

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 87 (1961)
Heft: 21

Artikel: Aménagement du bassin de l'Indus: en marge des grands travaux mondiaux
Autor: Rumley, Jean
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-65050>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)
de la Section genevoise de la S.I.A.
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole
polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: † J. Calame, ing. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève

Membres:

Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Groscurin, arch.; E. Martin, arch.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »

Président: D. Bonnard, ing.
Membres: M. Bridel; J. Favre, arch.; R. Neeser, ing.; A. Robert, ing.;
J. P. Stucky, ing.

Adresse: Avenue de la Gare 10, Lausanne

RÉDACTION

Vacat

Rédaction et Editions de la S. A. du « Bulletin technique »

Tirés à part, renseignements

Avenue de Cour 27, Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 28.—	Etranger	Fr. 32.—
Sociétaires	»	» 23.—	»	» 28.—
Prix du numéro	»	» 1.60		

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,
N° II 57 75, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, changements
d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29,
Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:

1/1 page	Fr. 320.—
1/2 »	» 165.—
1/4 »	» 85.—
1/8 »	» 42.50

Adresse: Annonces Suisses S. A.

Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales



SOMMAIRE

Aménagement du bassin de l'Indus, par Jean Rumley, ingénieur EPUL.

Etude comparative des coques de révolution à génératrice rectiligne et à épaisseur de paroi constante (suite et fin), par

J. Tâche, ingénieur EPUL aux Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey S.A.

Bibliographie. — Divers. — Les congrès.

Documentation générale. — Documentation du bâtiment. — Nouveautés. Informations diverses.

EN MARGE DES GRANDS TRAVAUX MONDIAUX

AMÉNAGEMENT DU BASSIN DE L'INDUS

par JEAN RUMLEY, ingénieur EPUL¹

Le 19 septembre 1960, l'Inde et le Pakistan signaient à Karachi un traité sur le partage des eaux de l'Indus et de ses affluents. D'une importance vitale pour l'avenir du Pakistan, ce traité résout d'une part une situation politique qui était restée très tendue depuis le partage de l'Empire des Indes et, d'autre part, va permettre un aménagement grandiose de l'irrigation, le développement de l'agriculture ainsi que la production d'énergie hydro-électrique.

Le rôle des eaux himalayennes dans l'économie pakistanaise et indienne

L'Indus prend sa source dans les hauteurs himalayennes, sur territoire tibétain. Il coule d'abord d'est en ouest, puis tourne au sud, traverse tout le Pakistan de l'Ouest, pour atteindre la mer d'Oman après un parcours de 2900 km. A l'est, le fleuve est grossi par d'importants affluents: le Jhelum, le Chenab, le Ravi, le

Sutlej et le Beas, qui prennent naissance soit au Cachemire, soit en Inde (fig. 1). La vallée de l'Indus, avec des précipitations inférieures à 25 cm par an en moyenne, serait un désert sans l'apport des eaux descendues de l'Himalaya et sans l'irrigation développée depuis les temps antiques déjà. Actuellement, un important réseau de canaux et de barrages en rivière, construits surtout sous l'égide des Anglais, irriguent une superficie de 120 000 km² et assurent l'existence à 40 millions de Pakistanais et à 10 millions d'Indiens. Tel qu'il est conçu, le système ne peut pas être agrandi outre mesure; les rivières ont un régime saisonnier très marqué (crues pendant la mousson d'été et la fonte des neiges, débit d'étiage en hiver); il n'y a aucune retenue naturelle ou artificielle, l'eau doit être utilisée comme elle coule et la plus grande partie s'écoule dans la mer.

A ces questions hydrauliques sont venues se greffer d'autres difficultés. En particulier, le manque de drainage approprié a élevé le niveau de la nappe phréatique et a forcé le sel minéral contenu dans le sous-sol à

¹ Ingénieur chez Tippetts-Abbott-McCarthy-Stratton (TAMS), New York.

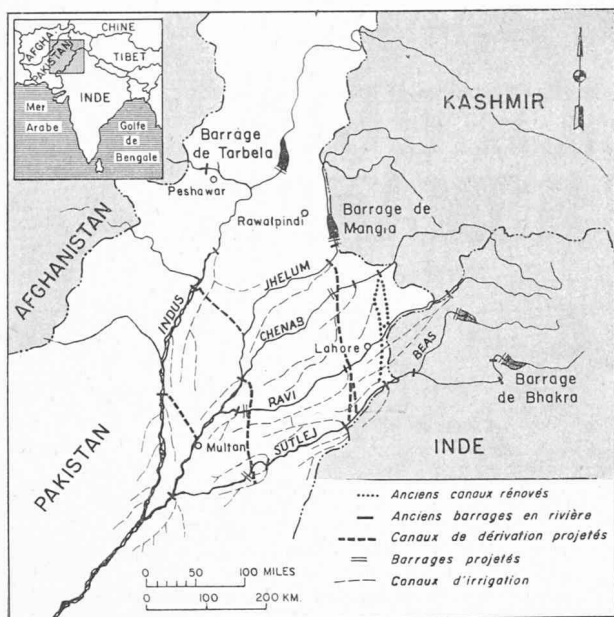


Fig. 1. — Le bassin de l'Indus.

monter en surface, condamnant ainsi 500 km² de terres cultivables. D'autre part, les populations tant indiennes que pakistanaises s'accroissent rapidement ; il faut donc assurer un développement à longue échéance du bassin de l'Indus qui mette ces peuples à l'abri de famines temporaires ou chroniques.

