

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 76 (1950)
Heft: 22

Artikel: Barrages modernes en Italie
Autor: Marcello, Claudio
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-57450>

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: 20.10.2025

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

BULLETIN TECHNIQUE

DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ABONNEMENTS :Suisse : 1 an, 20 francs
Etranger : 25 francs

Pour sociétaires :

Suisse : 1 an, 17 francs
Etranger : 22 francsPour les abonnements
s'adresser à la librairie**F. ROUGE & Cie**
à LausannePrix du numéro :
1 fr. 25

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président : R. NEESER, ingénieur, à Genève ; Vice-président : G. EPITAUX, architecte, à Lausanne ; secrétaire : J. CALAME, ingénieur, à Genève. — Membres : *Fribourg* : MM. P. JOYE, professeur ; E. LATELTIN, architecte — *Vaud* : MM. F. CHENAUX, ingénieur ; E. D'OKOLSKI, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; CH. THÉVENAZ, architecte ; *Genève* : MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; CL. GROSGURIN, architecte ; E. MARTIN, architecte ; V. ROCHAT, ingénieur. — *Neuchâtel* : MM. J. BÉGUIN, architecte ; G. FURTER, ingénieur ; R. GUYE, ingénieur ; *Valais* : MM. J. DUBUIS, ingénieur ; D. BURGNER, architecte.

Rédaction : D. BONNARD, ingénieur. Case postale Chauderon 475, LAUSANNE

TARIF DES ANNONCESLe millimètre
(larg. 47 mm) 20 ctsRéclames : 60 cts le mm
(largeur 95 mm)Rabais pour annonces
répétées**ANNONCES SUISSES S.A.**5, Rue Centrale
Tél. 22 33 26LAUSANNE
et Succursales**CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE**

A. STUCKY, ingénieur, président ; M. BRIDEL ; G. EPITAUX, architecte ; R. NEESER, ingénieur.

SOMMAIRE : *Barrages modernes en Italie*, par CLAUDIO MARCELLO, Dott. Ing., Milan. — **BIBLIOGRAPHIE.** — Société suisse des ingénieurs et des architectes : *Communiqué du Secrétariat.* — **COMMUNIQUÉ.** — **CARNET DES CONCOURS :** *Caserne de pompiers et garage municipal à Plainpalais.* — **SERVICE DE PLACEMENT.** — **INFORMATIONS DIVERSES :** *Ponts à bascule dans le service des chemins de fer (suite et fin)*, par O. SUTER, ingénieur, Olten.

BARRAGES MODERNES EN ITALIE¹

par CLAUDIO MARCELLO, Dott. Ing., Milan

I. Les barrages italiens existants

Les barrages de hauteur utile supérieure à 10 m existant actuellement en Italie atteignent, à ma connaissance, le chiffre de 175, non compris un certain nombre — une trentaine environ — d'ouvrages de moindre importance. Les tableaux suivants² donnent la répartition de ces différents ouvrages suivant le type, la hauteur et l'époque de leur construction. Le type le plus fréquent est le barrage-poids massif (109 réalisations, soit 62 % du total, dont 9 dépassant 60 m de hauteur). Le plus haut barrage de ce type est celui de Salto (Bassin du Tibre, province de Rome, 104 m sur fondations).

Suivent, par ordre de fréquence, les barrages-voûtes (23 ouvrages actuellement en service) dont le plus haut est celui de Lumiei (136 m sur fondations) achevé l'an dernier.

Le barrage en maçonnerie à sec (qu'il ne faut pas confondre avec le type en enrochement, sans application actuellement en Italie), est représenté par 17 ouvrages dont 8 réalisés avant 1924 (hauteur maximum 38 m pour le barrage de Piana dei Greci, près de Palerme — même hauteur à peu près pour le barrage de Gela, en Sicile, achevé l'année dernière).

Des 10 barrages à voûtes multiples ou à dalles et contreforts, le plus important est celui du lac Omodeo, sur le Tirso,

en Sardaigne, qui crée une retenue de $420 \times 106 \text{ m}^3$ pour une hauteur maximum de 73 m.

Des 9 digues en terre de hauteur supérieure à 10 m, la plus importante est celle du réservoir de Nocelle, sur l'Arvo, en Calabre (hauteur maximum 26 m). Des 4 barrages-poids du type évidé, dont la construction remonte à ces dix dernières années, le plus important est celui de Scais (Valtellina-Sondrio) avec ses 63 m de hauteur ; suit le barrage de Bau Muggeris (bassin du Flumendosa, Sardaigne), approximativement de même hauteur.

Un cinquième ouvrage de ce type de barrage est actuellement en cours d'achèvement : c'est le barrage de San Giacomo di Fraele (bassin de l'Adda, province de Sondrio), supérieur à tous les précédents en hauteur (90 m) et en volume ($600\,000 \text{ m}^3$ de béton).

Presque tous les barrages italiens ont été construits dans la montagne, à une altitude élevée : le barrage-poids du lac de la Rossa (bassin de la Stura di Viù, Piémont) se trouve à 2700 m au-dessus du niveau de la mer ; le barrage du Careser (bassin du Noce, province de Trente) est à la cote 2600 et son volume de béton atteint $190\,000 \text{ m}^3$; celui du Goillet (bassin de la Valtournanche) est à la cote 2500.

II. Barrages en construction en Italie, en automne 1949

Ils se répartissent comme suit d'après le type :

9 barrages-poids, 5 barrages-poids évidés, 7 barrages-voûtes, 1 barrage-poids-voûte, 1 barrage en maçonnerie à sec et 2 digues en terre, soit au total 25 barrages.

¹ Adaptation à la publication du texte de la conférence tenue par M. Cl. Marcello, Dott. Ing., à l'Ecole polytechnique fédérale à Zurich, le 17 décembre 1949, dans le cadre du Groupe professionnel des ingénieurs des ponts et charpentes de la Société suisse des ingénieurs et des architectes.

² Le premier extrait d'un bref rapport présenté par l'auteur, il y a quelques mois, au congrès de l'UNIPED, à Bruxelles.

Il est aisé de constater par ces chiffres la réduction progressive des applications du barrage-poids massif, réduction qui, déjà manifeste pendant la période 1915-1924, avait ensuite marqué un temps d'arrêt au cours des quinze années suivantes.

