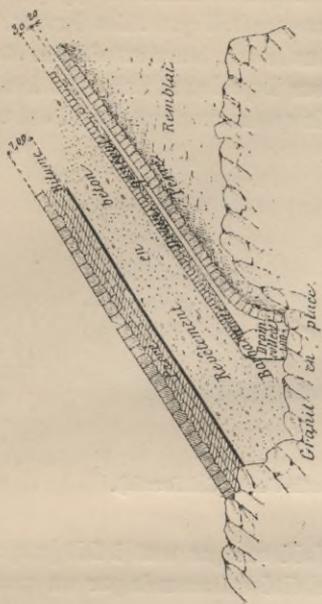


Fig. 16. — Détail du revêtement du barrage du lac d'Orédon.

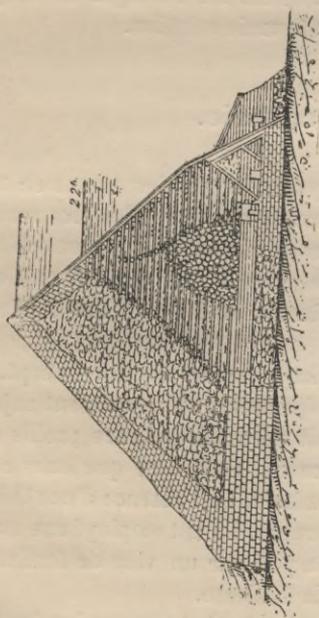


Fig. 15. — Barrage de Bowman (Californie).

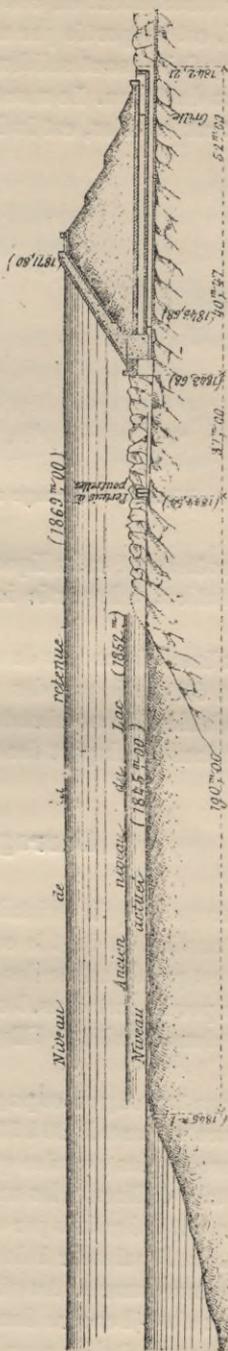


Fig. 17. — Coupe, sur la prise d'eau, du barrage du lac d'Orédon.

tôle d'acier directement en contact avec l'eau et qui, au lieu de s'appuyer sur un remblai, est supportée par une série de fermes métalliques. Ces fermes, de forme triangulaire, sont solidement ancrées dans le sol, leurs extrémités étant noyées dans du béton. Le montant d'amont, sur lequel sont fixées les fermes qui supportent les tôles, est incliné à 45°, tandis que le montant d'aval est ver-

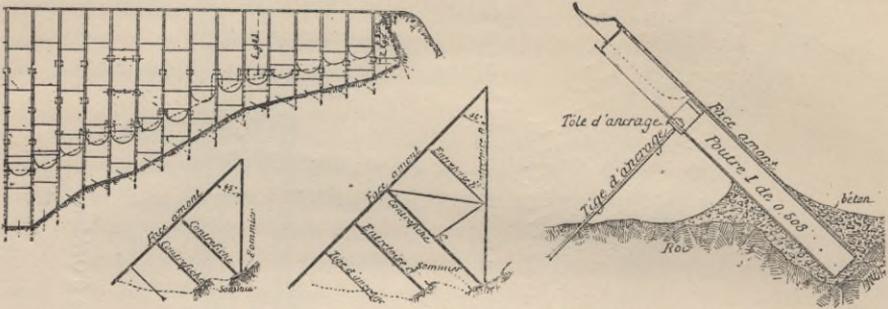


Fig. 18. — Barrage métallique de South-Fork (Californie).

tical. Le revêtement métallique ne descend d'ailleurs pas tout à fait jusqu'au sol de fondation, à la partie inférieure l'étanchéité est assurée par un massif en béton.

Nous n'insisterons pas davantage sur ces modes de construction, dont la plupart ont été dictés par des circonstances locales et ne sont souvent guère recommandables. Nous aborderons immédiatement les barrages en maçonnerie, qui dans la plupart des cas fournissent la vraie solution.

Barrages en maçonnerie.

Nous avons vu qu'il existait, en certains pays, de grandes digues en terre encore en service, et dont la construction remonte aux temps les plus reculés.

Il n'en est pas de même des grands barrages en maçonnerie. A part quelques exceptions peu importantes, les ouvrages de ce genre les plus anciens sont ceux construits dans le midi de l'Espagne, au seizième et au dix-septième siècle.

Anciens barrages espagnols. — Ces barrages, au nombre de sept, ont des hauteurs variant de 20 à 50 mètres et des épaisseurs qui paraissent aujourd'hui beaucoup plus grandes que cela ne serait nécessaire. Leurs profils sont d'ailleurs très différents les uns des autres, ce qui tient à ce que leurs constructeurs n'ont été guidés par aucune règle générale. En l'absence d'une théorie leur indiquant l'épaisseur à donner à leurs ouvrages, ils ont employé une masse énorme de maçonnerie. Aussi, sauf un qui a péri par un vice de fondation, aucun d'eux n'a-t-il encore donné des signes de faiblesse.

Ces barrages, établis pour créer des réservoirs destinés au service des irri-

gations, sont tous situés sur des cours d'eau à régime torrentiel qui, pendant leurs crues, débitent des quantités considérables de vases et de limons. Ces dépôts s'accumulent dans les réservoirs, ces derniers auraient été comblés et mis hors d'usage en peu de temps si l'on n'avait pris la précaution de se ménager la possibilité d'évacuer les dépôts, dès qu'ils réduisaient dans une trop grande proportion la capacité utile. Cette évacuation a été obtenue en produisant des chasses énergiques par l'ouverture d'orifices de grandes dimensions situés au fond du réservoir. En laissant écouler une partie de l'eau sous une forte charge, et, par suite, avec une très grande vitesse, on a pu entraîner au dehors les vases accumulées dans le réservoir sous plusieurs mètres d'épaisseur. Ce système de curage n'a sans doute pas été étranger à l'adoption des barrages en maçonnerie, car des digues en terre ne pourraient certainement pas résister aux courants extrêmement violents qui se produisent pendant une vidange aussi rapide.

La galerie qui sert à effectuer la vidange et le curage du réservoir est à peu près disposée de la même manière dans tous ces barrages, et les moyens employés pour la fermer et l'ouvrir sont des plus primitifs. En effet, cette galerie est simplement fermée à l'aide de poutrelles en bois de fort équarrissage, avec joints calfatés, et contre-butées par d'autres poutrelles et des contre-fiches. Les dépôts qui s'accumulent contre le barrage prennent, au bout de quelques années, une certaine consistance, de sorte que, lorsque l'on veut curer le réservoir, il est possible d'enlever les poutrelles sans en provoquer l'effondrement. Avec une longue barre à mine, on perfore un trou vertical dans ces dépôts, en se tenant sur la crête du barrage; l'eau pénètre par ce trou dans la galerie et, en affouillant les dépôts, elle produit bientôt une véritable débâcle qui entraîne au loin toutes les matières meubles.

Il est intéressant de comparer ces barrages aux anciens barrages français, construits à la fin du dix-huitième siècle ou dans la première moitié du dix-neuvième. Ces derniers sont également très différents les uns des autres, aucune règle précise n'ayant guidé leur construction.

Voici d'abord quatre des anciens barrages espagnols :

1° Le barrage d'*Almanza* (fig. 19 et 20), d'un peu plus de 20 mètres de hauteur totale et de 10 mètres de largeur à la base. Cette largeur serait insuffisante si le barrage n'était pas implanté suivant une courbe qui lui permet de résister comme une voûte. Nous verrons plus loin les avantages que présente cette forme en plan des barrages; pour le moment, constatons seulement que tous les anciens barrages espagnols sont implantés en courbe ou en forme de chevron.

Par suite de son peu d'épaisseur, la maçonnerie de la base de ce barrage supporterait, sur le parement d'aval, une pression de 14 kilogrammes par centimètre carré, d'après la théorie actuellement adoptée et dont nous dirons quelques mots. Quoique cette pression soit très supérieure à celle à laquelle on soumet habituellement les maçonneries, le barrage ne paraît pas s'en trouver

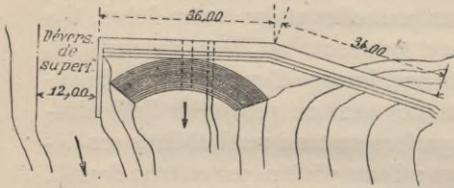
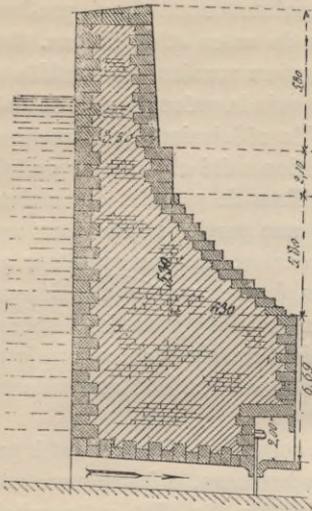


Fig. 19 et 20. — Coupe et plan du barrage d'Almanza.

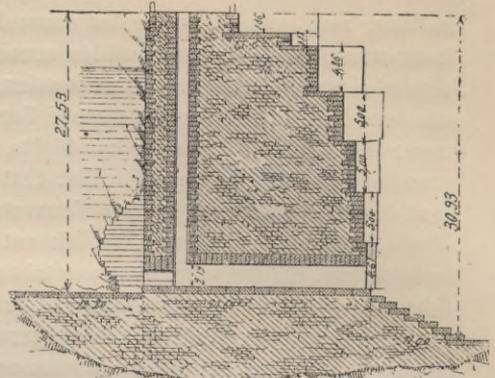


Fig. 22. — Barrage de Nijar.