Problème du partage des eaux de l'Indus

Aucun étonnement que les eaux de l'Indus soient très recherchées. Au temps des Indes britanniques, les provinces du Punjab à l'amont du fleuve et de Sind à l'aval se les disputaient. Après le partage de la colonie anglaise en 1947, la situation s'aggrava entre les deux nouveaux pays, l'Inde et le Pakistan, toujours à propos du partage des eaux du bassin de l'Indus. Le problème se compliquait du fait que l'Inde et le Cachemire avaient la possession de tous les cours supérieurs des affluents est de l'Indus, et, par conséquent, le pouvoir d'utiliser pour leur propre irrigation, en hiver surtout, tout le débit de ces rivières et menacer le Pakistan de sécheresse. La récente construction du barrage de Bhakra, sur le Sutlej, en Inde (à l'heure actuelle, le quatrième barrage du monde pour la hauteur), aggrave encore plus la situation.

Pour mettre fin à la dispute, il fallait concevoir un plan d'ensemble pour l'utilisation des eaux du bassin de l'Indus. L'Organisation des Nations Unies, et tout particulièrement la Banque Internationale pour la Reconstruction et le Développement, s'appliquèrent pendant dix ans à élaborer ce plan. Après de multiples difficultés et remaniements, il fut décidé d'attribuer toutes les eaux des trois affluents inférieurs, le Ravi, le Sutlej et le Beas, à l'Inde, tandis que le Pakistan jouirait des droits sur les eaux des deux tributaires supérieurs : le Jhelum et le Chenab. Ce système de partage prive d'eau la plus grande partie du réseau d'irrigation pakistanais. Pour rétablir l'équité, le plan prévoit de gigantesques travaux de génie civil, de façon à dériver les eaux des affluents supérieurs dans le sys-

tème d'irrigation pakistanais, actuellement nourri par les eaux des affluents inférieurs.

Les travaux de génie civil

Jamais dans l'histoire de l'humanité n'auront été entrepris pareils travaux pour dériver sur de telles distances une aussi grande quantité d'eau. Que l'on s'imagine sept grands canaux dont les débits varient de 310 m³/sec à 620 m³/sec, aussi importants que le Rhône à Genève ou la Seine à Paris. Ces sept rivières artificielles totaliseront une longueur de 625 km. Le volume d'eau transféré annuellement sera de l'ordre de 17 milliards de m³.

De plus, deux grands barrages réservoirs prendront place dans ce complexe hydraulique : l'un, nommé Mangla, sur le Jhelum, et l'autre, Tarbela, sur l'Indus. Ces deux grands barrages augmenteront la capacité d'irrigation et permettront la production de milliards de kWh par an pour la future économie de la région.

Pour compléter et améliorer ce développement, il est prévu 2500 puits filtrants qui régulariseront la nappe phréatique et corrigeront la salinité du sol.

Le problème financier

Actuellement le fonds pour le développement de l'Indus, administré par la Banque Mondiale ou Banque Internationale pour la Reconstruction et le Développement, prévoit 1 milliard et 70 millions de dollars de travaux, dont 870 millions au Pakistan et 200 millions en Inde ; mais avec des extensions futures, le coût total pourrait atteindre 2 milliards de dollars. Seul, le Pakistan ne pourrait entreprendre de pareils travaux sans l'aide financière étrangère. Les Etats-Unis financeraient de plus d'un demi-milliard de dollars le coût des travaux, soit sous forme de dons, soit sous forme d'emprunts en dollars ou en roupies. L'Inde allouera au Pakistan une redevance équivalant à 175 millions de dollars. A titre d'aide aux pays sous-développés, la Grande-Bretagne, l'Allemagne de l'Ouest, le Canada, l'Australie et la Nouvelle-Zélande prêteront environ 100 millions de dollars. Les travaux s'échelonneront sur plus de dix années.

Aspects techniques

Depuis plusieurs années déjà, le Pakistan est envahi par des experts étrangers : ingénieurs-conseils, topographes, géologues, hydrologues, sondeurs, etc. A cette première vague d'ingénieurs viennent s'adjoindre aujourd'hui les entreprises de divers pays qui s'affrontent en compétition internationale. Les premiers contrats sont prêts à être passés ; huit groupements se sont qualifiés pour soumissionner la construction de la digue de Mangla. Parmi le lot des entreprises désignées se trouvent principalement les grandes compagnies de construction américaines, mais aussi européennes : française, italienne, danoise, et une grande entreprise suisse.

Quel peut être l'ordre de grandeur des travaux impliquant une dépense de plus d'un milliard de dollars ? Il est bien difficile de se l'imaginer : deux grands barrages en terre totalisant un volume de plus de 200 millions de m³, chacun avec des évacuateurs capables de décharger quelque 34 000 et 57 000 m³ d'eau par

seconde. Le volume de travaux des canaux de dérivation est du même ordre de grandeur, puisqu'il faut compter avec 500 000 m³ d'excavation par km, soit au total 310 millions de m³ de terrassement pour les 625 km de canaux. Toutes ces constructions revêtent une telle importance technique qu'il vaut la peine d'en donner une description détaillée.