Cet arrêt était motivé par la campagne de défiance déchaînée contre tous les types de barrages autres que le type poids massif, après la rupture du barrage à voûtes multiples du Gleno. Cette campagne négligeait entre autres le fait que le désastre du Gleno n'était pas imputable au type de barrage, mais bien aux vices de la construction du tampon-poids fermant la plus profonde incision du lit et supportant l'un des contreforts.

L'action des techniciens compétents et celle du temps ont peu à peu conduit à un examen plus objectif de ces questions et ces dix dernières années ont vu surgir en Italie, à côté des barrages-poids massifs, de beaux barrages-voûtes à simple ou double courbure, des structures évidées ou à contreforts, des barrages en maçonnerie à sec ou en terre.

En Italie, comme ailleurs, la technique des barrages s'oriente vers une meilleure utilisation des matériaux employés, vers le perfectionnement de leurs caractéristiques, vers une meilleure adaptation des systèmes de calcul aux conditions réelles des structures, vers la délimitation toujours plus exacte de toute action secondaire, tout en évitant soigneusement, bien entendu, le moindre tort à la sécurité de ces importants ouvrages.

III. Considérations sur le domaine d'application des différents types de barrages

A. Vue d'ensemble

Je me bornerai, dans ce bref examen, aux types les plus classiques et les plus fréquemment appliqués en Italie : le barrage-poids et le barrage-voûte, ainsi qu'à leurs dérivés.

Bien entendu, les conditions morphologiques, géologiques et économiques pourront en plusieurs cas conseiller ou imposer l'application de types différents.

Les structures à voûtes multiples ou à dalles, par exemple, ont trouvé en Italie des applications remarquables : qu'il suffise de rappeler ici le grand barrage du Tirso, déjà cité. Ces types exigent cependant une excellente roche de fondation et sont plutôt coûteux, vu les soins spéciaux que leur construction impose ; dans les régions alpines, le gel représente pour ces structures un ennemi plus redoutable que pour d'autres et les tout derniers ouvrages du type évidé leur disputent toujours davantage leur terrain d'application.

Je ne m'attarde pas davantage à illustrer les cas justifiant l'adoption des barrages en maçonnerie à sec ou en terre. Leurs possibilités d'application sont définies par les conditions géologiques du terrain. Un élément économique important, parfois décisif, y concourt souvent, à savoir la possibilité de trouver sur place les matériaux nécessaires. Nous avons en Italie des exemples remarquables et intéressants de ces deux derniers types ; ils ont l'un et l'autre des origines reculées, mais leur grand âge défie vaillamment les siècles et les innovations, car des barrages de ces deux genres ont été tout récemment réalisés ou sont en cours de réalisation.

Par contre, le barrage en enrochement n'a eu aucune application en Italie. A part le fait que le règlement italien des barrages ne le mentionne même pas, il n'est possible d'en trouver, pour ce type de barrage, que de très rares possibilités futures d'application dans notre pays.

Les structures les plus fréquemment employées sont, je le répète, les barrages en maçonnerie du type poids ou poids-voûte. Quant au critère de choix du type de barrage, j'estime

TABLEAU 1. — Principaux barrages construits en Italie jusqu'à fin 1949 (classés suivant le type et l'époque de la construction)

Epoque de la construction	Nombre, resp. pourcentage								
	Barrages-poids massifs	Barrages-poids évidés	Barrages-voûtes	Barrages-poids-voûtes	Barrages à voûtes multiples ou barrages à dalles et contreforts	Barrages en maçonnerie à sec	Digues en terre	Barrages mixtes	Total
Avant 1900 . .	4	—	—	—	—	—	2	—	6
De 1900 à 1914	11	—	3	—	—	—	1	—	15
De 1915 à 1924	22	—	6	—	4	8	3	2	45
	49 %	—	13 %	—	9 %	18 %	7 %	4 %	100 %
De 1925 à 1935	55	—	8	—	6	8	3	—	80
	69 %	—	10 %	—	7 %	10 %	4 %	—	100 %
De 1936 à 1949	17	5	6	1	—	1	—	—	30
	59 %	17 %	21 %	3 %	3 %	3 %	—	—	100 %
Total : nombre	109	5	23	1	10	17	9	2	176
pourcentage	62 %	3 %	13 %	—	6 %	10 %	5 %	1 %	100 %

TABLEAU 2. — Principaux barrages construits en Italie jusqu'à fin 1949 (classés suivant le type et la hauteur du barrage)

Hauteur des barrages	Nombre								
	Barrages-poids massifs	Barrages-poids évidés	Barrages-voûtes	Barrages-poids-voûtes	Barrages à voûtes multiples ou barrages à dalles et contreforts	Barrages en maçonnerie à sec	Digues en terre	Barrages mixtes	Total
Jusqu'à 30 m .	58	1	7	—	4	14	9	1	94
De 30 à 50 m .	30	1	12	—	5	3	—	—	51
De 50 à 70 m .	15	2	1	—	1	—	—	1	20
De 70 à 90 m .	5	1	2	—	—	—	—	—	8
Au-dess. de 90 m	1	—	1	1	—	—	—	—	3
Total . . .	109	5	23	1	10	17	9	2	176

que le facteur fondamental doit en être le facteur économique, au sens le plus large du mot, à la condition expresse, bien entendu, que la sécurité de l'ouvrage n'en souffre pas.

J'ai dit « au sens le plus large du mot », car loin de se borner à considérer la dépense de première installation, le souci économique doit tenir compte de la vie pratiquement illimitée que l'auteur du projet doit s'efforcer de garantir à l'ouvrage.

Je suis nettement d'avis qu'en l'état actuel de la technique en matière de barrages, l'ingénieur compétent et objectif — qui refuse de se laisser éblouir par la nouveauté ou la manie des records — doit trouver, en se basant sur les caractéristiques naturelles (topographie et géologie) de la région touchée par l'ouvrage et sur des considérations économiques élémentaires, les données sûres nécessaires au choix du type de barrage approprié.

