Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 75 (1983)
Heft: 9

Artikel: Des barrages : pour qui, pour quoi?
Autor: Sinniger, Richard
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941278

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: 28.12.2025

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

Des barrages – pour qui, pour quoi?

Richard Sinniger

Résumé

Les conséquences des fortes variations naturelles des débits dans les cours d'eau ainsi que l'influence et les différentes manières d'utilisation des lacs et des réservoirs artificiels sont décrites. L'évolution du nombre des barrages et le développement technique dans la conception des digues sont discutés. Un jugement des connaissances actuelles, suivi de quelques remarques concernant l'évolution future, conclut l'exposé.

Zusammenfassung: Talsperren – für wen und wozu?

Vorerst werden die Folgen des stark variierenden natürlichen Wasserangebotes beschrieben sowie der Einfluss und die Nutzungsarten der Seen und künstlichen Speicher diskutiert. Die zahlenmässige Entwicklung im Talsperrenbau sowie die technische Evolution im Dammbau werden erörtert. Abschliessend folgt eine Beurteilung der heutigen Kenntnisse und einige Hinweise auf zukünftige Entwicklungen.

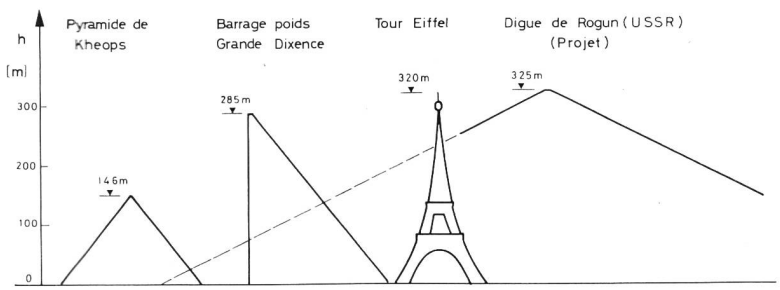
Summary: Dams – for whom and for what purposes?

The consequences of the important variations of flow in the water courses as well as the influence and the different utilization of lacs and reservoirs are described. The evolution of the number of dams and the technical development in the earth dam design are discussed. A judgement on the actual knowledge followed by some remarks concerning the future evolution concludes the paper.

Les réponses aux deux questions pour qui et pour quoi devront montrer l'intérêt que l'homme a d'influencer les cours d'eau par des barrages. L'analyse de cet intérêt me semble particulièrement justifiée aujourd'hui en Suisse, où une société de consommateurs profite journellement des progrès techniques, tout en s'opposant à une poursuite mesurée des types de projets qui ont déjà fait preuve de leur utilité.

Mais la réalisation des barrages n'est pas seulement une fonction des besoins de l'homme. En effet, il a fallu que des ingénieurs inventent des techniques de réalisation et élaborent des méthodes d'analyse pour garantir la réussite des ouvrages. L'évolution dans le domaine des barrages est particulièrement intéressante et typique pour démontrer la démarche de l'ingénieur civil. J'aimerais donc ajouter, dans une deuxième partie de mon exposé au «pour qui et pour quoi», le «comment». Ceci me permettra d'esquisser, en prenant pour exemple de barrages les digues, les progrès faits dans la construction de ces ouvrages, dont les plus hauts comptent parmi les constructions les plus imposantes jamais réalisées par l'homme (figure 1).

Figure 1. Hauteur de quelques ouvrages de génie civil.



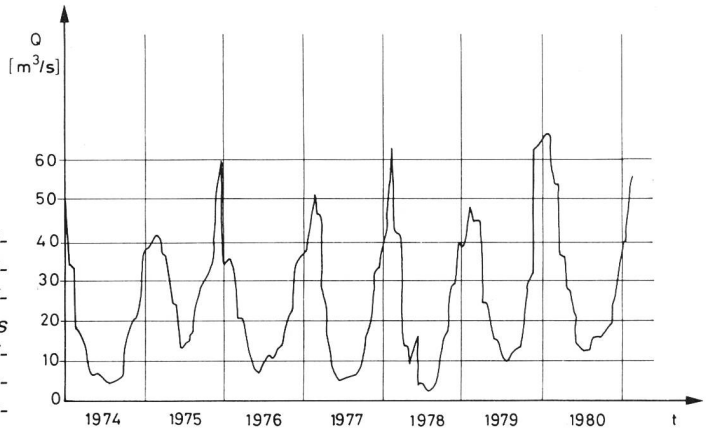


Figure 3. Débits moyens mensuels d'un cours d'eau.