Les canaux de dérivation

Le transfert de l'eau des rivières occidentales vers les rivières orientales exige la construction de sept grands canaux et la rénovation de trois anciens. Il est spécifié que les nouveaux aqueducs seront construits avec les techniques modernes de mécanisation, afin d'en assurer l'achèvement rapide. Il est en effet probable que les méthodes de construction couramment utilisées au Pakistan, travail à la main et force animale, seraient meilleur marché, mais beaucoup trop lentes. Cette façon de procéder sera toutefois utilisée pour la réparation des vieux canaux, qui font également partie du Traité sur les eaux du bassin de l'Indus.

Les nouveaux canaux présenteront des difficultés d'exécution telles que longues tranchées, profondes de plus de 15 m, ou mauvais terrains à traverser. Ils seront creusés suffisamment au-dessous de la nappe phréatique afin qu'ils agissent comme drainage et réduisent la salinité du sol. Les revêtements en béton ou en asphalte seront évités autant que possible, à cause de leur prix élevé. Il y aura environ 400 ouvrages annexes à construire, dont 14 ponts-rails, 30 ponts pour routes principales, plus des siphons, aqueducs, régulateurs de débit, prises de drainage, etc.

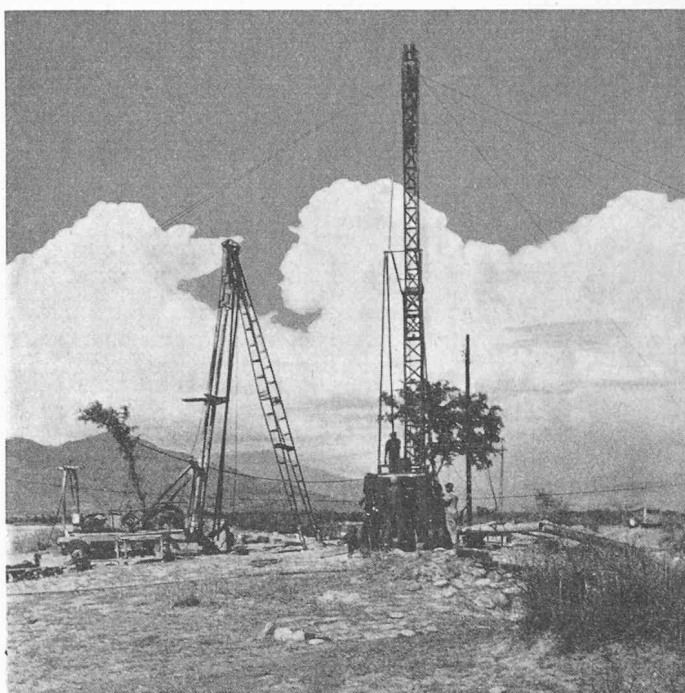
Le barrage de Mangla

Le premier barrage en date à être construit est celui de Mangla, sur la rivière Jhelum. Voici quelques caractéristiques : hauteur de la digue, 110 m ; longueur du couronnement, 3 km ; épaisseur à la base, 700 m. Le volume des terrassements en première étape atteint 58 millions de m³, pour une accumulation d'eau de 6,5 milliards de m³. Une surélévation de 15 m de la crête en deuxième étape portera le volume total du barrage à 77 millions de m³ et celui de la retenue à 10,2 milliards de m³. Sable et gravier composent la partie perméable de la digue ; l'étanchéité est assurée par un noyau d'argile incliné.

L'évacuateur de crues a des proportions peu usuelles, puisqu'il est prévu pour décharger un débit record de 34 000 m³ d'eau par seconde. Les passes déversantes sont à mi-hauteur d'un barrage-poids. Elles sont contrôlées par neuf vannes secteur 10×15 m opérant sous une charge maximum de 46 m. L'ouvrage évacuateur ne subira pas de modifications pour la surélévation du barrage en deuxième étape, puisqu'il n'y a pas de vannes de surface. Les eaux sont restituées à la rivière après passage dans deux bassins amortisseurs à deux niveaux différents.

Le barrage de Tarbela

Plus grand que Mangla sur le Jhelum ou Assouan sur le Nil, le barrage de Tarbela rivalisera avec la plus volumineuse digue des Etats-Unis.



Tour de sondage.

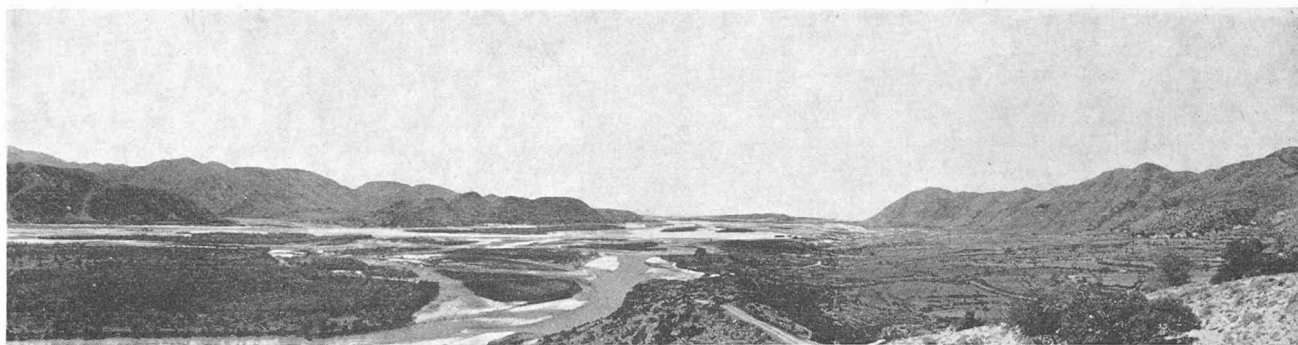
Le deuxième barrage réservoir sera construit sur l'Indus dans la région de Tarbela, à environ 80 km au nord de Rawalpindi. Il domptera les eaux tumultueuses de l'Indus en créant une accumulation supérieure à 6 milliards de m³, mais il sera encore incapable de réduire les crues subites et violentes du fleuve. La surface de la retenue est malheureusement trop faible par rapport aux débits maxima du fleuve pour que l'on puisse escompter un écrêtement substantiel des crues.