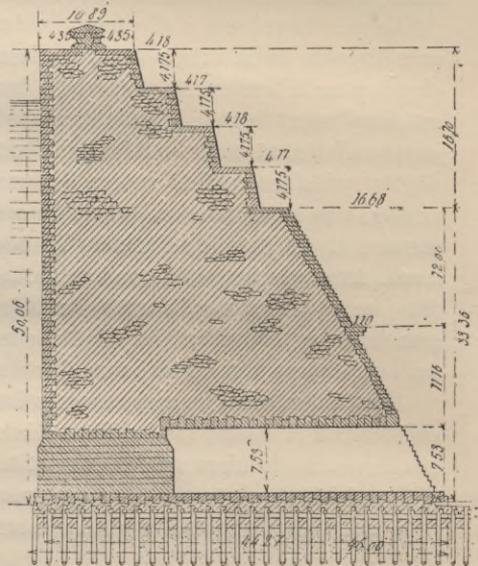


Fig. 23. — Barrage de Puentés.

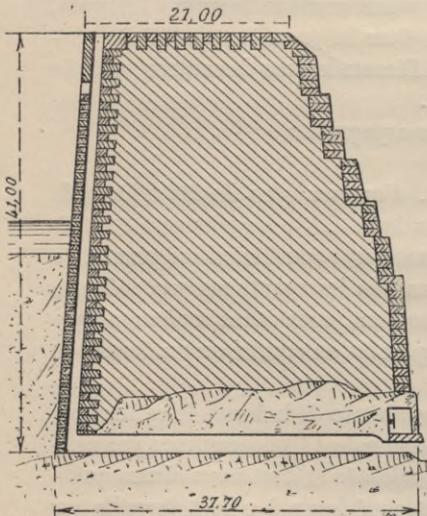


Fig. 21. — Barrage d'Alicante.

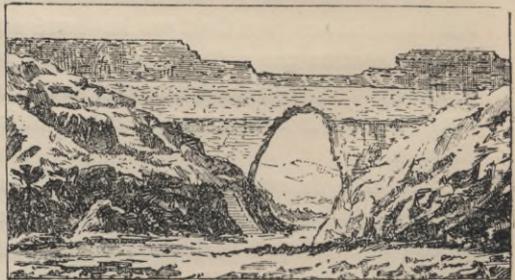


Fig. 24. — Barrage de Puentés après sa rupture.

mal, puisqu'il fonctionne depuis le seizième siècle, c'est-à-dire depuis plus de trois cents ans.

2° Le *barrage d'Alicante* (fig. 21) est non seulement le plus important de ceux existant encore en Espagne, mais, avant la construction du barrage du Furens, il était le plus élevé de tous les ouvrages de ce genre. Il a été construit de 1579 à 1594, et a 41 mètres de hauteur, 38 mètres d'épaisseur à la base et 21 mètres au couronnement. Cette dernière épaisseur surtout est absolument exagérée.

3° Le *barrage de Nijar* (fig. 22) est de construction relativement récente, puisqu'il n'a été terminé qu'en 1850; cependant son profil n'est guère plus rationnel que celui du barrage d'Alicante et il présente, comme ce dernier, des épaisseurs beaucoup plus grandes qu'il ne serait nécessaire.

4° Le *barrage de Puentès* (fig. 23) est célèbre surtout par sa rupture qui a eu lieu au commencement du siècle dernier, une dizaine d'années après sa mise en service. Cet ouvrage, qui a 50 mètres de hauteur, était implanté en chevron et avait une épaisseur bien plus que suffisante pour résister à la pression de l'eau. Il était d'ailleurs construit en excellente maçonnerie. Malheureusement, en l'absence d'un fond de rocher compact, on avait dû le fonder sur pilotis, pénétrant de 7 mètres dans le gravier. Quoique le pilotage fût prolongé de 40 mètres à l'aval, il a été insuffisant pour empêcher les infiltrations et pour consolider convenablement le sol de fondation. Chassé par la poussée de l'eau, le gravier servant de base d'appui au barrage a cédé brusquement, une trombe d'eau s'est précipitée par-dessous le barrage qui est resté en quelque sorte suspendu par ses flancs, avec une énorme brèche qui lui donne vaguement l'aspect d'un pont, ainsi qu'on le voit sur la figure 24 qui montre l'état actuel du barrage.

Cet exemple montre la nécessité qu'il y a à fonder les barrages, surtout ceux de grande hauteur, sur un sol inaffouillable.

Récemment, un nouveau barrage de 48 mètres de hauteur a été construit un peu en amont du précédent, et, pour éviter des fondations défectueuses, les maçonneries ont dû être descendues jusqu'au rocher compact, à 28 mètres au-dessous du thalweg.

Anciens barrages français. — Voici maintenant quelques-uns des anciens barrages français les plus importants et les plus caractéristiques :

1° Le *barrage du Lampy* (fig. 25), construit en 1780 pour créer un réservoir destiné à suppléer à celui de Saint-Ferréol dans l'alimentation du canal du Midi. Il est construit en matériaux granitiques et son parement d'amont est à peu près vertical, tandis que son parement d'aval est assez fortement incliné, et, de plus, contrebuté par des contreforts; la plus grande hauteur de la retenue qu'il crée est de 16^m,20.

2° Le barrage de Grosbois (fig. 26), construit de 1830 à 1838 pour l'alimentation du canal de Bourgogne. Il constitue une retenue maximum de 22^m,30 et son profil est composé d'un parement amont fortement incliné au moyen de retraites successives, tandis qu'à l'aval le parement présente un fruit uni-

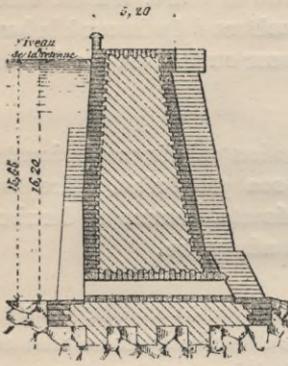


Fig. 25. — Barrage du Lampy.

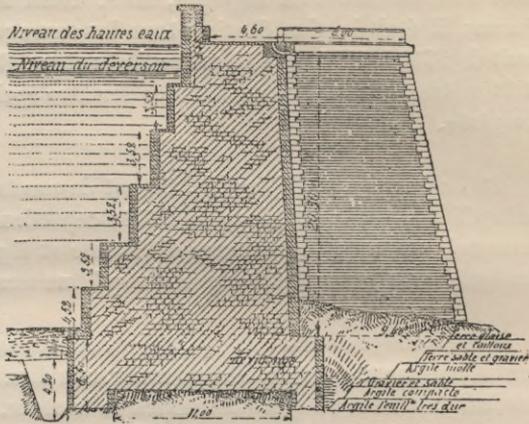


Fig. 26. — Barrage de Grosbois.

forme d'un vingtième seulement. Cette disposition peu rationnelle est très défavorable à la stabilité et c'est à ce grave défaut de construction qu'il faut attribuer les mouvements qu'a subis cet ouvrage. Sous l'influence de la poussée de l'eau, le mur a fléchi et il s'y est produit des lézardes inquiétantes. On a dû alors procéder à sa consolidation en soutenant, par de puissants contreforts, son parement d'aval. Ces contreforts, établis sur toute la hauteur du barrage, n'ont pas donné une sécurité suffisante, quoique chèrement achetée, et l'on vient de construire à l'aval une digue en terre qui permet de créer sur sa face aval une contre-poussée.

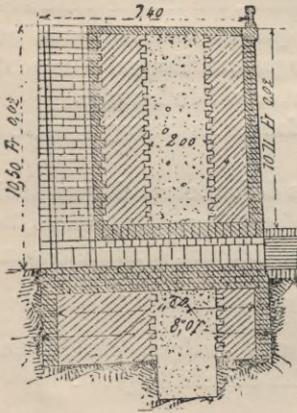


Fig. 27. — Barrage du Vioreau.

3° Le barrage du Vioreau (fig. 27), construit de 1832 à 1842 pour l'alimentation du canal de la Loire à la Vilaine. Il ne créa qu'une retenue de 16^m,20; mais sa construction est tout à fait caractéristique, car il est constitué par deux murs en maçonnerie ordinaire entre lesquels on a coulé du béton. Les constructeurs semblent surtout avoir eu la préoccupation d'éviter les infiltrations. Néanmoins, cette construction peu homogène a donné lieu au début à des suintements importants qui, paraît-il, ont disparu avec le temps.

Considérations techniques sur les barrages précédents. — L'examen des barrages que nous venons de voir montre bien qu'aucune règle générale n'a guidé le choix de leur profil.

Nous ne savons rien des considérations techniques sur lesquelles se sont basés les constructeurs des barrages espagnols ; mais, par contre, nous savons que les ingénieurs français qui ont construit les barrages que nous venons de voir ont calculé ces ouvrages comme des murs de soutènement ordinaires et en ne se préoccupant que de leur donner une épaisseur suffisante pour assurer leur stabilité contre la poussée de l'eau. Pour cela il suffisait, d'une part, que le moment de stabilité¹ du mur fût supérieur à son moment de renversement et, d'autre part, que sa base fût suffisamment large, c'est-à-dire son poids suffisamment grand, pour empêcher son déplacement par glissement sur le sol de fondation.

Les murs de réservoirs étaient simplement établis de façon à pouvoir résister au renversement que tend à produire la poussée de l'eau, en les faisant tourner sur leur arête extérieure, et au déplacement horizontal, par suite d'un glissement, soit sur la base, soit sur l'une des assises. M. de Sazilly a, le premier, fait remarquer que cette double condition n'est pas suffisante pour assurer la stabilité, et qu'il y a lieu de se préoccuper, en outre, au premier chef, des pressions supportées par les maçonneries ou par le sol sur lequel elles reposent, et de vérifier si ces pressions ne dépassent pas la limite qu'il est convenable de leur imposer, eu égard à la résistance des matériaux qui les constituent. A son avis, les déformations observées dans les murs de réservoirs sont précisément dues à ce que les maçonneries ou le sol de fondation, ou tout à la fois les maçonneries et le sol, ont eu à supporter des pressions trop élevées.

Nouveaux barrages en maçonnerie. — Partant de ce point de vue qu'il est nécessaire de profiler les barrages en maçonnerie de façon qu'en aucun point leurs matériaux n'aient à supporter des charges supérieures à celles que leur nature leur permet d'admettre, M. de Sazilly a déterminé, en 1853, la forme générale à donner à ces barrages et posé les bases de la théorie d'après laquelle ces ouvrages sont maintenant établis. Cette théorie, complétée et mise en pratique pour la première fois par M. l'Inspecteur général des ponts et chaussées Delocre, dans la construction du barrage du Furens, a reçu ensuite de notables perfectionnements de la part de MM. les Inspecteurs généraux Bouvier, Guillemain et Maurice Lévy, et elle est actuellement universellement adoptée. Elle est basée sur la loi de répartition des pressions indiquée par Méry et qui, complétée par Bélanger, est maintenant connue sous le nom de *loi du trapèze*.