J'estime pouvoir affirmer que le barrage-poids massif est destiné à être remplacé dans la plupart des cas par des barrages à contreforts ou évidés de différents types ou par des barrages-voûtes ou poids-voûtes.

Le barrage-poids massif semble devoir être réservé aux conditions nécessitant des structures à plan droit ou brisé d'une hauteur très réduite (de l'ordre de 15 à 20 m) ou très élevée (plus de 120 à 130 m).

L'autre domaine (entre les limites de hauteur ci-dessus et pour les mêmes conditions d'allure en plan) devrait être réservé aux barrages à contreforts ou évidés des différents types, ou bien aux structures à voûtes multiples ou à dalles et contreforts.

Les barrages-voûtes peuvent remplacer les barrages-poids massifs ou évidés (pratiquement pour n'importe quelle hauteur) lorsque les conditions topographiques et géologiques permettent de les appliquer avantageusement.

Considérons séparément les caractéristiques fondamentales de ces types de barrages :

B. Les barrages évidés

Ces ouvrages ont deux prototypes : le barrage à évidements proposé par Figari dès 1900 et le barrage à contreforts proposé par l'ingénieur suisse Noetzi.

Des modifications plus ou moins importantes apportées à ces deux types ont permis d'obtenir les différents barrages évidés réalisés dans le monde entier.

1. Les avantages de ces types vis-à-vis des barrages-poids massifs sont avant tout les suivants :

a) La réduction — et même, pour certains types, l'élimination quasi totale — des sous-pressions et des pressions interstitielles, causes de tant de préoccupations et de tant d'incertitudes au sujet des conditions statiques réelles de l'ouvrage et de la conservation du béton (ce dernier point d'importance particulière pour les barrages sujets à de fortes variations climatiques). Il n'existe aucun système de drainage aussi efficace que celui créé par les évidements entre les contreforts. Même dans le cas de stratifications rocheuses horizontales et compactes, on sait qu'aucune roche n'est exempte de fissures et que l'action drainante de ces fissures peut être, en pareil cas, intensifiée par celle des trous de drainage à pratiquer dans le roc au périmètre des contreforts¹.

b) La dissipation aisée de la chaleur de prise du ciment.

c) L'économie de volume du béton, accompagnée d'une réduction du coût et de la durée des travaux, plus ou moins grande, suivant la longueur des travaux en question et le type de barrage choisi.

Il faut, en effet, tenir compte du fait que le coût unitaire d'un barrage-poids évidé ou à contreforts varie sensiblement suivant les caractéristiques de l'ouvrage².

¹ La détermination expérimentale des sous-pressions s'exerçant sur les barrages évidés de Trona, de l'Inferno et de Bau Muggeris a pleinement confirmé l'efficacité complète de l'action drainante des évidements dans ces barrages. Des dix indicateurs de pression installés au barrage de Trona, trois seulement — situés au voisinage immédiat du parement amont — ont révélé l'action de la sous-pression.

Les piézomètres installés dans les contreforts latéraux n'ont révélé aucune sous-pression ; aucune infiltration n'a été d'ailleurs décelée par les nombreux dispositifs installés à différents niveaux dans le barrage de Trona pour la mesure des pressions interstitielles.

Mêmes constatations au barrage évidé du lac de l'Inferno, où les piézomètres installés n'ont révélé aucune sous-pression, et au barrage de Bau Muggeris (Sardaigne) récemment terminé où, sur un total de trente-neuf piézomètres installés sur la roche de fondation, six seulement — placés au niveau du parafoille amont — ont indiqué une pression, tandis que les autres, disséminés çà et là sur toute la base des éléments, n'en ont révélé aucune.

² Un examen détaillé effectué sur différents types de barrages n'exigeant — de par leurs caractéristiques et leurs dimensions — aucun emploi d'armatures en fer, a permis de constater, dans le coût unitaire du béton (par m³) des variations de 1,02 à 1,5 par rapport à celui d'un barrage-poids.

Les éléments influant sur la variation du prix unitaire du béton lorsqu'on passe du type massif au type évidé sont les suivants :

- surface des coffrages, qui peut varier de 1 à plus de 4 m² par m³ de béton (en admettant que le bétonnage d'un barrage massif soit exécuté par blocs d'environ 10×10 m) et uniformité plus ou moins grande du type de coffrage ;
- surface horizontale disponible pour les couches de béton et ses caractéristiques géométriques (les deux facteurs : la grandeur de la zone recouverte par le béton et la forme de cette zone exercent une influence sur la durée du transport du béton) ;
- augmentation éventuelle du dosage du ciment pour les types de barrage ayant des contraintes unitaires du béton considérablement plus élevées que celles du barrage massif.

2. L'indéniable et remarquable avantage de l'élimination pratique de la sous-pression ne saurait être diminué par les inconvénients que l'on voudrait attribuer à la discontinuité des fondations ; cette discontinuité est d'ailleurs plus ou moins commune à tous les barrages, je dirais même à toutes les constructions, et la question n'éveille aucune préoccupation particulière.

L'expérience d'innombrables ouvrages démontre que cette discontinuité n'a donné lieu à aucun inconvénient. Notre « Bureau des constructions du Groupe Edison » n'en a pas moins rédigé une étude théorique sur la distribution des tensions sur un demi-plan dont la droite-limite subirait l'action de forces périodiques, notamment au cas où « l'onde » des forces appliquées serait rectangulaire¹.

Le dessin que nous reproduisons ici (fig. 1) donne l'allure des lignes isostatiques dont la forme est identique aussi bien sous les zones chargées que sous les zones non chargées, à part le fait, bien entendu, qu'au fur et à mesure de l'accroissement de la profondeur, la valeur des tensions décroît de la valeur maximum à la valeur moyenne dans les zones chargées et augmente de la valeur zéro à la valeur moyenne dans les zones non chargées.

¹ Il s'agissait de résoudre le problème de la détermination des contraintes dans un sol homogène, isotrope, sous l'effet d'une distribution de charges superficielles à diagramme rectangulaire discontinu (c'est-à-dire charge nulle sur une certaine partie de longueur l , charge répartie $= 2p$ sur la partie suivante de même longueur, et ainsi de suite). La charge moyenne est par conséquent p ; mais elle est distribuée suivant un diagramme périodique rectangulaire oscillant entre 0 et $2p$.