Malgré le développement remarquable constaté au 20e siècle dans le domaine des barrages, un grand nombre de problèmes attendent encore leurs solutions. La partie finale de cette leçon fera donc mention des plus importantes questions à résoudre et montrera que l'enseignement, dans ce domaine, n'est pas une simple transmission de règles et de formules éprouvées, mais aussi une motivation pour chercher des réponses aux points encore ouverts.

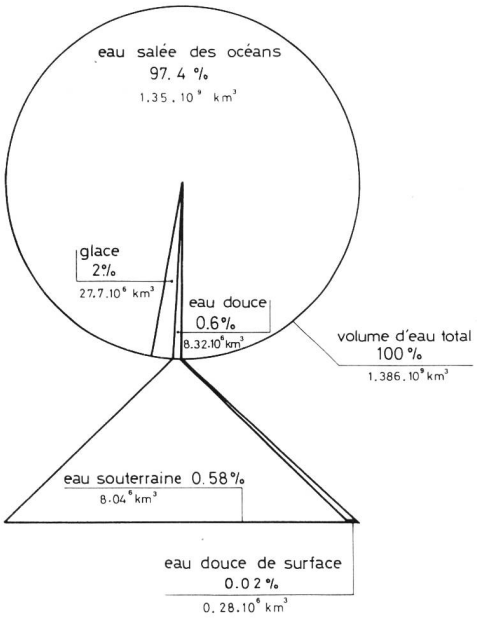
L'eau – prospérité et menace

Il est sans doute oiseux de démontrer ici l'importance de l'eau pour l'existence de l'homme, de la faune et de la flore. Mais il importe de se rendre compte de quelles quantités – notamment en eau douce de surface – l'on dispose sur notre globe. La figure 2 montre de quel faible pourcentage du volume total de l'eau il s'agit.

Une population mondiale en augmentation, avec des besoins en eau croissants et une pollution alarmante de nos eaux douces de surfaces, demande qu'un soin particulier soit apporté à cette matière première si précieuse.

L'eau douce de surface, notamment les précipitations et les écoulements dans les cours d'eau en résultant, présente deux caractéristiques bien particulières:

Figure 2. Répartition de l'eau sur le globe.



– forte variation de la quantité disponible d'un point du globe à l'autre;
– forte variation du débit dans les cours d'eau en fonction du temps.

Une observation du débit écoulé en un point donné d'une rivière nous montre des périodes de basses eaux, suivies de périodes riches en eau avec des pointes occasionnelles (figure 3).

Les conséquences de cette irrégularité dans la disponibilité de l'eau sont évidentes. En périodes sèches, sans précipitations sous forme de pluie, les cours d'eau présentent un apport minimal qui risque de compromettre l'alimentation en eau potable, la production des aliments, la transformation en énergie ou la navigation. En période pluvieuse ou de forte fonte de neige par contre, la surabondance en eau menace les terres occupées par l'homme.

Mais la pénurie ou le surplus ne sont pas les seules conséquences de l'eau s'écoulant dans les rivières. L'effet perpétuel du ruissellement de l'eau a produit et continue de produire des érosions superficielles, modifiant ainsi la topographie des bassins versants et la forme des lits.

Ces derniers sont particulièrement affectés par l'érosion sur les tronçons de forte pente d'une part et par l'ensablement des tronçons à faible pente d'autre part. L'énergie potentielle, inhérente à l'eau dans les rivières, conduisant à l'érosion et au transport de matières solides, offre par contre la possibilité de transformation en énergie électrique.

Cet aspect du contrôle des cours d'eau est particulièrement connu dans nos régions mais ne figure pas forcément au premier rang dans d'autres régions à climats différents.

Dans cette variation de la disponibilité de l'eau, les lacs naturels et artificiels jouent un rôle particulièrement favorable. Ils constituent tout d'abord une réserve d'eau importante que l'on peut utiliser pendant les périodes sèches, mais jouent également un rôle d'amortissement au cours des crues.