Les études pour la construction de cette œuvre gigantesque sont en cours depuis plus d'une année déjà dans les bureaux d'une grande compagnie new yorkaise d'ingénieurs-conseils. Les prospections sur place sont en pleine action en vue d'étudier la roche de fondation et les alluvions. Mais il faudra attendre de nombreux mois encore avant que le projet définitif soit mis sur pied. L'envergure de cet ouvrage, les difficultés d'exploration du sol et les problèmes absolument nouveaux qui se présentent exigent une étude très approfondie et rigoureuse de toutes les solutions possibles.

Au fur et à mesure que la nature géologique du sol est mieux connue par des sondages et forages, divers avant-projets sont élaborés pour orienter les futures études et estimer le coût des travaux à effectuer. Les descriptions détaillées qui suivent concernent deux avant-projets A et B (fig. 2 et 4). Ils donnent une idée de la nature du projet et des problèmes particuliers à ce genre d'ouvrage.

Choix du site

Les critères qui déterminent l'implantation d'une digue comme celle de Tarbela et ses ouvrages annexes sont multiples et difficiles à mettre en évidence, spécialement à cause du relief de la vallée de l'Indus, où nulle part un site ne s'impose *a priori*. En effet, la largeur minimum de la vallée est de 2,5 km ; le fleuve coule partout sur une couche épaisse d'alluvions ; d'autre part, il faut une roche de fondation solide pour bâtir



Vue panoramique. Site peu commun pour l'érection d'un barrage. L'Indus à Bara, vu de l'amont.

les ouvrages annexes tels qu'évacuateur de crues et usine hydro-électrique. Trois sites avaient été retenus au début des études, dont deux distants de 4 km, tandis que le troisième se trouve à 25 km en amont. Une plus grande attention est accordée actuellement au projet de Bara, le plus à l'aval, ainsi dénommé parce que situé près du village de ce nom.

Imperméabilisation des alluvions

La principale préoccupation de l'ingénieur responsable du projet est la fondation de la digue en terre et la possibilité de couper la circulation d'eau dans les alluvions sous le barrage. En général, si les alluvions sont peu épaisses, une tranchée excavée jusqu'au rocher est remplie de matériaux imperméables, tels que des argiles. Dans la région prospectée de Tarbela, les sondages géosismiques et quelques forages indiquent une roche très profonde sous les alluvions (plus de 120 m). Il faut dans ce cas recourir à d'autres techniques pour assurer l'étanchéité de la digue en profondeur. Une des solutions envisagées était l'imperméabilisation des alluvions au moyen d'injection de laitance de ciment. Mais finalement la méthode couramment utilisée aux Etats-Unis sera appliquée au barrage de Bara. Elle a l'avantage

d'être indépendante de l'épaisseur des alluvions, ce qui conditionne moins strictement l'emplacement de la digue. A l'amont du barrage on compacte une couche d'argiles imperméables de 1,5 à 8 m d'épaisseur, de façon à créer un tapis étanche sur les alluvions. Ce tapis est soudé aux rives rocheuses et au noyau de la digue ; il s'étend à l'amont sur une distance égale à vingt fois la hauteur de la digue, c'est-à-dire environ 2,5 km. La fonction exacte de cette protection est d'allonger le circuit d'eau sous le barrage et d'abaisser le gradient de pression à des valeurs qui limitent considérablement l'infiltration d'eau dans les alluvions. L'inconvénient de cette technique est d'augmenter la superficie du chantier, de repousser le batardeau plus à l'amont et du même coup d'allonger le canal de dérivation du fleuve.

Dérivation du fleuve

La qualité moyenne du rocher à Bara et les gros débits prévisibles du fleuve pendant les années de construction (20 000 m³/sec) rendent pratiquement impossible la dérivation de l'Indus par des tunnels creusés dans les flancs rocheux de la vallée. Les conditions topographiques sont alors utilisées au mieux pour dériver le fleuve par un canal ouvert tout en permettant d'isoler l'espace où sera construite la digue en terre.

Le site de Bara présente précisément plusieurs possibilités. L'une d'entre elles a été mise à profit dans l'avant-projet A de la façon suivante (fig. 2) : un chenal est creusé dans le flanc gauche de la vallée pour atteindre une gorge latérale par laquelle les eaux de l'Indus sont détournées. Les matériaux excavés servent à l'érection de la digue principale : il faut signaler que la petite vallée latérale doit être élargie pour satisfaire aux conditions hydrauliques. Pendant que le fleuve est dérivé dans cet étroit chenal, la construction des prises d'eau, des conduites forcées et d'irrigation est achevée sur la rive droite et la digue principale est entièrement terminée.