La solution du problème est obtenue par développement en série de Fourier, en partant de la considération que, pour une charge sinusoïdale ayant la forme

$$p = p_0 \sin(\omega y)$$

(y = abscisse — x = ordonnée),

la fonction des tensions s'exprime comme suit :

$$\Phi = p_0 \frac{\omega x + 1}{\omega^2} \sin(\omega y) \cdot e^{-\omega x}$$

d'où l'on déduit :

$$\sigma_x = \frac{\delta^2 \Phi}{\delta x^2} ; \quad \sigma_y = \frac{\delta^2 \Phi}{\delta y^2} ; \quad \tau = - \frac{\delta^2 \Phi}{\delta x \delta y}$$

Le diagramme que nous reproduisons sur la figure représente, comme nous l'avons dit, l'allure des lignes isostatiques.

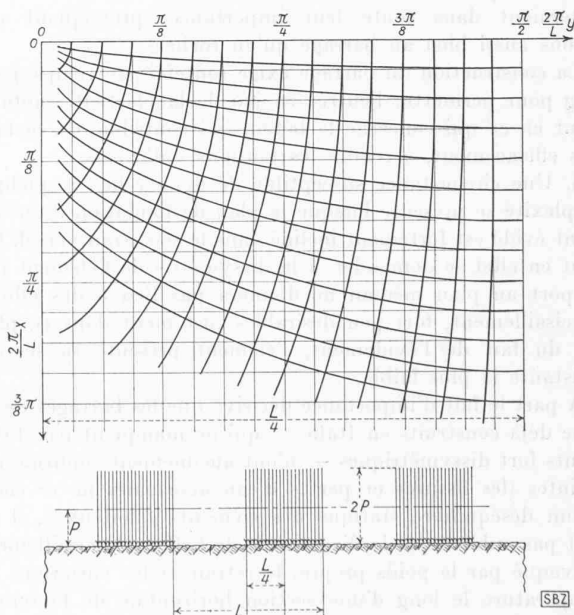


Fig. 1. — Sollicitation du sol de fondation d'un barrage évidé. En bas, schéma de charge ; en haut, isostatiques.

On remarquera l'allure très régulière des courbes et leur forme d'« arc inverse ». Cet arc inverse a justement un rôle statique effectif, surtout dans les zones non chargées où, comme nous l'avons dit, la valeur de la tension s'accroît du haut vers le bas. La singularité se vérifie le long de la verticale de passage de la zone chargée à la zone non chargée ; mais cette bande de discontinuité est très étroite et il est aisé de la corriger par les mesures constructives les plus courantes (léger élargissement de la fondation, redents dans la surface de fondation). L'allure des lignes isostatiques peut également conseiller la forme la plus avantageuse à donner au profil de fondation, afin de mieux favoriser l'effet d'arc inverse obtenu dans les zones non chargées.

L'analyse a montré que, dans une zone limitée entourant le point de discontinuité des charges, l'effort de cisaillement est de l'ordre de 0,6 fois la charge moyenne appliquée (soit 0,3 de la charge maximum, si l'on attribue aux zones chargées et aux zones non chargées une largeur identique). Cette valeur est sûrement supportable si l'on considère que le glissement qui en dérive, si petit soit-il, détermine l'intervention de forces de frottement importantes.

Le calcul prouve en effet qu'il existe, dans la zone de discontinuité, des compressions horizontales égales aux verticales.

Il est en outre superflu de noter qu'il suffit d'une intervention, même modérée, de la plasticité des matériaux pour assurer en ces points particuliers une continuité élastique.

Il est aisé de comprendre en effet que la faculté d'adaptation plastique des matériaux de construction, notamment du béton frais, provoque une distribution des charges apte à éliminer la discontinuité mathématique de ces charges. Bien que l'état de tension, calculé théoriquement, ne donne lieu à aucune préoccupation particulière, il doit être considéré comme plus défavorable que l'état de tension réel.

D'autre part, les efforts (supérieurs à ceux de la loi du trapèze) qui se vérifient au voisinage des parements par suite de l'élasticité de la roche de fondation n'ont jamais eu d'effets néfastes et l'expérience des nombreux barrages construits est là pour le confirmer. On comprend aisément pourquoi : supposons que le barrage soit construit en dehors des fouilles et posé ensuite sur ses fondations, ces efforts se manifesteraient dans toute leur importance, provoquant des lésions aussi bien au barrage qu'au rocher.

La construction du barrage exige toutefois un temps assez long pour permettre l'entrée en jeu de la plasticité, notamment en ce qui concerne le béton, qui contribue de ce fait, très efficacement, à rendre les tensions uniformes.

3. Une circonstance susceptible de donner lieu à quelque perplexité se présente lorsque le plan de fondation d'un élément évidé est fortement incliné dans le sens transversal. On peut en effet se demander si la dissymétrie de l'élément par rapport au plan médian ne donnera pas lieu à des efforts de cisaillement, fort peu désirables justement dans ce plan où, du fait de l'évidement, l'élément présente sa section résistante la plus faible.

A part le fait d'importance décisive que les barrages de ce type déjà construits en Italie — qui ne manquent pas d'éléments fort dissymétriques — n'ont aucunement confirmé ces craintes (les fissures et pertes d'eau anormales ne révélant aucun déséquilibre statique des éléments « boiteux »), il ne faut pas oublier que le diagramme de l'effort de cisaillement provoqué par le poids propre, le retrait et les variations de température le long d'une section horizontale de l'ouvrage doit avoir une surface nulle. Autrement dit, la courbe des efforts de cisaillement passe par zéro dans une zone centrale

de la section ; le point zéro est exactement dans l'axe si la construction est droite, mais n'en est pas très éloigné si la construction est « boiteuse ». Il est intéressant de noter à ce sujet que le classique profil triangulaire des barrages du type poids massif est essentiellement boiteux, même si la fondation est horizontale, ce qui est nettement souligné par Tölke dans son ouvrage bien connu.