En effet, le débit croissant à l'entrée du lac ne peut pas faire augmenter le débit sortant du lac sans que le plan d'eau de ce dernier ne s'élève. Cette augmentation du plan d'eau absorbe, selon la surface du lac, une quantité d'eau de crue plus ou moins importante et protège ainsi la vallée à l'aval du lac des conséquences des pointes de crues (figure 4).

L'utilisation que l'on peut faire des réservoirs permet de

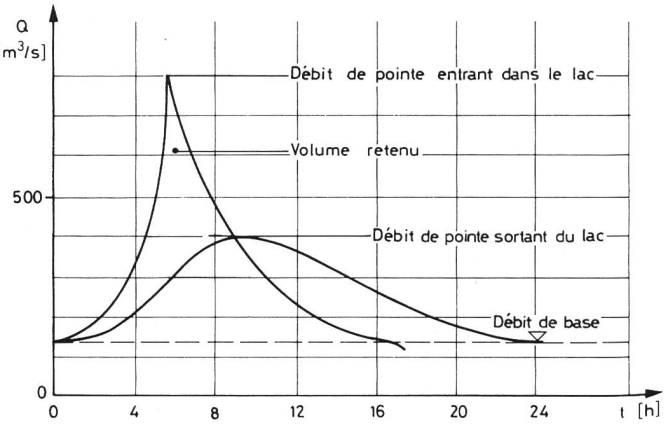


Figure 4. Effet d'amortissement d'un lac en cas de crue.

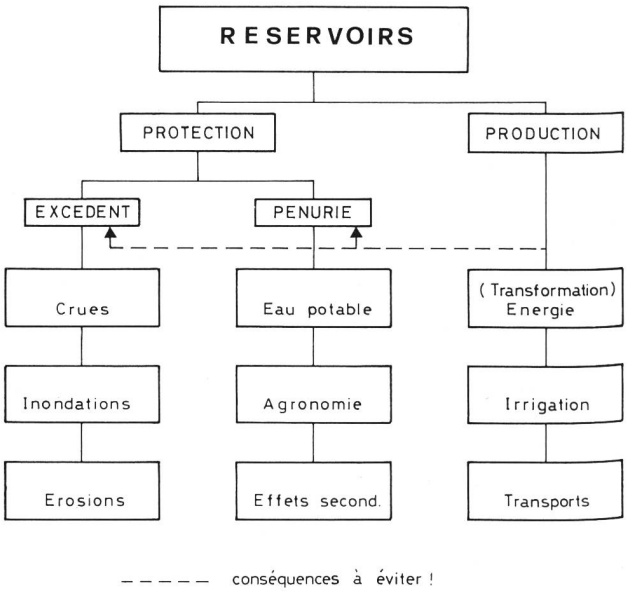


Figure 5. Possibilités d'exploitation des réservoirs.

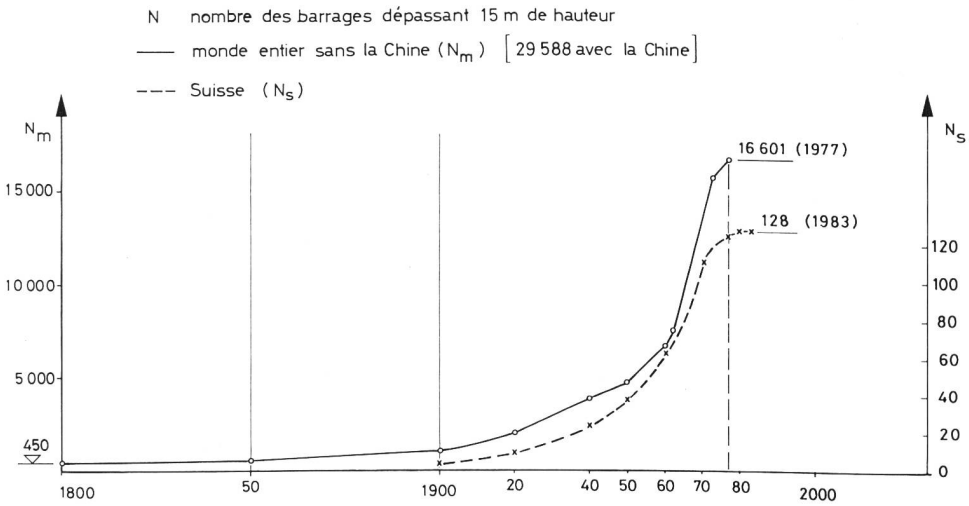


Figure 6. Evolution dans la construction des barrages.