Nous ne pouvons expliquer ici ces différentes méthodes de calcul, mais il

1. On sait que le moment de stabilité est le moment du poids du mur par rapport à l'arête autour de laquelle le mouvement tend à se produire, et que le moment de renversement est le moment, par rapport à la même arête, de la force qui tend à renverser le mur.

nous paraît cependant indispensable, pour l'intelligence de ce qui va suivre, de dire quelques mots des règles et principes qui régissent actuellement la construction des barrages en maçonnerie.

Considérons d'abord un profil de barrage ABCD (*fig. 28*) de forme quelconque. Si nous découpons dans ce barrage une tranche de 1 mètre de longueur, indépendante des parties adjacentes, on peut admettre qu'elle est soumise à l'action de deux forces : la composante verticale P du poids du mur et du poids de l'eau, d'une part, et la composante horizontale F de la poussée de l'eau, d'autre part. La résultante R de ces deux forces peut être considérée comme appliquée au point E, où elle coupe la base, et décomposée, en ce point, en une force verticale P' égale à P et en une force horizontale égale à F. Cette dernière ne tend qu'à provoquer le glissement du mur sur sa base,

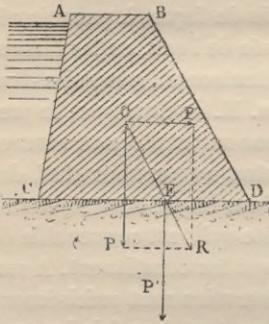


Fig. 28.

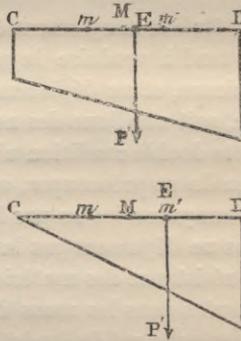


Fig. 29 et 30.

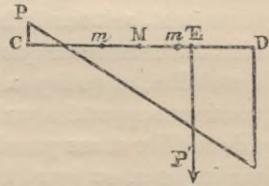


Fig. 31.

tandis que la force verticale se répartit sur la base suivant une loi décroissante à partir de l'extrémité D la plus rapprochée du point d'application de la résultante. On admet que cette répartition se fait dans une mesure proportionnelle aux ordonnées du trapèze (*fig. 29*), dont la surface représenterait la pression totale et dont le centre de gravité se trouverait sur la direction de la composante verticale P'.

On conçoit qu'il y a intérêt à ce que la pression exercée par le mur sur sa base soit aussi uniformément répartie que possible, c'est-à-dire que le trapèze représentatif des pressions se rapproche le plus possible d'un rectangle. Pour que cela ait lieu, il faut que le point d'application de la force P' se trouve au milieu de la base CD; plus il s'en éloigne pour se rapprocher du point D, par exemple, plus la pression augmente en ce point et diminue au point C. Si le point d'application arrive en m' qui est tel que $m'D$ est égal au tiers de CD, le trapèze ci-dessus devient un triangle (*fig. 30*), la pression est nulle en C, tandis qu'elle est devenue en D égale au double de la pression moyenne.

Enfin, si le point E continue à marcher vers la droite, c'est-à-dire s'il sort du tiers médian mm' , pour entrer dans le tiers $m'D$ (*fig. 31*), la pression en D augmente encore, tandis qu'en C elle devient négative, c'est-à-dire que non

seulement le mur n'exercerait plus alors aucune pression en ce point, mais encore qu'il y serait soumis à un effort de traction tendant à le séparer de sa base.

Dans ce dernier cas, le mur serait placé dans de mauvaises conditions pour sa stabilité : l'une des arêtes de sa base D pourrait être écrasée par un excès de compression, tandis que l'autre C se trouverait décollée de la base par un effort d'extension.

L'utilité des calculs faits pour l'établissement des projets de barrage a précisément pour but de s'assurer : d'une part, que la pression au point D, ou plus généralement en un point quelconque du parement d'aval, ne dépasse pas la limite que peuvent supporter les matériaux employés ; d'autre part, à vérifier que le point C, ou plus généralement un point quelconque du parement d'amont, n'est pas soumis à des efforts d'extension, mais, au contraire, toujours comprimé.

Cette dernière condition est encore plus importante à remplir que la première, et c'est parce qu'on n'en avait pas tenu compte dans leur établissement que certains barrages, en particulier celui de Bouzey, se sont rompus.

Il est, en effet, facile de constater que la résistance des maçonneries à l'extension, c'est-à-dire à l'arrachement, est beaucoup plus faible et plus incertaine que celle qu'elles présentent à la compression.

Tandis que les bonnes maçonneries peuvent supporter sans inconvénient un effort de compression de 10 kilogr. par centimètre carré, et même davantage, elles ne résistent pas, en général, à un effort d'extension de 1 kilogr. ou 1^{Kg},5 par centimètre carré, et il est prudent de ne jamais les exposer à de pareils efforts.

Dans le cas d'un mur soutenant une charge d'eau, il est particulièrement désirable que le parement en contact avec l'eau ne soit jamais soumis à ces efforts d'extension, dont l'effet peut être de produire des fissures dans la maçonnerie. Ces fissures deviennent, en effet, extrêmement dangereuses, car, en s'y introduisant, l'eau y détermine des sous-pressions qui tendent à renverser la partie de l'ouvrage située au-dessus d'elles. M. Maurice Lévy estime même que, afin d'éviter une introduction possible de l'eau sous pression dans le mur, la pression des maçonneries en un point quelconque du parement en contact avec l'eau devrait toujours être supérieure à la pression de l'eau en ce point. C'est là, d'ailleurs, un desideratum impossible à réaliser, pratiquement, dans la partie inférieure des grands barrages.

Nous ne pouvons entrer dans les détails qui seraient bien nécessaires pour démontrer l'importance capitale qu'il y a à éviter la production d'efforts d'extension sur le parement d'amont ; nous devons nous borner à dire que cette condition, qui avait été méconnue jusque dans ces dernières années, est considérée maintenant comme une des plus indispensables à réaliser.

La discussion des formules basées sur la loi du trapèze montre que, pour que les matériaux qui le constituent soient convenablement utilisés, un barrage doit avoir son parement d'amont vertical et son parement d'aval terminé par une courbe dont la convexité est tournée du côté de l'eau. Théoriquement, l'é-

paissur du mur au sommet devrait être nullé, et l'on aurait un profil de la forme indiquée par la figure 32, dans lequel pour tous les points de la courbe BCD la pression serait égale à la charge limite imposée aux matériaux.

Ce profil, établi pour assurer la stabilité du mur lorsque le réservoir est plein, pourrait, si la hauteur est trop grande, donner lieu, lorsque le réservoir est vide, à de trop fortes pressions sur le parement d'amont, d'autant plus que la forme concave donnée au parement d'aval a pour effet d'augmenter notablement la pression sur le parement opposé.

Pour que les matériaux ne supportent pas une surpression supérieure à la limite admise, il peut donc être nécessaire de donner, à l'amont, un empattement à la construction. Cet empattement doit être tel que, dans chaque section, l'accroissement de surface soit proportionnel à l'accroissement de pression.

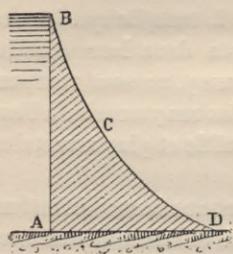


Fig. 32.

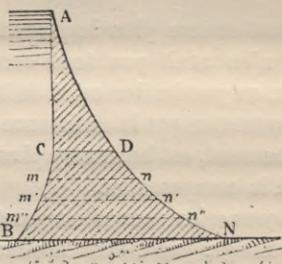


Fig. 33.

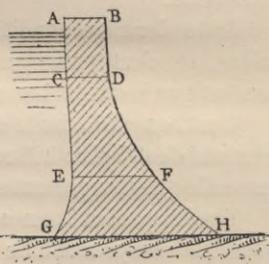


Fig. 34.

Il suit de là qu'à partir d'une certaine hauteur, pour laquelle la limite de charge sera atteinte sur le parement d'amont, il faudra donner à ce parement une forme courbe et le profil théorique définitif sera analogue à celui indiqué par la figure 33. Dans la ligne droite AC, les pressions vont en augmentant depuis zéro jusqu'à la limite de charge admise, tandis que tout le long des courbes CB et ADN, la pression est constamment égale à cette limite.

Le profil théorique que nous venons d'envisager doit, dans la pratique, être notablement modifié. On ne saurait, en effet, admettre au sommet une épaisseur nulle et, pour résister à l'action des vagues, il est nécessaire que le mur ait une certaine épaisseur au sommet. De plus, la hauteur du mur doit dépasser notablement le niveau de l'eau pour empêcher les vagues de le franchir.

Il s'ensuit que le profil pratique d'un mur de réservoir devra comporter d'abord, à la partie supérieure, un profil à parements verticaux et dans lequel les maçonneries ne seront soumises qu'à des pressions inférieures à la limite admise, et, sur tout le surplus de la hauteur, un profil se rapprochant autant que possible du profil d'égale résistance.

Cela conduit à un profil analogue à celui représenté sur la figure 34 et qui a été pratiquement réalisé pour la première fois au barrage du Furens, au Gouffre-d'Enfer, près de Saint-Etienne, par MM. Graeff et Delocre. D'ailleurs, quand on s'impose la condition de maintenir la courbe des pressions dans le

tiers médian du mur, c'est-à-dire quand on veut éviter les efforts de traction sur le parement d'amont, le profil est légèrement modifié et s'écarte un peu de la forme d'égalé résistance.

Nous n'avons considéré jusqu'ici les profils de barrage qu'au point de vue de leur résistance aux pressions verticales. Il est nécessaire de s'assurer en outre si les dimensions ainsi obtenues sont suffisantes pour que le mur ne puisse pas, sous l'influence de la poussée horizontale de l'eau, glisser sur sa base de fondation ou même sur l'une quelconque de ses assises.

La poussée horizontale F , qui tend à produire ce glissement, est égale à $\frac{\pi h^3}{2}$, π étant la densité du liquide et h la hauteur de ce liquide au-dessus du point considéré.

D'autre part, les résistances qui s'opposent à l'action de cette force sont : 1° le frottement qui se développe au contact des assises par suite de la pression exercée par la résultante P du poids du mur et des pressions verticales de l'eau ; 2° la force de cohésion due au mortier.

Pour que le glissement ne puisse pas avoir lieu, il faut que la force représentant la poussée horizontale soit plus petite que ces deux dernières.

Ordinairement on néglige la cohésion due au mortier et l'on admet que le glissement doit être empêché par le frottement seul, c'est-à-dire que l'on doit avoir :

$$F < Pf,$$

f' étant le coefficient du frottement.