De même, la dissymétrie de la pression hydrostatique n'a exercé aucun effet nuisible sur l'équilibre des éléments boiteux. En fait, vu le moment d'inertie élevé de l'élément, les déformations causées par la pression hydrostatique sont minimales et n'ont jamais donné lieu à aucune tension de cisaillement par moments de torsion, ce qui est démontré par l'absence de toute lésion susceptible d'être imputée à pareille cause. D'ailleurs, un élément évidé du type considéré a lui-même une masse capable d'absorber et de distribuer les tensions, de manière à réduire au minimum le travail de déformation bien avant que l'on puisse constater, en un point quelconque de cette masse, des tensions inadmissibles ! N'oublions pas, d'autre part, qu'il s'agit là presque toujours d'une structure résistant par gravité.

Ne croyons pas, en outre, que, dans un élément évidé, les surfaces résistant au cisaillement soient trop petites¹.

Je suis convaincu, à ce sujet, que des contraintes de cisaillement bien plus importantes peuvent être constatées sur d'autres barrages du type mince.

4. Un nouveau type de barrage-poids évidé.

Dans l'intention de rapprocher autant que possible le prix unitaire du barrage évidé de celui du barrage massif et d'augmenter les avantages statiques de ce genre de construction, j'ai étudié en 1939 quelques types de barrage évidé qui ont été appliqués aux bassins d'accumulation du Trona et de l'Inferno, réalisés pendant la guerre, et suis parvenu, finalement, au type projeté en 1941 pour l'aménagement du Sabbione (actuellement en construction) et également appliqué au barrage de Bau Muggeris (Sardaigne) en 1947.

Les caractéristiques générales de ce type sont indiquées dans les dessins que nous verrons plus loin et qui concernent justement Bau Muggeris. Le barrage comprend des éléments évidés d'une largeur de 22 m. Fruit de chaque parement 1 : 0,45. En plus des caractéristiques statiques communes à ce barrage et aux autres types évidés, cet ouvrage présente une considérable stabilité au glissement et aux éventuelles actions transversales, chaque élément ayant un moment d'inertie fort élevé dans toutes les directions.

Au point de vue du coût, ce barrage évidé n'exige aucune augmentation de dosage du ciment, car les contraintes du béton dépassent d'environ 10 % celles d'un barrage massif. D'autre part, jusqu'à une certaine limite (englobant largement la limite nécessaire à assurer la résistance voulue), le dosage varie non point suivant l'effort, mais suivant la durée à garantir pour le béton d'un barrage.

Il n'y a naturellement aucune armature en fer et l'étude de la forme des éléments et de leurs cavités étant effectuée

¹ Dans les constructions récentes de ce type (hauteur de l'ordre de 60 m), si nous appelons h la hauteur de la retenue et b la demi-largeur d'un élément, la surface résistante de la section médiane verticale la plus allégée est d'environ $0,77 bh$; celle de la section de fondation du demi-élément atteint environ $0,50 bh$. Au total, la surface de contact d'un demi-élément (avec le demi-élément contigu et la fondation) s'exprime par $1,27 bh$. La poussée hydrostatique étant égale à $\frac{1}{2} bh^2$, le rapport T entre la poussée hydrostatique et les surfaces en question est de $\frac{h}{2,54}$. Pour $h = 60$ m, par exemple, nous aurions $T = 2,3$ kg/cm². En tant qu'indice — si moyen soit-il — de la contrainte de cisaillement, ce chiffre ne semble devoir engendrer aucune préoccupation ; il prouve que, même si la résistance à la poussée hydrostatique devait être entièrement supportée par le cisaillement sur la surface de contact, nous serions encore bien loin de la limite de rupture.

de manière à permettre l'utilisation multiple des coffrages, on peut affirmer — en s'appuyant aussi sur les nombreuses offres que des entreprises ont faites pour la construction des barrages évidés déjà réalisés ou en cours d'exécution — que le prix unitaire du béton de ce type de barrage dépasse de 2 à 3 % celui du béton d'un barrage massif.

L'économie de volume réalisable par l'emploi de ce type de barrage par rapport au type poids massif est représentée par les figures 2 et 3.

C. Les barrages-voûtes ou poids-voûtes

Ils peuvent avantageusement remplacer les barrages-poids massifs lorsque les conditions géométriques exigées par ce type de construction s'adaptent aux caractéristiques topographiques de la zone de barrage et lorsque les conditions géologiques sont particulièrement favorables. Il peut être utile de préciser que la dénomination de « barrage-poids-voûte » désigne les constructions où la contribution de la console¹ à la résistance de la pression hydrostatique est plus importante que celle de la voûte.

On tend à réserver en Italie à ce dernier type de barrage une valeur déterminée

du rapport $P = \frac{H^2}{Br}$ où H représente la hauteur du barrage, B l'épaisseur à la base et r le rayon moyen de courbure.

En d'autres termes, on a proposé de garder le nom de « barrages-poids » pour les barrages où le rapport ci-dessus est inférieur à 0,5, d'appeler « barrages-poids-voûtes » les barrages où P est compris entre 0,5 et 8 et de dénommer enfin « barrages-voûtes » les barrages où P est supérieur à 8.

Les premiers exemples de barrages-poids-voûtes ayant délibérément tenu compte de la résistance de la console entre autres ceux de Gibson, d'Owshee et de Deadwood réalisés aux Etats-Unis de 1926 à 1932.

Le premier exemple italien est celui du barrage du Piave, récemment terminé.

Les conditions topographiques exigées pour la construction des barrages-voûtes ne sont pas fréquentes dans la nature. C'est pourquoi, il faut souvent, pour de tels barrages, créer des surfaces d'appui nécessitant des fouilles importantes dans le rocher. Les conditions géologiques doivent être bonnes sur toute la hauteur du barrage — dans tous les cas meilleures que ne l'exigerait un barrage-poids massif ou évidé — ou tout au moins susceptibles d'être améliorées par des travaux de consolidation, car le barrage-voûte exerce de gros efforts de compression qui ne diminuent pas sur les flancs aussi fortement que pour le barrage-poids, en fonction de la réduction de hauteur. Les mauvaises conditions du rocher peuvent, dans la plupart des cas (compte tenu de la direction des forces), être corrigées par les systèmes modernes de consolidation, mais ces travaux exigent des dépenses considérables dont il faut mesurer l'importance au moment du choix du type de barrage.