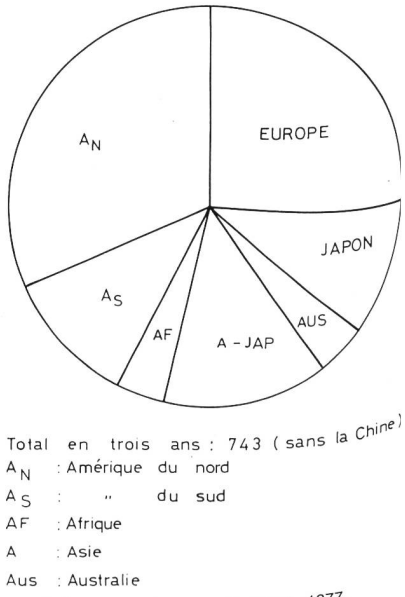


Figure 7. Barrages mis en service 1975–1977.

les classer schématiquement dans les deux grandes catégories suivantes (figure 5):
– Protection (contre l'excédent et la pénurie)
– Production (y compris les transports)

Passant en revue les effets favorables des réservoirs, il n'est guère étonnant que l'homme, depuis longtemps, ait cherché à créer des lacs artificiels au moyen de barrages.

Le premier témoin de l'esprit d'entrepreneur de l'homme se trouve en Egypte où quelque part entre 2950 et 2750 avant J.-C. une digue d'une hauteur d'environ 11 m a été réalisée pour stocker de l'eau potable. On sait que cette digue (portant le nom Sadd-el-Kafara) n'a duré qu'un temps très limité, comme d'ailleurs beaucoup d'autres ouvrages de ce type dans l'Antiquité. Néanmoins la digue de Marib, au Yémen du Nord d'aujourd'hui, a duré plus de 800 ans, avant d'être détruite par une crue exceptionnelle en 575 de notre ère.

Il a fallu attendre pratiquement le 20e siècle pour que l'homme crée les outils scientifiques qui lui permirent de comprendre les échecs et par conséquent de faire mieux.

Mais c'est aussi le 20e siècle qui, avec la forte croissance de la population et l'industrialisation, a apporté un réel essor dans la construction des barrages, comme le montre la figure 6. Deux choses sont remarquables sur cette figure:
– la Suisse a réalisé en moins d'un siècle la majeure partie de ses barrages, dont quelques-uns étaient des ouvrages pionniers;
– sur le plan mondial, le besoin en barrages de retenue est encore très grand, notamment dans les pays en voie de développement.

En effet, le début d'un développement, dans un pays ou une région, nécessite toujours une certaine sécurité dans l'alimentation en eau douce, dans la protection contre les inondations et très souvent dans la disponibilité d'énergie électrique. La Suisse a bien senti l'activité croissante dans le domaine des barrages sur le plan mondial. En effet, malgré la forte réduction dans la réalisation des barrages chez nous, le nombre des ingénieurs occupés en Suisse dans ce secteur a augmenté. A certains moments le besoin était même si important que le recrutement a dû s'étendre au-delà de nos frontières.

Mais une fois que le développement commence à porter ses fruits, le besoin de se protéger contre les caprices de la nature ou le besoin en énergie deviennent encore accrus. Il n'est donc pas étonnant que l'augmentation importante du nombre total des barrages entre 1975 et 1977 (dernières années de la statistique CIGB, Commission Internationale des Grands Barrages, disponible) est encore due aux pays industrialisés (figure 7).

Le nombre impressionnant de barrages réalisés dans le monde entier nécessite une courte analyse. Le registre mondial établi en 1962 permet un classement par type de barrage, ce qui est représenté à la figure 8. Le pourcentage élevé des digues par rapport aux barrages en béton est frappant et donne un indice à l'enseignant du poids à donner dans ses cours à chaque type de barrages. Notons encore que l'évolution après 1962, date du registre, laisse supposer que les digues prennent encore davantage d'importance.