La clôture finale se fait en période d'étiage ; les eaux de

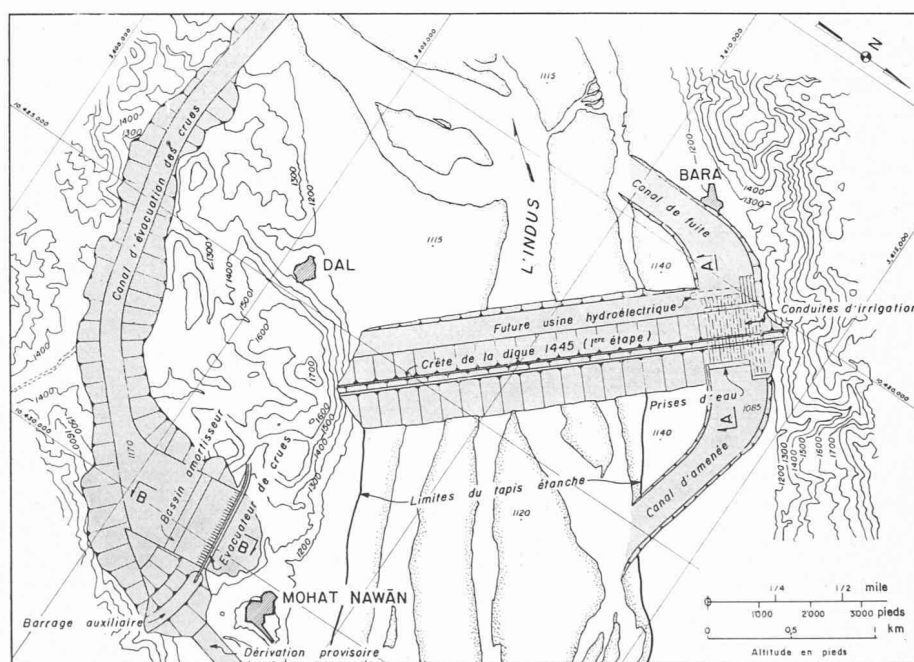


Fig. 2. — Barrage de Bara. Projet A, vue en plan.

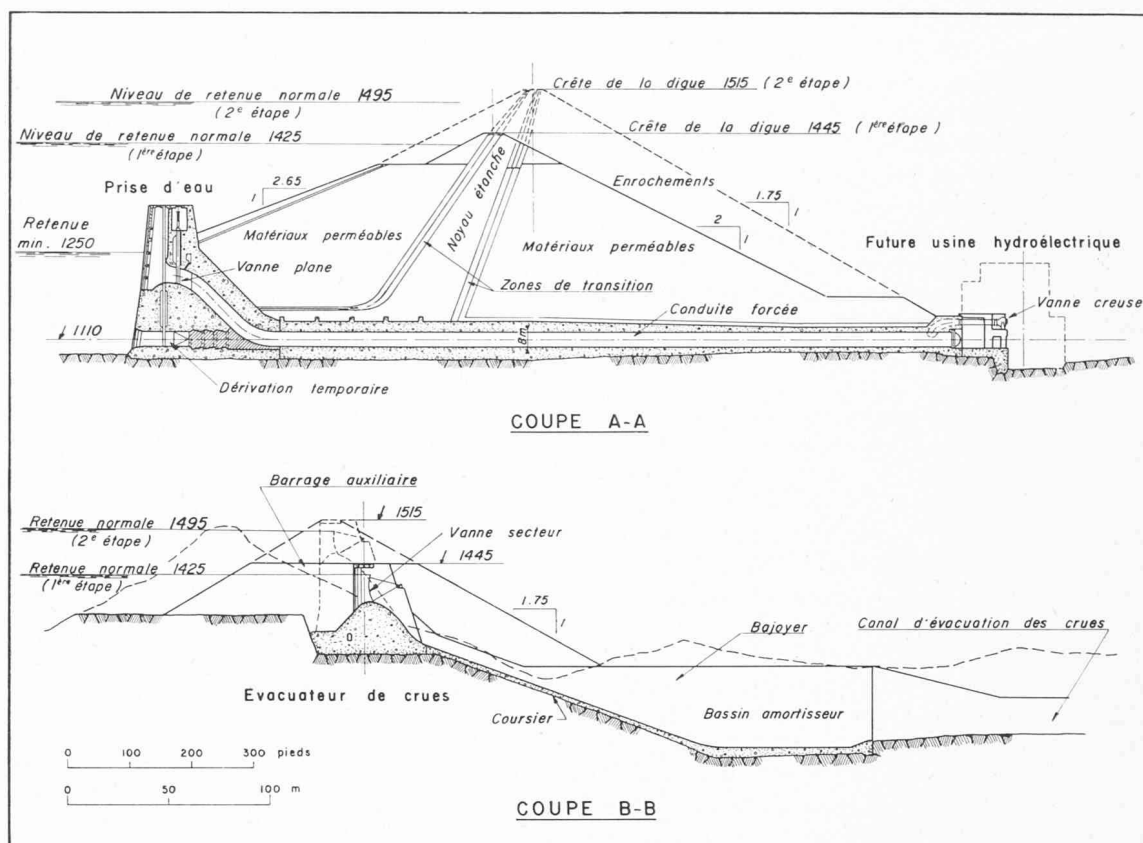


Fig. 3. — Barrage de Bara. Projet A. Coupes de la digue et des prises d'eau. Coupe de l'évacuateur de crues.

l'Indus sont dérivées cette fois-ci dans les conduites forcées et d'irrigation; le barrage auxiliaire, sur la rive gauche, est rapidement bâti avant les grandes eaux de la mousson. Précisons qu'en période de crues, le lac peut se remplir en une semaine.