Il faut enfin considérer — ce qui revêt une certaine valeur pour les zones sujettes aux tremblements de terre — que le barrage-voûte se présente dans d'excellentes conditions sous le rapport des accélérations dirigées perpendiculairement à la corde de l'arc, mais qu'il ne réagirait pas aussi favorablement

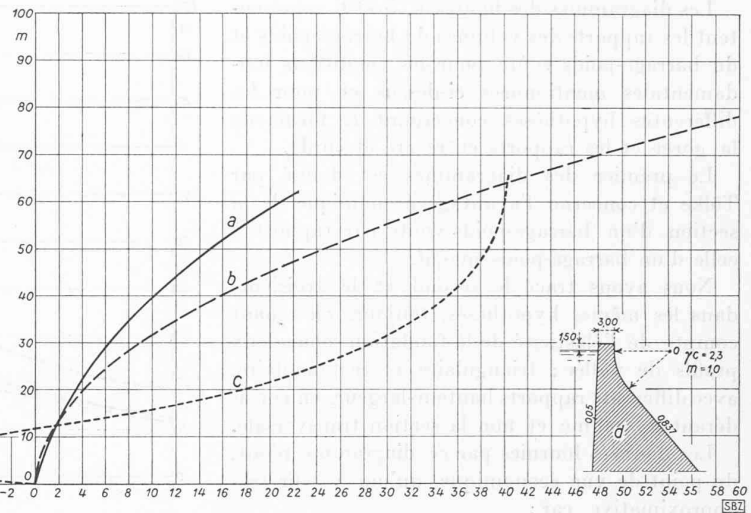


Fig. 2. — Comparaison entre les volumes d'un élément d'un barrage évidé type « Bau Muggerris » et d'un élément de même largeur d'un barrage poids-massif.

Ordonnée : hauteur du barrage jusqu'au plan d'eau en m ; abscisse : volumes de béton en 1000 m³ (courbes a et b), économie en % (courbe c). — a) Volume du barrage évidé type « Bau Muggerris » (un bloc de 22 m de largeur). — b) Volume du barrage massif suivant le type représenté sur la figure (largeur 22 m). — c) Economie en % du volume de béton d'un barrage évidé par rapport à b. — d) Coupe du barrage-poids massif.

à des sollicitations semblables approximativement parallèles à cette corde.

On peut affirmer de toute façon que le barrage-voûte a un domaine très précis d'applications, clairement défini par les caractéristiques de la zone de barrage.

Les possibilités de choix sont moins claires dans le cas des zones de barrage de vaste étendue ; dans ce cas, en effet, si l'allure rectiligne ou brisée de l'axe du barrage n'est pas imposée par les conditions locales, on peut généralement recourir à des barrages-poids massifs, évidés ou à contreforts ou bien encore à des barrages-poids-voûtes.

De l'avis de Tölke, la détermination de l'économie de volume d'un barrage-poids-voûte par rapport à un barrage-poids doit être faite en imposant à la console du barrage-poids-voûte des conditions identiques à celles qu'on impose au barrage-poids, aussi bien en ce qui concerne l'élimination des efforts de traction dans le sens vertical et l'égalité des compressions verticales maxima pour le lac plein et le lac vide qu'en ce qui concerne l'action des sous-pressions et des pressions interstitielles.

Ces conceptions — auxquelles se tiennent habituellement les Américains, constructeurs des premiers barrages-poids-voûtes — nous semblent très raisonnables ; plusieurs publications récentes d'auteurs américains expriment un avis semblable.

Admettant une section de forme triangulaire pour les deux types de barrage, Tölke détermine l'économie qui ressort de la comparaison de la section d'un barrage-poids-voûte avec celle d'un barrage-poids : cette économie augmente au fur et à mesure que diminue le rayon de courbure, autrement dit, elle est d'autant plus forte que l'effet de voûte du barrage-poids-voûte est plus prononcé.

Toutefois, si l'on tient compte de l'augmentation de longueur de l'arc développée causée par la courbure et de la forme des appuis, l'économie en question s'en trouve considérablement réduite et ne joue même plus de rôle dans le choix du type lorsque la largeur de la gorge dépasse le triple de la hauteur ou lorsque le rayon de courbure dépasse le triple de la hauteur.

¹ On sait qu'un barrage-voûte peut être divisé idéalement en anneaux et en consoles et que la charge se répartit entre ces deux éléments.

Les diagrammes des figures 4, 5 et 6 représentent les rapports des volumes du barrage-poids et du barrage-poids-voûte pour les conditions fondamentales mentionnées ci-dessus et pour les différentes hypothèses concernant la forme de la gorge et les rapports entre arc et corde.

Le premier des diagrammes est donné par Tölke et concerne l'avantage économique de la section d'un barrage-poids-voûte par rapport à celle d'un barrage-poids massif.

Nous avons tracé le second et le troisième dans les mêmes hypothèses, toujours en tenant compte de l'élasticité de la fondation, pour deux profils de vallée : triangulaire et rectangulaire, avec différents rapports hauteur-largeur, en considérant le volume et non la section transversale.

Les données fournies par ce diagramme n'ont, du point de vue économique, qu'une valeur très approximative, car :

- on a admis le même prix du béton pour le barrage-poids-voûte, le barrage massif et le barrage évidé ;
- on n'a pas tenu compte de l'importance différente des fouilles et des injections de consolidation de la fondation.

Si l'on renonçait aux conditions fondamentales ci-dessus pour l'équilibre de la console et si l'on adoptait d'autres profils que le profil triangulaire, le domaine d'application des barrages-poids-voûtes serait évidemment élargi. Il faut toutefois considérer, d'une part, qu'il n'est pas légitime de s'écarter sensiblement de ces conditions et, d'autre part, qu'à toute complication du profil correspond un déploiement plus important de moyens techniques et par conséquent un coût unitaire supérieur de la construction.

IV. Considérations diverses

J'ai tenu compte, dans toutes ces considérations sur les possibilités d'application de chaque type de barrage, du degré nécessaire de sécurité de l'ouvrage par rapport aux forces naturelles, sans considérer des forces imprévisibles dues à l'intervention de l'homme : sabotage ou guerre.