Ce n'est donc pas par hasard que j'aimerais examiner maintenant un peu plus en détail ce type de barrage.

Défi de construire des barrages, hier et aujourd'hui

Un grand nombre de digues réalisées avant notre siècle étaient des digues construites avec un seul matériau. Encore en 1907, le ministère de l'agriculture de Prusse dans ses prescriptions concernant la réalisation des digues ne connaissait qu'un seul matériau de construction. Il faut pourtant préciser que l'étude des anciens profils des digues montre bien que le besoin d'un certain zonage a été ressenti assez tôt déjà. D'une part il a fallu protéger la surface des digues, notamment la partie en contact avec l'eau, contre l'effet des érosions superficielles et d'autre part le besoin d'une zone peu perméable et stable contre l'érosion interne était reconnu. Ainsi des solutions assez originales ont été réalisées au 16e ou 18e siècle par exemple en Allemagne comme le montre la figure 9.

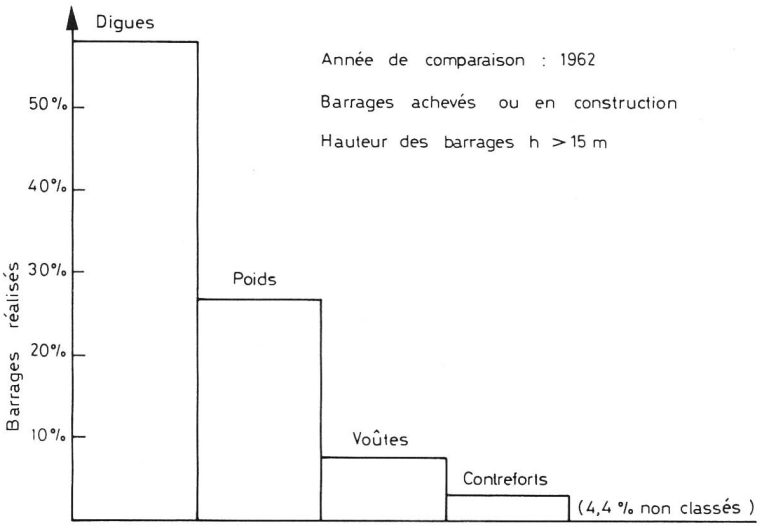


Figure 8. Répartition des barrages par type.

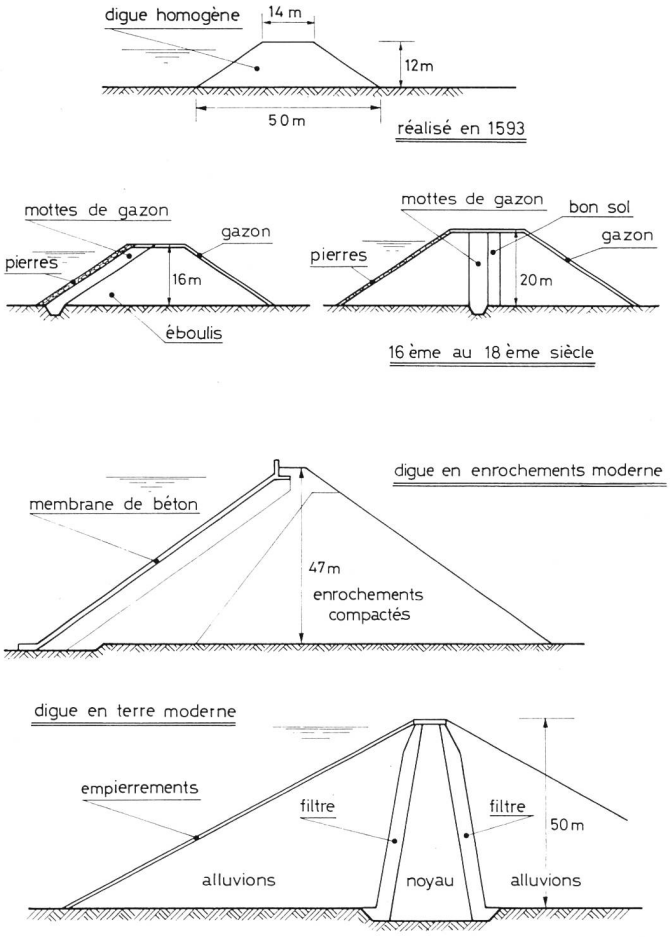


Figure 9. Exemples de digues.