Une deuxième possibilité de dérivation est envisagée dans l'avant-projet B (fig. 4). Elle peut paraître plus simple, parce qu'elle combine à la fois la dérivation et la construction du barrage-poids.

Légèrement au-dessus du niveau du fleuve, sur la rive droite, se présente un banc rocheux assez large pour y implanter un barrage-poids en béton. Ce barrage prolonge la digue; il porte les prises d'eau et enferme les conduites forcées. Pour la dérivation du fleuve, il est procédé comme suit: les fondations du barrage-poids

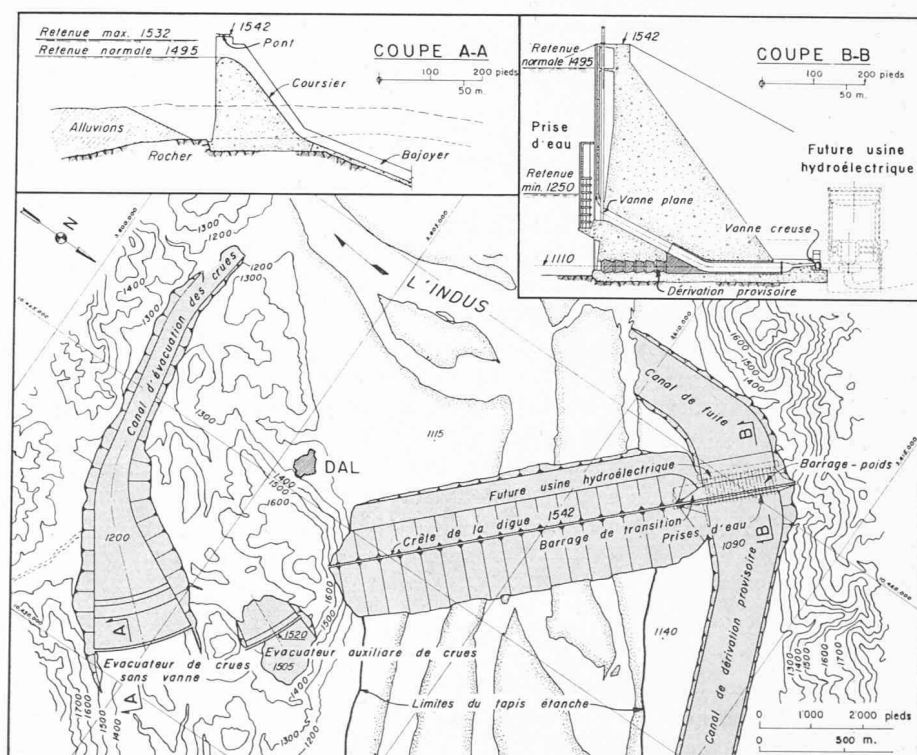


Fig. 4. — Barrage de Bara. Projet B. Vue en plan et coupes.

sont bétonnées jusqu'à enrober les conduites de dérivation provisoire. Le fleuve est ensuite détourné de son cours par un batardeau et il est amené à s'écouler dans ces conduites au nombre d'une vingtaine. En période de crues, les sections libres ne sont pas suffisantes, de sorte que les eaux submergent les plots de béton, sans inconvénient majeur du reste. Pendant cette étape de la dérivation, la digue est entièrement érigée. En période d'étiages, le bétonnage du barrage-poids est achevé et, en dernier lieu, les dérivation provisoires sont obturées.

La digue

La seule donnée impérative dictée par les experts pour l'irrigation est la capacité minimum de la retenue de Tarbela, fixée à 5,2 milliards de m³. Mais on a demandé à l'ingénieur-conseil des études portant sur des capacités plus élevées. Il fallait aussi prévoir la possibilité d'extensions futures, c'est-à-dire la surélévation de la digue en deuxième étape et la construction d'une usine hydro-électrique.

Le projet A (fig. 2 et 3) est dessiné pour une retenue de 6,3 milliards de m³, soit le couronnement au niveau 1445 (1445 pieds au-dessus de la mer). En deuxième étape, il y a possibilité d'augmenter la capacité du lac à 10 milliards de m³ en élevant le couronnement au niveau 1515. La digue s'étend de part en part de la vallée, longueur en crête égale à 2,7 km. Son volume est de 80 millions de m³, auxquels il faut ajouter les 29 millions du tapis étanche à l'amont pour obtenir un volume total de 109 millions de m³ (96 millions de m³ pour Fort Peck, Etats-Unis, la plus volumineuse digue du monde ; Assouan, en construction, 40 millions de m³).

L'étanchéité de la digue proprement dite est assurée par un noyau d'argile incliné, d'une largeur de 35 m à la base et de 3 m en crête, soudé au tapis étanche à l'amont. Trois filtres successifs séparent les matériaux imperméables et perméables. La face amont de la digue a un fruit de 2,65 ; elle est protégée par un péré sur filtre. La face aval présente un fruit de 2.