En effet, si l'on voulait considérer les facteurs ci-dessus (sabotage, guerre) lors de l'élaboration d'un projet de barrage, il serait très difficile de déterminer le type de barrage le moins vulnérable et il faudrait tenir compte aussi de la grande inconnue que représente l'incessante progression dans l'efficacité des moyens militaires offensifs et défensifs. Cette manière de faire pour les barrages nous conduirait alors logiquement — au vu de l'expérience de la dernière guerre — à envisager la construction de villes souterraines, l'élimination des ponts, des voies ferrées, etc.

Toujours sur la base des événements de la récente guerre, nous pourrions même affirmer que les barrages constituent un objectif peu intéressant, puisqu'ils n'ont subi que de rares attaques, dans des conditions tout à fait exceptionnelles.

Cela s'explique d'ailleurs aisément si nous considérons que les barrages constituent généralement un objectif difficile à atteindre et que, d'autre part, le dommage causé par leur destruction est bien inférieur à celui que les bombardements peuvent infliger aux localités habitées, aux nœuds de communications, aux lignes de transport d'énergie, etc.

Sans nous dissimuler l'importance des risques de guerre, nous ne devons pas considérer ces risques comme un facteur déterminant pour le choix d'un type de barrage.

La vidange partielle des bassins de grande capacité, plus

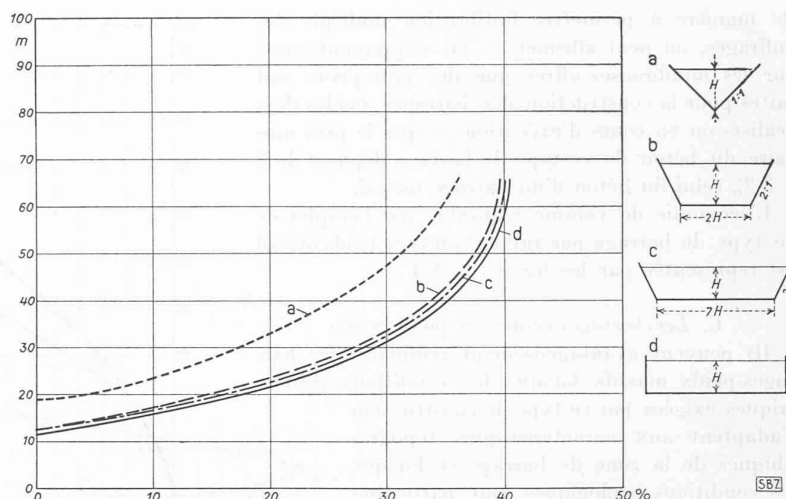


Fig. 3. — Economie possible en volume de béton pour le cas d'un barrage évidé du type « Bau Muggers » par rapport à un barrage-poids-massif de même hauteur et pour différents profils de vallées (a, b, c, d).

Ordonnées : hauteur du barrage jusqu'au plan d'eau en m
Abcisses : économie en % pour le barrage évidé.

exposés à des attaques militaires, est en général, dans les conditions actuelles de la technique, un moyen beaucoup moins coûteux et beaucoup plus efficace que l'adoption d'un type de barrage plutôt qu'une autre.

Les problèmes soulevés par le projet d'un barrage sont vastes et complexes et l'aperçu que je viens d'en donner est tout au plus destiné à en révéler les grandes lignes.

Néanmoins, la présente causerie n'aura peut-être pas été inutile si je pouvais nourrir l'espoir de voir sortir de ces considérations de principe, étendues et approfondies dans chaque cas particulier, une orientation pour l'établissement rationnel des projets, sur la base d'un critérium, à mon avis, fondamental, à savoir que la sécurité de l'ouvrage une fois garantie, l'ingénieur doit avoir pour but le maximum d'économie.

Qu'il me soit permis d'insister sur le scrupule d'objectivité qui doit inspirer le technicien, afin de lui permettre de résister au mirage, évidemment séduisant, de la nouveauté et de l'entreprise record et de l'empêcher de se faire l'apôtre de tel ou tel genre de construction, ce qui cause une vision

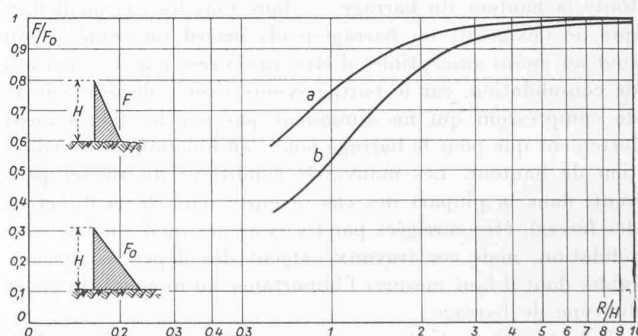


Fig. 4. — Comparaison entre barrage-poids-voûte et barrage-poids massif,

Ordonnées : rapport des surfaces F/F_0 . — Abcisses : rapport R/H selon Tölke (R rayon de courbure au centre de gravité de la section du barrage. — H hauteur du barrage. — F section d'un barrage-poids-voûte. — F_0 section d'un barrage-poids massif.) — a rapport F/F_0 dans le cas d'un sol rigide ($E = \infty$). — b rapport F/F_0 dans le cas d'un sol élastique (même module d'élasticité que pour le béton d'après Young).

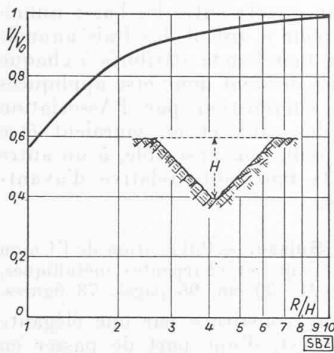


Fig. 5. — Comparaison entre un barrage-poids-voûte et un barrage-poids massif pour un profil en V, Ordonnées : rapport des volumes V/V_0 , Abscisses : rapport R/H .

unilatérale des choses, puisant, dans sa partialité même, sa force et sa faiblesse.

La courte vue des enthousiastes, même si elle est magnanime et parfois féconde, n'en est pas moins de la myopie, vouée à se heurter tôt ou tard, dans le domaine de la technique, à des démentis catégoriques.