On admet en général que $f = 0,75$, et, pour que la stabilité soit assurée, il suffit que la poussée horizontale reste inférieure aux trois quarts de la résultante verticale P .

Graphiquement, il faut que la courbe des pressions ne coupe aucune assise horizontale sous un angle dont la tangente trigonométrique soit inférieure à $0,75$.

Nous n'insisterons pas davantage sur les conditions théoriques auxquelles doivent satisfaire les murs destinés à créer une retenue d'eau. Cette question a été beaucoup étudiée pendant ces dernières années dans diverses publications, notamment dans les *Annales des Ponts et Chaussées* et le *Génie civil*¹.

D'autre part, la Commission de l'Hydraulique agricole a élaboré, non seulement une méthode, mais un type même de calcul de barrages, qui a été porté à la connaissance des ingénieurs de l'Administration par une circulaire ministérielle en date du 15 juin 1897. L'Administration exige que, dans les demandes d'autorisation qui lui sont présentées, les calculs de barrages soient dressés conformément aux indications contenues dans cette circulaire.

Plutôt que de nous étendre sur ces calculs, nous croyons donc qu'il sera

1. Les diverses théories sur la construction des barrages sont analysées dans notre ouvrage, *Etude théorique et pratique sur les barrages-réservoirs*. — Baudry et Cie, éditeurs, Paris, 1896.

plus intéressant de donner ici les profils d'un certain nombre des principaux barrages construits en France et à l'étranger, en tenant plus ou moins compte de cette théorie. Ainsi que nous le verrons, elle donne, en quelque sorte, à la coupe transversale de ces ouvrages une silhouette qui, suivant l'expression de M. Krantz, « rappelle celle d'un lutteur qui se prépare à recevoir une poussée et qui, bien affermi sur ses jambes, a porté l'une un peu en avant et fortement arc-bouté l'autre en arrière ».

Il est curieux de constater que dans certains anciens barrages, notamment celui de Grosbois (fig. 26), c'est le contraire qui a lieu, et que, au lieu de recevoir la poussée de face, ce barrage la reçoit pour ainsi dire dans le dos.

Nouveaux barrages français. — Le barrage du Furens (fig. 35), près de Saint-Etienne, dans lequel ont été, ainsi que nous l'avons déjà dit, inaugu-

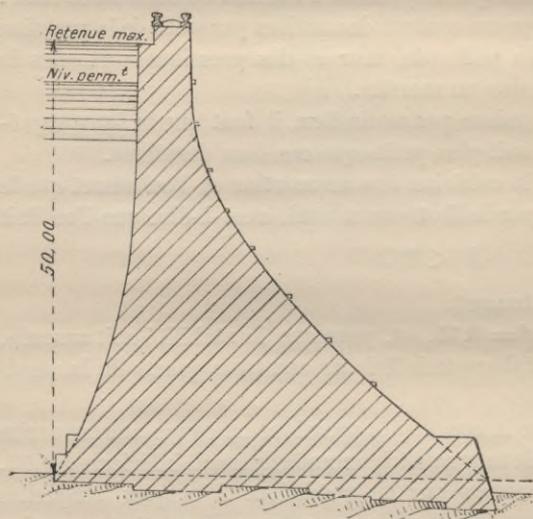


Fig. 35. — Barrage du Furens.

nous le verrons plus loin, un supplément de résistance, d'autre part parce que l'excellente maçonnerie qui le constitue peut supporter sans danger des pressions même plus considérables.

Le barrage du Ternay (fig. 36), près d'Annonay, de même que le précédent, a été calculé par la méthode de M. Delocre, et ce n'est qu'après sa construction, en recherchant l'influence qu'aurait sur sa stabilité une surélévation du niveau de la retenue, que son constructeur, M. Bouvier, a imaginé la méthode de calcul qui est aujourd'hui d'un emploi général.

Quoique établi d'après les mêmes formules que celui du Furens, le profil de ce barrage, qui a 35 mètres de hauteur, est beaucoup plus élancé, ce qui tient à ce que l'on a admis pour les maçonneries une pression-limite plus élevée.

gurées les nouvelles méthodes de calcul, a 54 mètres de hauteur totale. Il a été calculé pour que les maçonneries ne supportent pas une pression supérieure à 6^{kg},50 par centimètre carré, mais la méthode employée par M. Delocre pour faire ce calcul a été reconnue depuis insuffisante, et les pressions calculées par les méthodes de MM. Bouvier et Guillemain indiquent en certains points une pression de plus de 9 kilogrammes. Il n'en résulte, d'ailleurs, aucun inconvénient, d'une part parce que la forme courbe du barrage en plan lui donne, comme

Le barrage de Pont, qui n'a que 25 mètres de hauteur, se distingue des précédents en ce que son profil a été renforcé, de distance en distance, par des contreforts, solution qui n'est pas à imiter.

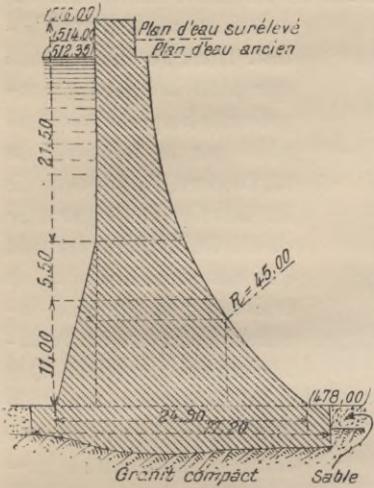


Fig. 36. — Barrage du Ternay.

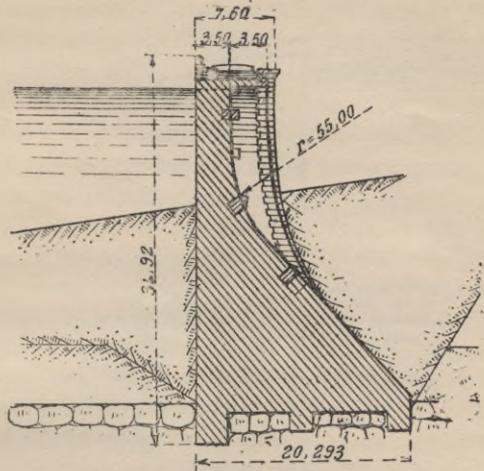


Fig. 37. — Barrage de la Mouche.

Le barrage de la Mouche (fig. 37), calculé d'après les formules rectifiées de M. Bouvier, présente plusieurs particularités intéressantes. Il supporte une route de 7 mètres de largeur, dont la moitié s'appuie directement sur la crête du barrage et l'autre moitié sur une sorte de viaduc constitué par une série de voûtes prenant appui sur son parement d'aval.

Quoique la hauteur maxima de la retenue, au-dessus du thalweg, ne soit guère que de 20 mètres, la hauteur totale du barrage s'élève presque à 35 mètres, par suite de la profondeur qu'il a fallu atteindre pour asseoir l'ouvrage sur un bon sol. Il en résulte que le cube des maçonneries vues n'est que de 44 p. 100 du cube total, et que 56 p. 100 de ce cube sont enfoncés dans le sol.

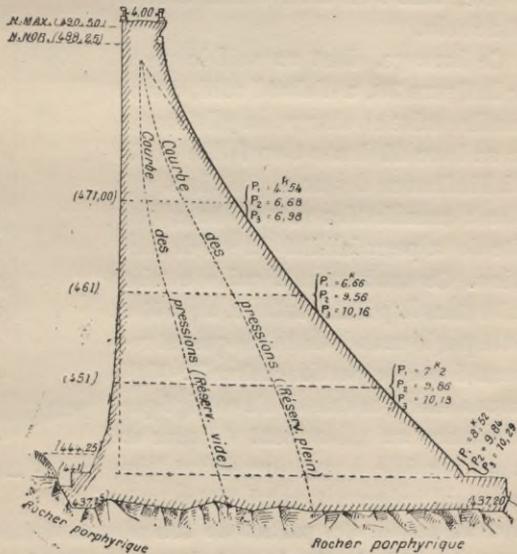


Fig. 38. — Barrage de Chartrain.

Le barrage de Chartrain (fig. 38), qui a 53 mètres de hauteur, a été terminé en 1892 ; c'est un de ceux dont le profil est le mieux étudié et le plus satisfaisant. De même que dans le précédent, du reste, la courbe des pressions ne sort pas du tiers médian et les pressions sur le parement d'aval ont été

calculées par trois méthodes. Dans les inscriptions que porte la figure, P_1 représente les pressions données par la méthode de M. Delocre, P_2 par celle de M. Bouvier et P_3 par celle de M. Guillemain. On voit que ces pressions vont en croissant ; la pression-limite admise est de 11 kilogrammes par centimètre carré. Le couronnement de l'ouvrage a été légèrement élargi, comme dans le barrage de la Mouche et dans plusieurs autres, de façon à faire passer une route.

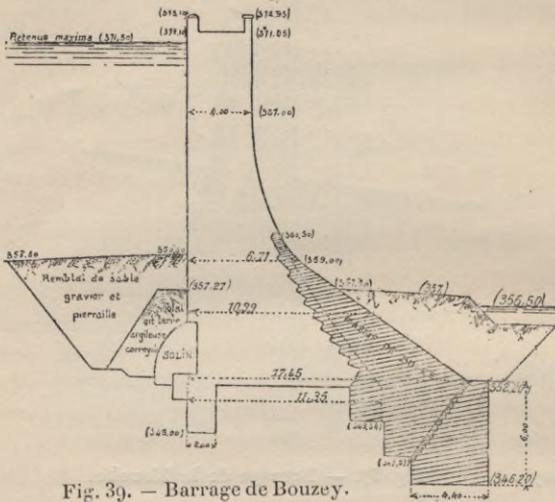


Fig. 39. — Barrage de Bouzey.

Barrage de Bouzey. — Le barrage de Bouzey, tristement célèbre par sa rupture, quoique de très peu d'années antérieur aux deux précédents, n'avait pas été, tant s'en faut, étudié avec le même soin.