Le barrage du projet B (fig. 4) serait construit en une étape pour une capacité de retenue de 10 milliards de m³. Le niveau normal du lac est 1495, tandis que le couronnement est au niveau 1542. Cette revanche de 47 pieds, soit 14,5 m, est exigée à cause de l'adoption d'un évacuateur de crues sans vanne pour le contrôle du lac. La digue en terre s'étend sur les trois quarts de la vallée seulement, c'est-à-dire du flanc gauche jusqu'au barrage-poids en béton, côté rive droite, qui termine la fermeture de la vallée de l'Indus. Le volume de la digue est de 88 millions de m³, celui du tapis étanche de 29 millions de m³, soit au total 117 millions de m³ de matériaux meubles. Le barrage en béton atteint 6,4 millions de m³ (Grande Dixence, 5,8 millions de m³). Les autres caractéristiques sont identiques à celles du projet A.

L'évacuateur de crues

L'ouvrage évacuateur de crues pour un barrage réservoir sur l'Indus commande dans une très large mesure le choix du site, car il requiert certaines conditions topographiques si l'on veut construire économiquement, avec de bonnes sécurités.

Le site de Bara a été précisément choisi pour sa possibilité de déverser les crues dans la petite gorge latérale sur rive gauche de l'Indus. Ainsi, les flots évacués n'ont aucune influence sur la digue principale. Rappelons que le débit de la crue maximum est fixé à 57 000 m³ d'eau par seconde ; jamais au monde, un évacuateur n'a été dimensionné pour une telle capacité.

Dans le projet A (fig. 2 et 3), l'évacuateur est à cheval entre la vallée de l'Indus et la vallée latérale, sur un éperon de bon rocher. Les crues sont contrôlées par 28 vannes secteurs 15×12 m. En plan, les 28 passes déversantes sont rectilignes ; l'ensemble mesure 520 m. Les vannes sont prévues pour être exhaussées en deuxième étape. Les eaux déversées sont amorties dans un bassin conçu à ces fins ; ensuite, elles empruntent le chenal qui a servi à la dérivation du fleuve pendant la période de construction de la digue.

Le projet B propose un évacuateur de crues sans vanne pour le contrôle du niveau de la retenue (fig. 4). Cette solution est très favorable pour un pays peu industrialisé qui devrait importer tout l'acier nécessaire à l'érection de ces vannes. D'autre part, on se libère des mauvais fonctionnements ou pannes mécaniques, ce qui présente plus de sécurité eu égard aux crues subites de l'Indus. Dans ce projet, la digue doit être fortement surélevée par rapport à la crête du déversoir, afin que le plan d'eau puisse s'élever et atteindre la charge nécessaire à l'évacuation des crues. Cette surélévation de la digue entraîne évidemment une dépense supplémentaire qui dépasse le coût des vannes et des accessoires dont on a fait l'économie ; cependant la différence n'est pas grande et le supplément de prix serait justifié par la sécurité de fonctionnement.

L'évacuateur est implanté sur le col entre la vallée principale de l'Indus et la vallée latérale. Il est de forme circulaire, pour réduire les dimensions du bassin amortisseur. Le débit par mètre courant de crête déversante est moins grand que celui d'une crête contrôlée par des vannes. Un second évacuateur, également sans vanne, est disposé sur un col secondaire. Il ne fonctionne que pour de fortes crues. En sa qualité d'évacuateur de secours, il n'est pas doublé d'un bassin amortisseur.

Les ouvrages de prises d'eau et les conduites forcées

Après avoir étudié la possibilité de construire une digue et d'assurer l'évacuation des crues, il reste à l'ingénieur le souci de soutirer, dans les meilleures conditions, l'eau de la retenue soit pour les besoins de l'irrigation, soit pour la production d'énergie hydro-électrique, cette dernière fonction étant réservée pour une future étape à Tarbela.

Si la digue occupe toute la largeur de la vallée, comme dans le projet A, une solution logique consiste à faire traverser la digue par plusieurs conduites parallèles en béton armé. Les prises d'eau sont placées au pied amont de la digue, les valves creuses ou la future usine hydro-électrique au pied aval. Cette technique souvent appliquée à des barrages en terre ou en enrochement n'est pas un cas simple pour Tarbela. D'une part, la largeur de la base est immense — 410 m — et l'énorme quantité d'eau exigée pour l'irrigation ou les grosses unités de l'usine (100 000 kW chacune) requiè-

rent des conduites colossales de 8 m de diamètre. Ces énormes tunnels sont prévus blindés sur toute leur longueur, tandis que la pression serait prise en compte essentiellement par une armature dense enrobée dans le béton. Dans le cas contraire, lorsque la conduite est vide, elle doit résister à l'écrasement sous le poids des matériaux de la digue (hauteur max. 120 m). Ne nous étonnons pas si une seule conduite est inscrite dans un bloc de béton de 20 m sur 20 m de section. Ensemble, les onze conduites forcées de la future usine et les quatre conduites pour l'irrigation représentent un volume de 1 600 000 m³ de béton.

La prise d'eau est du type vertical avec vannes planes. L'innovation du projet est l'immersion du maître cylindre de la vanne, excepté pendant les basses eaux du lac. Les commandes sont entièrement assurées par pression d'huile. Avant la construction de l'usine, les conduites forcées serviront à soutirer l'eau du lac pour l'irrigation. A leur extrémité aval sont montées provisoirement des vannes creuses qui, en dispersant le jet, détruisent l'énergie hydraulique.