J'ai fait allusion plus haut à un exemple italien, non sans conséquences, qui a démontré une fois de plus à quel point l'enthousiasme peut quelques fois cacher aux yeux des techniciens la vue des conceptions claires et saines.

Pour conclure, j'exprimerai une conviction personnelle que l'expérience de plusieurs années de projets et de constructions a affermi de plus en plus, à savoir : qu'au niveau du développement atteint par la technique de ces importants ouvrages, c'est l'emplacement même du barrage qui doit indiquer, par ses caractéristiques topographiques et géologiques, la meilleure solution au technicien compétent.

C'est dans cet esprit que j'ai orienté mon activité professionnelle, exercée tout d'abord pendant dix ans aux côtés d'un illustre ingénieur, M. Angelo Omodeo, avec qui j'ai collaboré au projet et à la construction d'une dizaine de barrages de différents modèles. C'est à cette orientation que je me suis efforcé de rester fidèle dans mon activité d'ingénieur et dans celle que je consacre, depuis douze ans,

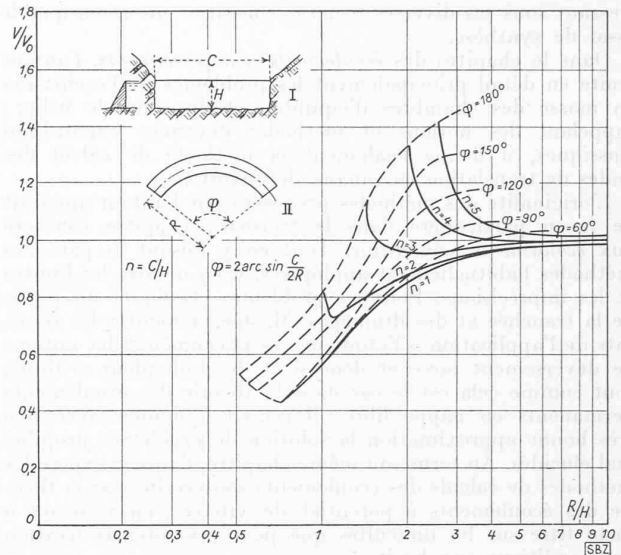


Fig. 6. — Comparaison entre un barrage-poids-voûte et un barrage-poids massif pour un profil en U.

Ordonnée : rapport des volumes V/V_0 . — Abscisse : rapport R/H ; paramètre $n = C/H$. — V volume du barrage-poids-voûte. — V_0 volume du barrage-poids massif. — R rayon de courbure du barrage-poids-voûte. — I coupe longitudinale du barrage. — II en plan du barrage.

au Groupe Edison ; activité qui m'a conduit, avec des responsabilités plus vastes et plus directes, à projeter et à diriger la construction de 22 barrages, dont 15 déjà construits et 7 en cours de réalisation à l'heure actuelle.

La plupart de ces barrages sont en Italie et appartiennent principalement au Groupe Edison de Milan, le plus important des groupements italiens de production et de distribution d'énergie électrique, qui produit déjà actuellement, grâce à ses 192 usines hydro-électriques, environ 6 milliards de kWh par an.

(A suivre)

BIBLIOGRAPHIE

Technische Hydraulik, par Ch. Jaeger, Dr ès sciences techniques, privat-docent à l'Ecole polytechnique fédérale, special lecturer at the Imperial College, Londres, et ingénieur-conseil. — Un vol. 464 p., nombreux graphiques et figures. Ed. Birkhäuser, Bâle 1949.

Au cours de ces vingt dernières années, l'hydraulique a fait de notables progrès. Ceux-ci sont dus pour une bonne part aux exigences pressantes posées par les aménagements de chutes d'eau, lors de la construction d'une foule d'ouvrages très divers.

Les résultats des travaux de recherche de nombreux laboratoires d'hydraulique sont venus s'ajouter aux observations plus anciennes et divers auteurs tentent aujourd'hui de regrouper, tout en les complétant, sous une forme facilement accessible au praticien, les lois fondamentales et les méthodes de calcul de la mécanique de l'eau.

L'ouvrage de M. Jaeger répond à ce but et le lecteur sera heureux d'y trouver une très abondante documentation jusque-là éparse dans divers articles ou traités signés par l'auteur ou d'autres hydrauliciens allant des plus anciens aux plus modernes. Il y a dans cet ouvrage un aspect éminemment plaisant qui résulte du souci de l'auteur de fournir, pour chacun des problèmes présentés, à côté de la solution qui lui paraît le mieux convenir, l'historique des diverses recherches qui ont permis d'aboutir. Ce souci va jusqu'à donner en notes infrapaginales, non seulement de nombreuses

références bibliographiques, mais aussi des indications fort intéressantes sur la vie et les œuvres des hydrauliciens aujourd'hui disparus. C'est dire qu'aucun résultat n'est présenté sans que le lecteur puisse juger facilement de la valeur des bases sur lesquelles il s'appuie. Le texte est persuasif et riche en démonstrations, que celles-ci fassent appel soit aux développements mathématiques, soit aux résultats de l'observation en vraie grandeur ou sur modèles réduits.

Après avoir rappelé quelles sont les propriétés physiques fondamentales de l'eau et des écoulements et les notions classiques qui les caractérisent (chiffre de Reynold, de Reech-Froude ; écoulements laminaire et turbulent ; lois de similitude ; pertes de charge, rugosité ; etc.), l'auteur scinde son exposé en trois parties essentielles : écoulements permanents, non permanents et souterrains.

Dans le chapitre des écoulements permanents, après avoir rappelé les équations de base, il montre tout le parti que l'on peut tirer, plus spécialement pour l'étude des écoulements en nappe libre, de l'application des notions de ligne d'énergie (théorème de Bernoulli) et de quantité de mouvement. En cela, il va jusqu'à proposer une représentation et une mise en équation des phénomènes permettant de prendre en compte l'effet de l'inégale répartition des vitesses en section transversale et de la courbure des filets. Tout en faisant toucher du doigt l'imprécision des calculs avec vitesses moyennes et sans courbure, il indique pour suppléer à ce manque un outil mathématique d'application plus générale que celui communément utilisé. Ce chapitre qui se termine par l'examen des écoulements brusquement variés