Ce barrage, dont on voit le profil sur la figure 39, a d'abord subi, dès sa première mise en charge, un glissement sur sa base dû à son trop faible poids et à l'influence des sous-pressions qui se sont manifestées sur sa base, par suite de la perméabilité du sol de fondation. Ce mouvement, qui a atteint 0^m,30 dans la partie centrale, a pu être arrêté par le massif de butée qui est représenté par la partie hachurée. Malheureusement, ce massif n'a corrigé que la tendance au glissement du mur et n'a pas remédié à un autre défaut très grave qu'il présentait, celui d'être trop mince et d'avoir des parties de son parement d'amont soumises à des efforts d'extension. Ainsi qu'on le voit, dans le profil théorique du mur primitif (fig. 40), la courbe de pression, figurée en traits mixtes, sort notablement du tiers mé-

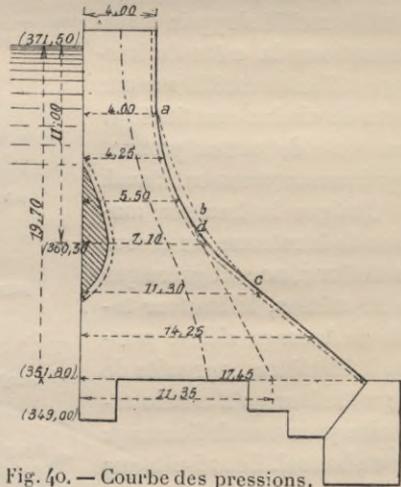


Fig. 40. — Courbe des pressions.

dian et toute la partie hachurée est soumise à des efforts d'extension qui atteignent $1^{\text{kg}},5$ par centimètre carré. Les maçonneries de Bouzey n'ayant pu supporter ces efforts sans se disloquer, il s'est produit, au niveau où l'effort d'arrachement était le plus grand, une fissure horizontale dans laquelle l'eau sous pression s'est introduite. L'effet de la pression de l'eau, qui pénétrait dans la fissure, sur la partie du mur située au-dessus de cette fissure, s'ajoutant aux efforts d'arrachement préexistants, cette fissure est allée constamment en augmentant de profondeur, diminuant ainsi d'autant l'épaisseur utile du mur, et reportant de plus en plus vers l'aval la courbe des pressions. A un certain moment, la profondeur de la fissure a été telle que la pression supportée par les maçonneries du parement d'aval a été trop considérable ; les matériaux se sont alors écrasés en certains points et, sous l'influence de la poussée de l'eau, la partie du mur située au-dessus de la fissure a été renversée.

Telle est, en résumé, la véritable cause de la rupture du barrage de Bouzey ; d'autres défauts existaient dans l'ouvrage, mais celle qui a entraîné sa ruine, c'est sa trop faible épaisseur dans sa partie moyenne. Si cette épaisseur avait été légèrement renforcée, suivant la ligne *abc* (fig. 40), par exemple, l'accident ne se fût sans doute pas produit.

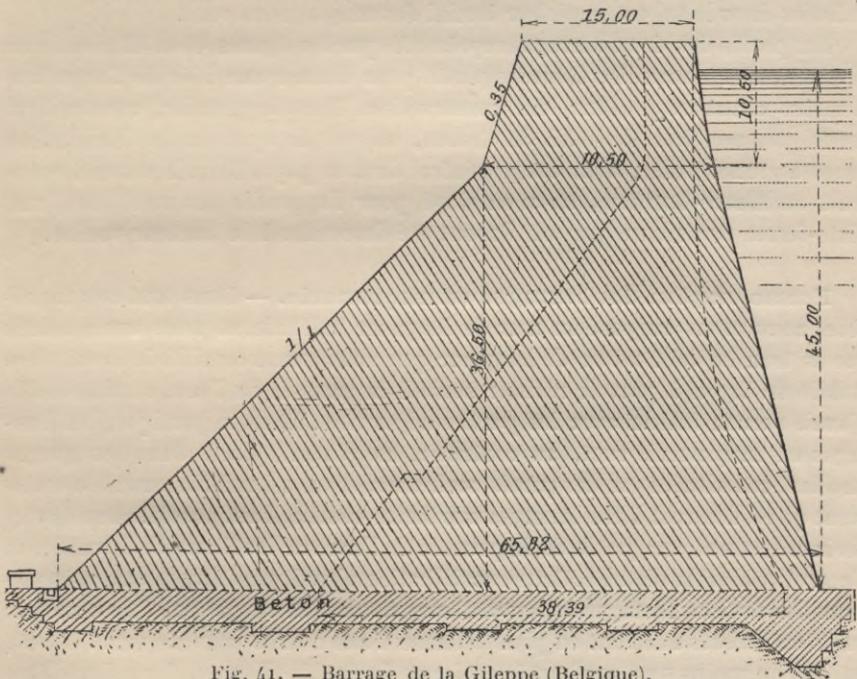


Fig. 41. — Barrage de la Gileppe (Belgique).

Nouveaux barrages étrangers. — Tous les barrages que nous venons de voir sont en France ; en voici maintenant quelques-uns construits à l'étranger.

Le barrage de la Gileppe (fig. 41) crée, par une retenue de 45 mètres de

hauteur, un réservoir pour l'alimentation de la ville de Verviers, en Belgique. Quoiqu'il soit postérieur au barrage du Furens, il présente une masse très exagérée de maçonnerie. On voit, en effet, sur la figure que le profil du Furens, figuré en pointillé, est complètement noyé dans celui de la Gileppe dont le cube par mètre courant atteint 1 738 mètres cubes, tandis qu'au Furens il n'est que de 781 mètres, c'est-à-dire moins de moitié. Il y a là une orgie de maçonnerie que rien ne justifie.

On peut faire le même reproche au *barrage du Vyrnwy* (fig. 42), en Angleterre, quoique dans une proportion beaucoup moindre.

Avec le *barrage de Fülbecke* (fig. 43), nous retrouvons un profil économique, adopté par le professeur Intze, qui a construit un grand nombre de barrages dans la Westphalie. Nous reviendrons plus loin sur certaines particularités de ce barrage.

La figure 44 représente la coupe du *nouveau barrage du Croton*, dont nous avons déjà vu la partie construite en terre. Cet ouvrage, à peine terminé, est actuellement le plus haut barrage en maçonnerie qui existe; il a 72 mètres de hauteur au-dessus des fondations, mais la retenue effective qu'il crée n'est que de 42 mètres. Comme dans celui de la Mouche, le volume des maçonneries enfouies dans le sol est supérieur à celui des maçonneries vues.

Les profils des deux barrages représentés par les figures 45 et 46 n'ont rien de particulier; nous les donnons plutôt pour donner une idée de l'organisation des chantiers pendant leur construction. Dans le premier, construit en Amérique, non loin de celui du Croton, on voit le système de derricks, ou grues à grande volée, d'un usage général dans ce pays. Dans le second, construit en Alsace-Lorraine, on a employé, pour l'approche des matériaux, une plate-forme supérieure par où ils ont été descendus à la hauteur voulue.

Forme en plan des barrages en maçonnerie. — Dans tout ce qui précède, nous avons supposé un mur de longueur indéfinie, et nous avons admis que la tranche de 1 mètre de longueur que nous avons considérée devait être établie de façon à pouvoir résister seule à la poussée de l'eau, comme si elle n'avait aucune liaison avec les parties adjacentes. Dans la pratique, les barrages en maçonnerie sont, au contraire, en général, placés dans des gorges étroites, constituées par des parois rocheuses, et on a immédiatement le sentiment qu'en donnant à ces barrages une forme courbe, il est possible de reporter horizontalement une partie de la poussée de l'eau sur les flancs de la vallée, et d'accroître ainsi la sécurité. Cette considération n'avait pas échappé aux constructeurs des anciens barrages espagnols, car nous avons vu que tous les ouvrages qu'ils ont laissés affectent en plan la forme d'une courbe convexe vers l'amont, ou tout au moins sont arc-boutés en forme de double chevron. Il y a lieu d'être surpris que les ingénieurs français, au moins jusque dans ces dernières années, n'y aient pas attaché plus d'importance et aient cru devoir implanter leurs murs de réservoirs suivant une seule ligne droite.

La forme rectiligne a évidemment l'avantage, sur la forme courbe ou poly-

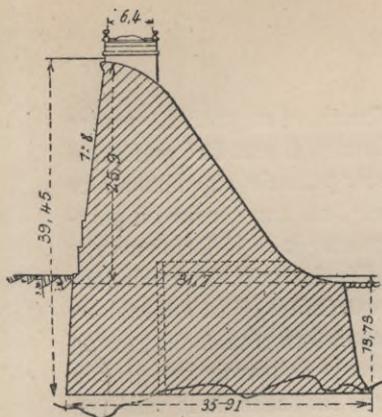


Fig. 42. — Barrage du Virnwy.

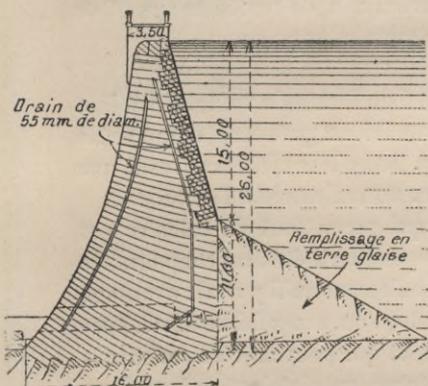


Fig. 43. — Barrage de Fülbecke (Allemagne).

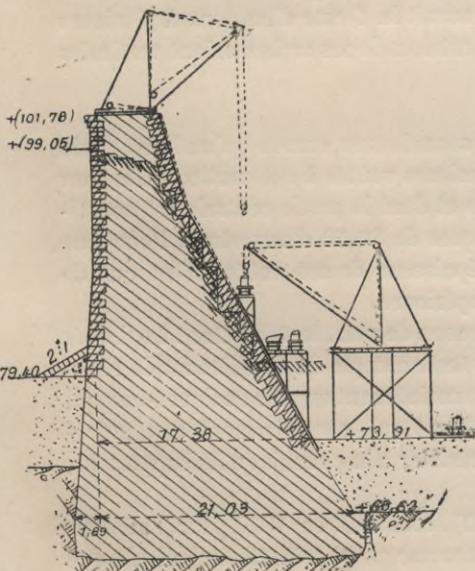


Fig. 45. — Barrage du Titicus (Etats-Unis).

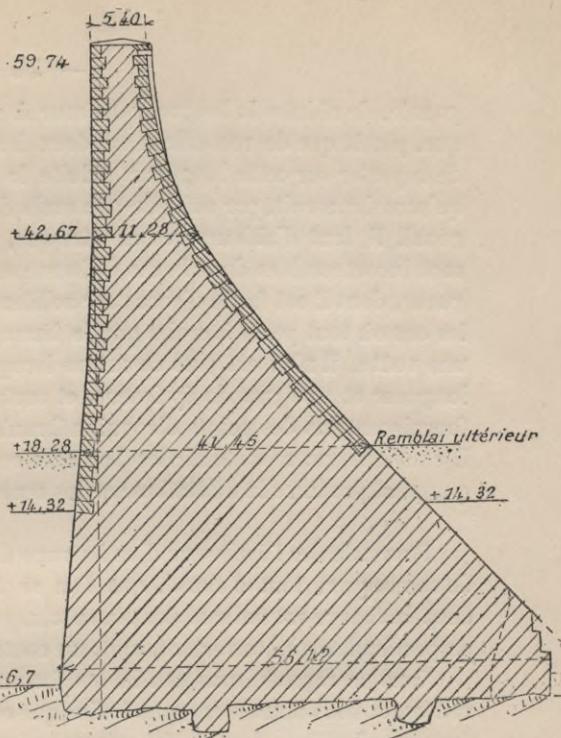


Fig. 44. — Barrage du Croton (Etats-Unis).