A l'opposé du projet A, dans lequel les conduites forcées traversent toute la digue, le projet B présente celles-ci enrobées dans un barrage-poids en béton qui se substitue à une portion de la digue, sur la rive droite. Cette solution peut paraître peu élégante et coûteuse au premier abord, puisqu'elle nécessite : 1^o un barrage en béton, dit de transition entre les prises d'eau et la digue proprement dite ; 2^o un plein volume de béton sur toute la longueur de l'usine ; 3^o un accotement jusqu'au rocher rive droite. Cependant les gains sont réels et les sécurités sont meilleures. Il est à craindre, dans

la solution A (conduites sous la digue) un éclatement de ces énormes tuyaux, qui entraînerait la destruction rapide et totale de la digue.

Dans le projet B, le diamètre des conduites est réduit à 6 m et leur longueur fortement diminuée, ce qui favorise le fonctionnement des groupes de l'usine. Les prises d'eau sont classiques. Rappelons que cette solution du barrage-poids résout le problème de la dérivation du fleuve pendant la construction de la digue. Le projet B est conçu pour une capacité de 20 groupes (100 000 kW chacun) de la future usine hydro-électrique. Il n'y a pas de conduites spéciales pour l'irrigation, mais en première étape, des valves creuses permettent de soutirer l'eau de la retenue.

Les futurs travaux

Les constructions des canaux de dérivation et des immenses barrages de Mangla et de Tarbela ne doivent pas être considérées comme faisant partie d'un tout en soi. Au contraire, elles doivent marquer le point de départ d'une meilleure exploitation des ressources de l'Indus et d'un essor économique général pour le Pakistan. D'autres barrages seront construits sur l'Indus et ses affluents pour mieux contrôler les crues du fleuve et augmenter la capacité d'irrigation et la production d'énergie hydro-électrique, dont la nouvelle industrie pakistanaise va avoir grand besoin.

Dans quelques années, le fleuve légendaire sera maîtrisé. Mais les travaux des hommes ne s'arrêteront pas là. Déjà est à l'étude le futur développement du Mékong, en Thaïlande. A quand les travaux sur l'Amazonie, le Congo ou le Mackenzie ?

New York, juin 1961.

BIBLIOGRAPHIE

Transmission de la chaleur, par W. H. Mc Adams, professeur de Génie chimique, Massachusetts Institute of Technology. Traduit de l'américain par A. Beauvils. 2^e édition. Paris, Dunod, 1961. — Un volume 16×25 cm, xxi + 585 pages, 225 figures. Prix : relié, 115 NF.

Les problèmes de transmission de la chaleur interviennent dans les domaines les plus variés et posent alors à ceux qui doivent les résoudre, même lorsqu'ils ont de bonnes connaissances théoriques, les difficultés habituelles inhérentes aux applications pratiques dans la recherche des ordres de grandeurs et le choix des unités.

Dans ce livre, traduit de la dernière édition américaine, le lecteur trouvera d'abord traitée la théorie des trois modes fondamentaux de transmission de la chaleur : conduction, convection (naturelle ou forcée) et rayonnement, avec leurs applications pratiques. Un chapitre consacré à la mécanique des fluides complète ces notions et permet l'étude des échanges de chaleur à travers des tubes, ainsi que ceux qui se font par l'intermédiaire d'empilages et de systèmes fluidisés. Les écoulements supersoniques et la transmission de la chaleur en atmosphère raréfiée, les phénomènes de condensation des vapeurs ainsi que ceux d'ébullition des liquides sont longuement examinés.

Enfin, un exposé est consacré à des applications essentiellement pratiques : problème économique du choix de l'épaisseur optimum d'un calorifuge, étude des échangeurs industriels depuis les nombreuses variables techniques et économiques qui interviennent dans ce problème complexe.

Parmi les nombreux points nouveaux traités dans cette édition, on notera ceux relatifs aux échangeurs

compacts, de petites dimensions, mais à taux de transmission élevé par unité de volume ; on y trouvera également de très intéressantes indications chiffrées des caractéristiques des systèmes fluidisés.

D'autres précisions sont apportées : sur les ébullitions de liquides relativement froids au contact d'une source noyée à température très élevée, ce qui donne une transmission de chaleur très importante ; sur l'analyse mathématique du coefficient de transmission d'un film liquide ; sur une méthode de calcul numérique et graphique utilisée pour les tours de refroidissement ; sur les performances d'échangeurs à aiguilles, à la place des surfaces auxiliaires classiques telles des ailettes ; enfin sur la transmission de la chaleur par métaux liquides.

Illustré d'applications pratiques qui donnent les méthodes à employer pour résoudre un grand nombre de problèmes, ce livre est un véritable ouvrage de référence que consulteront toujours avec profit les ingénieurs et techniciens appartenant aux domaines industriels les plus divers, les chercheurs des laboratoires et les étudiants des écoles d'ingénieurs et des facultés qui pourront se servir de cet ouvrage comme cours.

Sommaire :

1. Introduction à la transmission de la chaleur. — 2. La conduction en régime permanent. — 3. La conduction en régime variable. — 4. La transmission de la chaleur par rayonnement. — 5. Analyse dimensionnelle. — 6. L'écoulement des fluides. — 7. La convection naturelle. — 8. Introduction aux problèmes de convection forcée. — 9. Echauffement et refroidissement de fluides à l'intérieur de tubes. — 10. Echauffement et refroidissement de fluides à l'extérieur de tubes. — 11. Echangeurs compacts, systèmes empilés et fluidisés. — 12. Ecoulements à grande vitesse, gaz raréfiés. — 13. La condensation des vapeurs. — 14. L'ébullition des liquides. — 15. Réalisations pratiques.