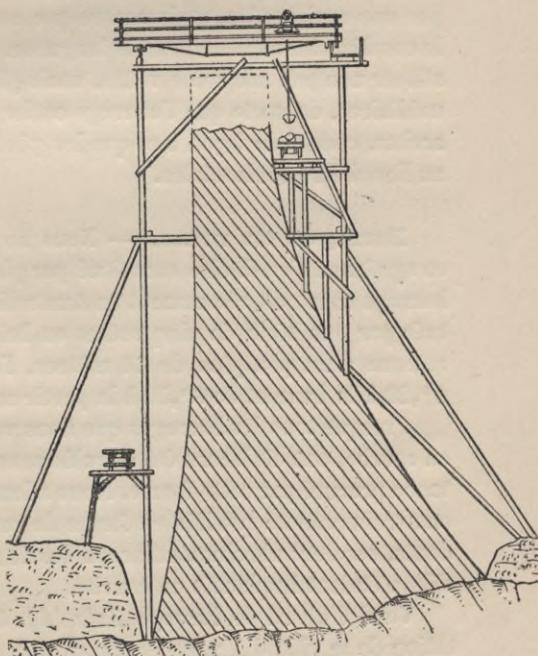


Fig. 46. — Barrage d'Alfed (Alsace).

gonale, de réduire la longueur du mur à son minimum, et on pourrait penser que, plutôt que de recourir à ces deux dernières formes, il peut être préférable de reporter sur cette longueur réduite le cube de maçonnerie supplémentaire qu'occasionnerait, par suite de son excès de longueur, un mur courbe ou polygonal. Il faut d'ailleurs reconnaître que, si les avantages de la forme courbe sont incontestables dans le cas de barrages de peu d'épaisseur et de peu de longueur, dont il est facile d'encastrement solidement les extrémités, c'est-à-dire dans les cas où tout porte à croire que le barrage se comportera réellement comme une voûte, il n'en est plus de même lorsque le barrage doit avoir une grande longueur et une grande épaisseur, et surtout lorsque les flancs de la vallée ne fournissent pas des points d'appui inébranlables. Cependant, même dans ce cas, il convient encore d'établir les barrages en courbe, afin de remédier aux effets que peut produire la dilatation sur les murs de grande longueur.

Pour calculer l'épaisseur d'un barrage disposé en forme de voûte, il y a lieu de remarquer, tout d'abord, que l'on se trouve ici en présence d'une voûte dont la charge est nulle et dont la surcharge, au lieu d'être dirigée suivant une perpendiculaire à l'ouverture, agit, au contraire, normalement à l'extrados.

Nous ne reproduirons pas ici les formules qui permettent de calculer ces voûtes, et nous nous bornerons à dire que cette question a été beaucoup étudiée dans ces dernières années. On a reconnu, non seulement qu'il y avait avantage à implanter de cette façon les ouvrages qui n'ont qu'un assez faible développement, 100 ou 150 mètres en crête, par exemple, et qui peuvent être constitués par une seule voûte, mais encore que ces avantages subsistaient, même dans le cas d'un barrage de grande longueur. Dans ce cas, il est nécessaire de constituer non pas une seule voûte, mais plusieurs s'appuyant sur des piles intermédiaires, de sorte que l'ouvrage entier aurait la forme d'un pont à plusieurs arches, couché de façon à ce que les génératrices de ses arches soient verticales au lieu d'être horizontales.

Barrages en voûte. — Nous ne connaissons encore qu'un barrage de ce système, c'est-à-dire constitué par plusieurs voûtes à axe vertical. C'est un barrage construit récemment en Australie et dont la partie centrale est constituée par une série de cinq voûtes en briques de 8^m,50 d'ouverture. Pour une retenue d'un peu plus de 11 mètres, l'épaisseur de ces voûtes n'est que de 4^m,20 à la base et de 0^m,50 à la partie supérieure.

Presque tous les barrages que nous venons de voir, tout en étant implantés en courbe, ont d'ailleurs été calculés sans tenir compte du supplément de résistance procuré par cette forme. Nous allons maintenant en voir quelques-uns qui ont vraiment été profilés en forme de voûte et qui, contrairement aux précédents, seraient absolument incapables de résister à la poussée qu'ils supportent, s'ils n'étaient implantés en courbe.

Voici d'abord le *barrage Zola* (*fig. 47*), construit en 1850 pour l'alimentation de la ville d'Aix, en Provence. Il barre une gorge très étroite qui n'a que

7 mètres de largeur à la base et 67 mètres à la hauteur du couronnement de l'ouvrage, c'est-à-dire à 38 mètres de hauteur au-dessus du lit. Il est implanté suivant une courbe de 48 mètres de rayon, il n'a que $10^m,50$ d'épaisseur à la base; aussi, non seulement la courbe des pressions sort-elle du tiers médian du mur, mais elle sort même complètement du mur, ainsi qu'on le voit sur la figure; ce mur serait, par suite, certainement renversé s'il ne résistait pas comme une voûte.

Le barrage de la *Sweetwater* (fig. 48), en Californie, n'a que $13^m,70$ d'épaisseur à la base pour une hauteur de plus de 27 mètres et n'a une résis-

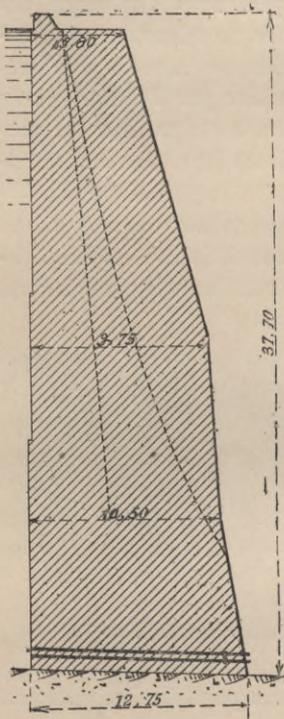


Fig. 47.
Barrage Zola.

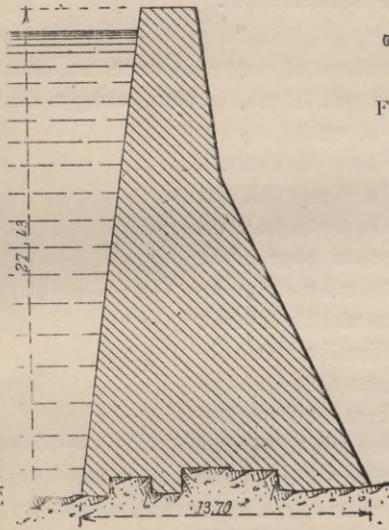


Fig. 48.
Barrage de la Sweetwater.

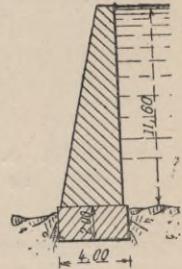


Fig. 49. — Barrage
du Rio-Grande.

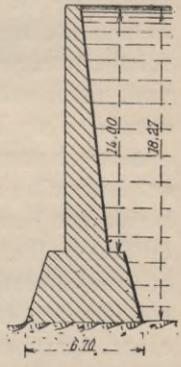


Fig. 50. — Barrage
de Bear Valley.

tance suffisante que parce qu'il est établi en forme de voûte, comme on le voit sur le plan (fig. 51).

Le barrage de *Bear Valley* (fig. 49), également en Californie, est encore beaucoup plus hardi; pour une hauteur totale de près de 18 mètres, il n'a que $6^m,70$ d'épaisseur à la base; à 14 mètres de profondeur, cette épaisseur n'est que de $2^m,57$ et au couronnement de $0^m,97$. Le plan (fig. 52) montre le rayon de la courbe suivant laquelle il est implanté. A 5 mètres au-dessous du niveau de l'eau, la courbe des pressions sort déjà du mur.

Enfin le barrage du *Rio-Grande* (fig. 50), dans l'isthme de Panama, qui pour une retenue de 12 mètres n'a que 1 mètre d'épaisseur en crête et 3^m,60 à la base.

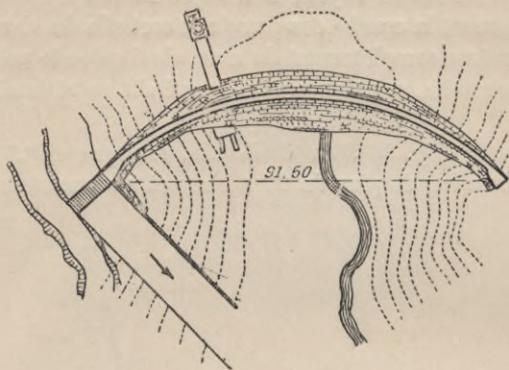


Fig. 51. — Plan du barrage de la Sweetwater.

Revêtements contre les infiltrations. — Quel que soit le soin apporté dans l'exécution des maçonneries d'un barrage et la qualité des matériaux qui y sont employés, sous l'influence des fortes pressions, ces maçonneries se laissent toujours pénétrer par l'eau, à partir d'une certaine hauteur au-dessous du niveau de la retenue. L'emploi d'enduits divers, ciment, coaltar, etc., sur

la face du parement amont peut réduire ces infiltrations mais non les faire disparaître complètement. Même dans les barrages construits avec le plus de soin, on constate qu'à 20 ou 30 mètres au-dessous du niveau de l'eau, il se produit, sur la face aval, des suintements, peu importants, il est vrai, mais suffisants pour avoir causé de l'inquiétude à certains ingénieurs, notamment à M. Bouvier qui les avait particulièrement observés aux barrages du Furens et du Ternay. Il craignait qu'à la longue ces infiltrations, qui dissolvent toujours une certaine quantité de chaux, n'eussent pour effet d'appauvrir les mortiers, au point de diminuer leur résistance d'une façon dangereuse.

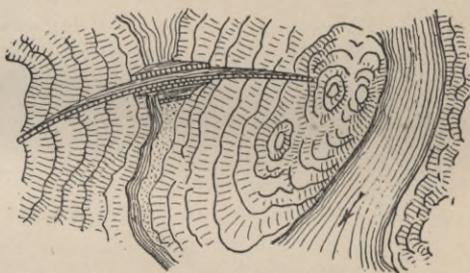


Fig 52. — Plan du barrage de Bear Valley.

Des observations plus récentes et plus précises ont heureusement permis de constater que ces craintes ne sont, en général, pas justifiées.

Il est une autre cause pour laquelle les infiltrations dans la maçonnerie d'un barrage sont à redouter : ce sont les effets de sous-pression qu'elles peuvent y produire et qui, comme nous l'avons vu, peuvent mettre la stabilité de l'ouvrage en danger. Pour soustraire les barrages à cette cause de ruine, M. Maurice Lévy avait proposé, dans sa communication à l'Académie des sciences du 5 août 1895, de les protéger par une sorte d'écran appliqué contre la face amont du barrage et se trouvant seul en contact avec l'eau. Le barrage proprement dit n'aurait alors plus qu'à fournir la résistance, l'étanchéité étant

obtenue par l'écran. Un collecteur situé à la partie inférieure aurait recueilli et conduit au dehors les infiltrations qui auraient pu traverser l'écran, de sorte qu'aucune pression n'aurait pu s'établir dans le faible intervalle séparant cet écran de la face amont du barrage.

Aucun barrage du système proposé par M. Maurice Lévy n'a encore été construit, à notre connaissance du moins, mais le service des Ponts et Chaussées a fait récemment un intéressant essai qui dérive directement de ce système.

C'est un revêtement d'une partie du barrage de la Mouche par une cloison en béton armé. Cette cloison (*fig. 53 à 55*), dont l'épaisseur est de 0^m,12 à la

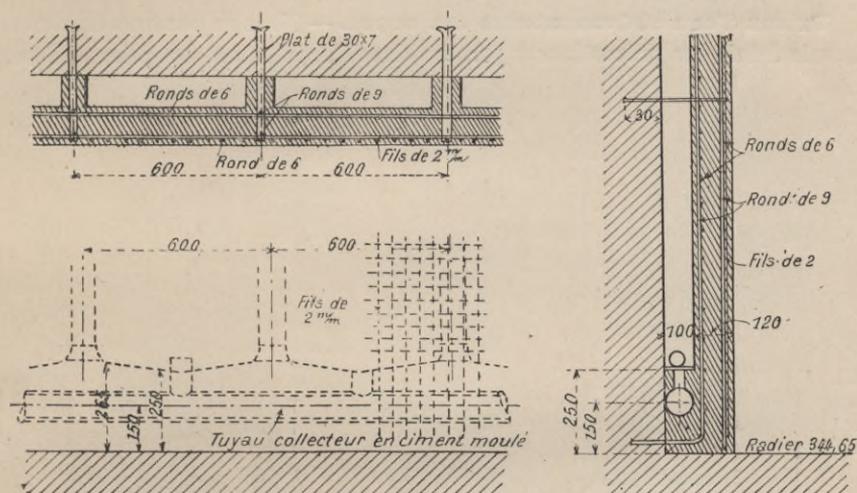


Fig. 53 à 55. — Revêtement par cloison en béton armé du barrage de la Mouche.

base et de 0^m,08 à la partie supérieure, est séparée du mur par un vide de 0^m,10 et est appuyée contre lui par des nervures de 0^m,08 de largeur espacées de 0^m,60, d'axe en axe. Dans ces nervures sont noyées des fers plats de scellement, ancrés dans la maçonnerie, et la cloison elle-même est armée sur ses deux faces par des fers ronds placés horizontalement, dont le diamètre variable est croissant avec la hauteur d'eau, et, dans le sens vertical, par des fils de fer de 0^m,002 formant avec les précédents un grillage à mailles de 0^m,05.

Un collecteur en ciment moulé recueille les eaux à la partie inférieure et les conduit dans la bonde de fond du réservoir.

Concurremment avec ce système, on a essayé, sur le même barrage, un système d'étanchement consistant en un enduit drainé appliqué sur la face du mur en contact avec l'eau et imité du procédé employé par les officiers du Génie à l'intérieur des casemates.

Ces deux procédés ont donné des résultats également satisfaisants.

Dans le barrage de Fûelbecke, que nous avons vu plus haut (*fig. 43*), on a

garanti le corps du barrage contre les infiltrations par une sorte de drain ménagé dans la maçonnerie, dans la partie supérieure, et par un massif en terre glaise, dans la partie inférieure.

Ces divers procédés de protection contre les infiltrations ont une grande utilité dans les barrages de grande longueur, mais nous ne croyons pas qu'il en soit de même dans ceux construits dans des vallées étroites auxquels, pour diverses raisons, on est toujours obligé, en France du moins, de donner des épaisseurs beaucoup plus grandes que celles réellement nécessaires pour assurer leur stabilité.

Prises d'eau et évacuateurs des crues. — Nous ne pouvons entrer ici dans le détail des précautions à prendre dans l'installation des prises d'eau ;

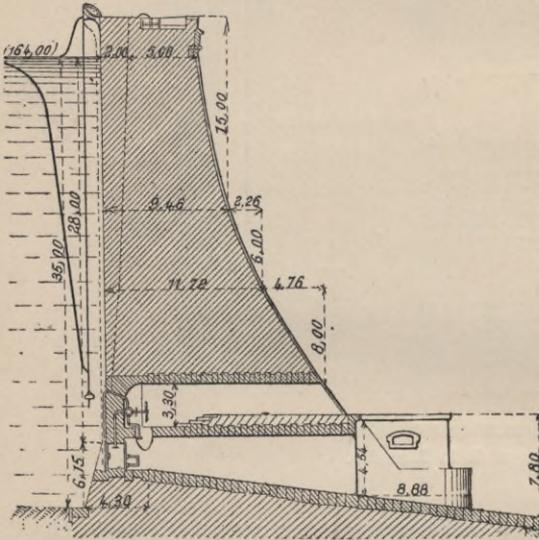


Fig. 56. — Barrage du Hamiz
(Algérie).

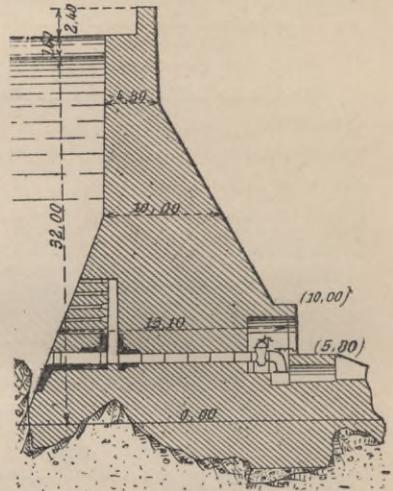


Fig. 57. — Barrage de l'Habra
(Algérie).

nous nous bornerons à montrer les dispositions employées dans quelques barrages, soit pour prendre l'eau dont on doit se servir, soit pour évacuer les eaux excédentes et les crues.

Dans la figure 56 représentant le *barrage du Hamiz*, en Algérie, on voit la coupe de l'évacuateur employé pour effectuer les chasses avec lesquelles on s'efforce, avec assez peu de succès d'ailleurs, d'empêcher le remplissage du réservoir par les vases et limons.

Dans la coupe du *barrage de l'Habra* (fig. 57), également en Algérie, on voit que la prise d'eau s'effectue par un tuyau dont la vanne est placée à l'aval du barrage et peut être manœuvrée sans l'emploi des grandes tiges auxquelles il

faut recourir lorsque cette vanne est placée sur la face amont du barrage, comme cela a lieu au *barrage de la Mouche* (fig. 58).

Cette dernière prise d'eau présente l'avantage de ne pas affaiblir la résistance du mur tout en permettant de prendre l'eau à divers niveaux, suivant la hauteur de l'eau dans le réservoir, de façon à n'avoir à ouvrir que des vannes supportant une faible pression. Ainsi qu'on le voit sur la figure ci-contre, elle est constituée par une demi-tour accolée au parement d'amont et ayant extérieurement la forme d'un demi-décagone. Sur les faces extérieures se trouvent les trois vannes de prise permettant l'entrée de l'eau dans le puits et sur la face plane du puits deux vannes qui permettent son évacuation au dehors. On a ainsi une double garde et, en cas d'accident, on pourrait fonctionner avec les vannes intérieures seulement.

En principe, il faut autant que possible éviter les ouvertures aussi bien dans les barrages en maçonnerie que dans les digues en terre, car elles sont une cause de faiblesse en détruisant l'homogénéité de la masse et en tendant à produire des dislocations pendant les tassements.

Dans certains cas, il peut cependant être impossible de faire autrement que de cribler le mur par un très grand nombre d'ouvertures. C'est ce que l'on a dû faire dans le grand barrage qui vient d'être construit sur le Nil, à Assouan, près de la première cataracte.

La capacité du réservoir créé par ce barrage est de 1 milliard de mètres cubes, capacité qui pourrait être doublée si on ne craignait pas de noyer le temple de Philæ, situé dans une île un peu en amont.

Ce barrage (fig. 59) a 32 mètres de hauteur au-dessus des fondations et un peu plus de 20 mètres au-dessus du lit. On a prévu une surélévation possible de 8 mètres qui suffirait pour doubler la capacité du réservoir. La longueur totale de l'ouvrage est de 1800 mètres.

Il est percé de 140 pertuis supérieurs, de 7 mètres sur 2 mètres, et de 40 pertuis inférieurs, de 3^m,50 sur 2 mètres. La surface totale de ces ouvertures est de 2230 mètres carrés, suffisante pour laisser passer les crues du Nil. Les crues maximum, de 13400 mètres cubes, seront débitées avec une vitesse de 6^m,10. Les pertuis sont fermés au moyen de vannes Stoney.

La dépense totale du barrage, s'il était exécuté avec sa plus grande hauteur,

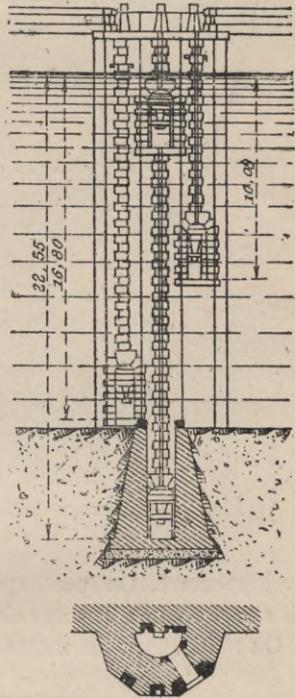


Fig. 58. — Prise d'eau du barrage de la Mouche.

serait de 84 millions, soit environ 22 000 francs par million de mètres cubes emmagasinés, soit un peu plus de 0^f,02 par mètre cube.

Ce chiffre est à comparer à celui obtenu sur nos petits cours d'eau d'Europe, où le prix du mètre cube emmagasiné varie généralement entre 0^f,20 et 1 franc.

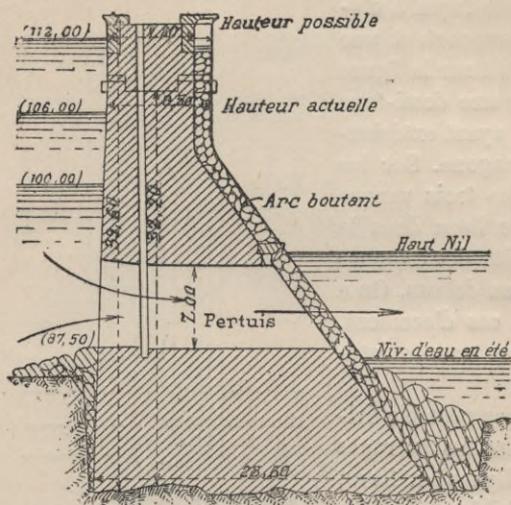


Fig. 5j. — Barrage du Nil, à Assouan.

En général, on évite de placer ainsi les évacuateurs des crues dans le corps du barrage et même, chaque fois qu'on le peut, on les constitue par des déversoirs de superficie dont le fonctionnement est toujours assuré et qui ne nécessitent aucun personnel.

Dans beaucoup de cas, surtout dans les gorges étroites, ces déversoirs sont difficiles à placer; car, si le débit à évacuer est considérable, ils exigent un grand

développement. On peut quelquefois les dédoubler en deux, comme on le voit sur le plan du barrage de la Sioule (fig. 60).

On remarquera en même temps la disposition toute particulière de l'usine

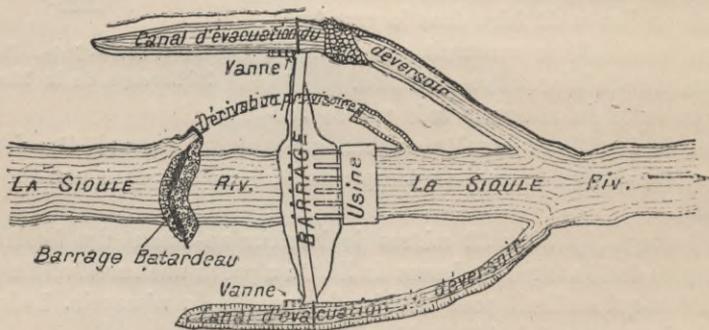


Fig. 60. — Plan du barrage en construction sur la Sioule (Puy-de-Dôme).

dans le lit même de la rivière, immédiatement en aval du barrage (fig. 61).

Dans certains cas, l'étroitesse de la vallée est telle que cette solution serait trop onéreuse, et on peut alors, si le barrage ne doit pas avoir une très grande hauteur, admettre le déversement des crues par-dessus le barrage, en prenant

toutefois certaines précautions. C'est ce qui a été fait au *barrage d'Avignonet*, sur le Drac, visité par une partie des membres du Congrès.

Si la hauteur du barrage est très grande, 50 mètres par exemple, et le débit considérable, le déversement des crues par-dessus la crête n'est plus admissible. Si, d'autre part, la disposition des lieux empêche l'établissement de déversoirs de superficie, on peut être conduit, comme nous l'avons été pour un barrage projeté, également sur le Drac, à employer des évacuateurs souterrains. Pour

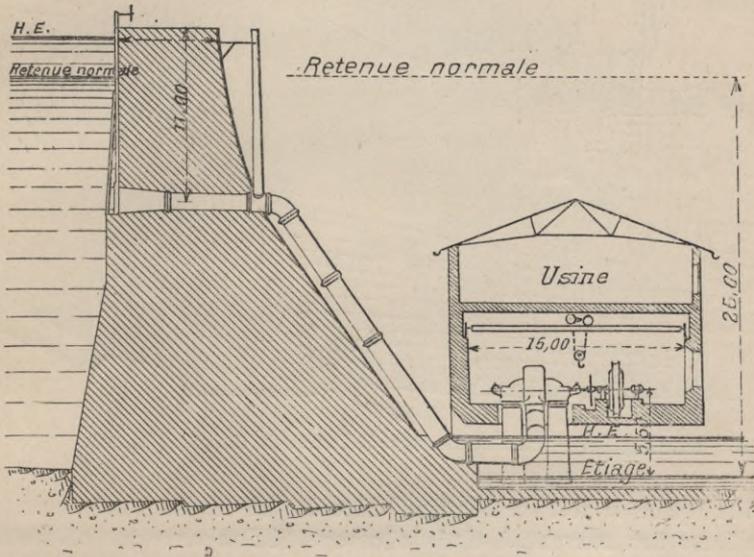


Fig. 61. — Coupe du barrage et de l'usine hydro-électrique de la Sioule.

débiters les crues, on emploierait deux grands tunnels dans lesquels l'eau serait amenée par des puits verticaux, puisant l'eau à la surface et fonctionnant comme tuyaux pleins avec toute la charge d'eau, dès que le niveau de l'eau dans le réservoir atteindrait une certaine hauteur. On aurait ainsi des évacuateurs fonctionnant automatiquement, sans le secours d'aucun personnel, et ne comportant la manœuvre d'aucun engin.

Nous n'insisterons pas davantage sur cette solution, car on la trouvera exposée avec détails dans une autre partie des comptes rendus du Congrès (*Mémoire de M. Gueymard sur les Forces hydrauliques du Haut-Drac*).

Si la hauteur de la retenue est faible et le débit très considérable, on peut avoir avantage à débiter les crues par une série de vannes de fond. C'est ce qui a été fait à l'usine de Chèvres, près de Genève, sur le Rhône. Le barrage de retenue a été constitué par une série de six vannes équilibrées de 10 mètres de largeur, s'appuyant sur des piles en maçonnerie (*fig. 62*). En levant ces vannes, les eaux excédantes s'écoulent, sous une charge de 5 ou 6 mètres, et

même plus, avec une très grande vitesse, de sorte qu'une section assez limitée suffit pour évacuer un très gros débit.

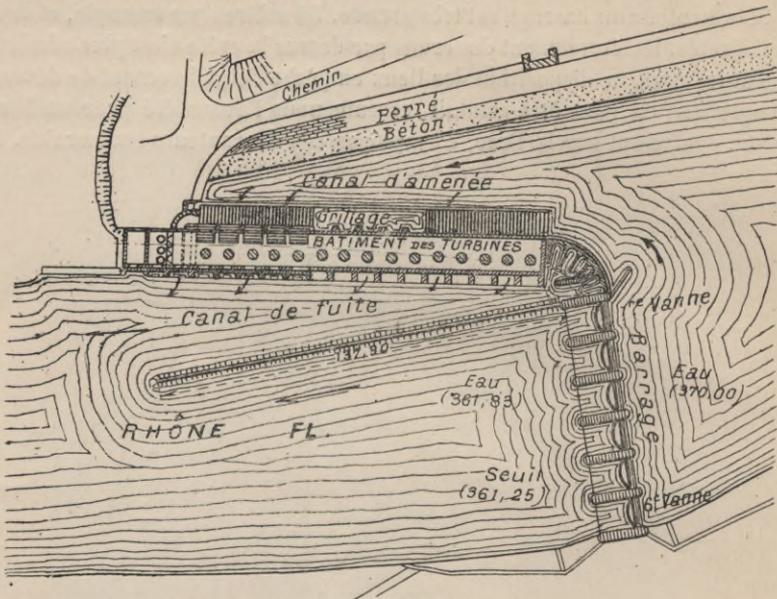


Fig. 62. — Plan du barrage de l'usine de Chèvres (Suisse).

Ainsi qu'on le voit sur le plan, l'usine de Chèvres est située, comme cela a d'ailleurs lieu souvent, à côté du barrage. Si l'on ouvre partiellement deux des vannes du barrage, en laissant fermée une vanne intermédiaire, il se pro-

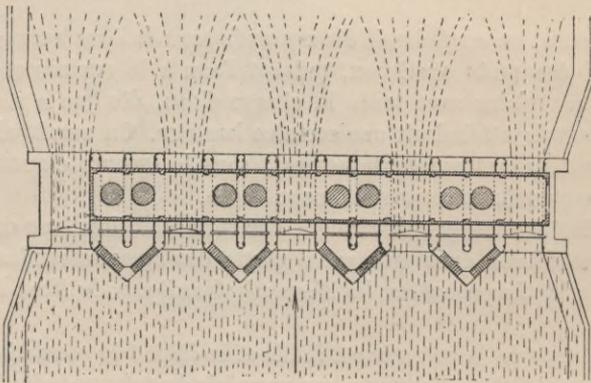


Fig. 63. — Plan d'une usine-barrage, système Saugey.

duit, devant cette dernière, une assez forte dénivellation. Ce fait se conçoit aisément, car il est dû à ce que l'eau sortant des vannes ouvertes avec une

très grande vitesse aspire celle qui se trouve dans la partie calme et détermine ainsi un abaissement de niveau en ce point.

M. Saugey, directeur de l'usine de Chèvres, propose d'utiliser cette dénivellation pour augmenter la hauteur de chute utilisable, en faisant déboucher dans les endroits dénivelés les canaux de fuite des turbines. Pour cela, il propose d'établir les usines, non plus distinctes des barrages, mais au-dessus de ces ouvrages ou plutôt faisant corps avec eux, les turbines étant placées dans les intervalles réservés entre les vannes (*fig.* 63). C'est là une disposition qu'il serait intéressant de voir mettre en pratique.

Il ne nous paraît pas possible de tirer une conclusion un peu précise des divers procédés de construction de barrages que nous venons de passer rapidement en revue. A notre avis l'on pourrait sans doute apporter, dans la plupart des cas, de sérieuses économies dans la construction des barrages en maçonnerie en ne leur donnant pas, inutilement, comme cela a lieu quand ils doivent être établis en forme de voûte dans des gorges étroites, une épaisseur aussi grande que s'ils devaient être rectilignes et avoir une très grande longueur. Sans même qu'il soit besoin de la théorie pour le démontrer, on a immédiatement le sentiment qu'un barrage qui se trouve établi en forme de voûte dans une gorge qui n'a que quelques mètres de largeur à la base et une centaine au sommet, ne se trouve nullement dans les mêmes conditions de résistance qu'un barrage tel que celui de Bouzey, par exemple, qui avait 500 mètres de longueur en ligne droite.

Malheureusement, la catastrophe produite par la rupture de ce dernier a rendu l'Administration encore plus prudente et tout porte à croire que, quoique les calculs prescrits par la circulaire ministérielle du 15 juin 1897 conduisent à des épaisseurs exagérées pour les barrages en courbe de peu de longueur, l'application de cette circulaire continuera néanmoins à être exigée.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

5. 61

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA



L. inw.

33092

Kdn., Czapskich 4 — 678. 1. XII. 52. 10.000

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000305738