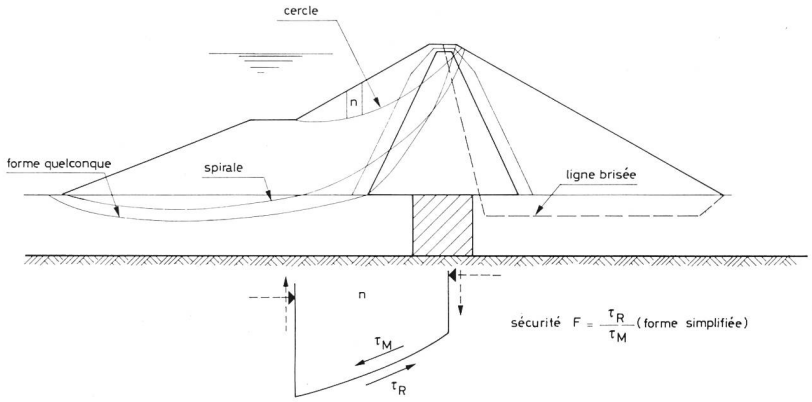


Figure 10. Différentes surfaces de rupture admises.

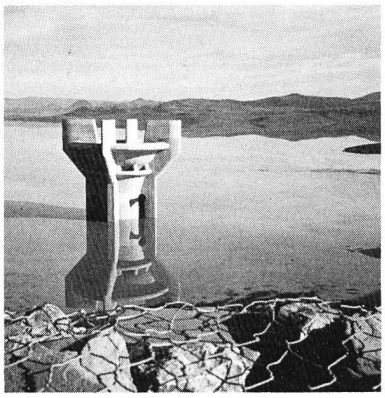


Photo 2. Lac artificiel avec évacuateur, particulièrement conçu pour l'amortissement des crues (Photo de l'auteur).

Pour des raisons tout à fait évidentes, l'utilisation de matériaux organiques ou de tôles en acier n'a pas duré longtemps, mais la disposition d'un élément peu perméable, soit à la surface amont ou quelque part entre celle-là et le centre de la digue, est restée jusqu'à nos jours.
En ce qui concerne l'inclinaison des pentes amont respectivement aval des digues, éléments essentiels pour garantir la stabilité des ouvrages, il est surprenant de constater qu'il a fallu attendre les années 30 pour disposer des outils nécessaires au dimensionnement.
Pourtant un modèle mathématique permettant l'analyse de la stabilité dans un massif constitué de matériaux meubles, naturels ou remblayés a été présenté en 1916 déjà en Suède pour un mur de quai. Mais les caractéristiques des matériaux à considérer, notamment la résistance au cisaillement et les pressions interstitielles dans la surface de glissement admise, étaient encore très mal connues. Il a fallu élaborer tout d'abord les instruments et outils de laboratoire pour analyser les propriétés des matériaux.
La méthode de calcul qui s'est établie ensuite (figure 10) et qui s'est conservée dans son principe jusqu'à nos jours compare, le long d'une surface de rupture admise, les forces stabilisantes maximales possibles avec les forces motrices effectives. Leur quotient est appelé facteur de sécurité *F*.
Pour la recherche d'un profil de digue stable, les pentes extérieures sont modifiées jusqu'à ce que la surface de rupture admise la plus défavorable nous donne un facteur *F* égal à une valeur admissible préconisée au préalable. A partir de 1960, les ordinateurs toujours plus rapides et puissants ont largement facilité ces calculs et un grand nombre de digues, qui donnent entière satisfaction, ont été dimensionnées de cette façon.
Mais que signifient ce modèle mathématique, ces caractéristiques des matériaux déterminés en laboratoire et que signifie finalement ce coefficient de sécurité *F?* Toutes ces questions m'amènent à la dernière partie de mon exposé, touchant quelques problèmes actuels dans ce domaine.

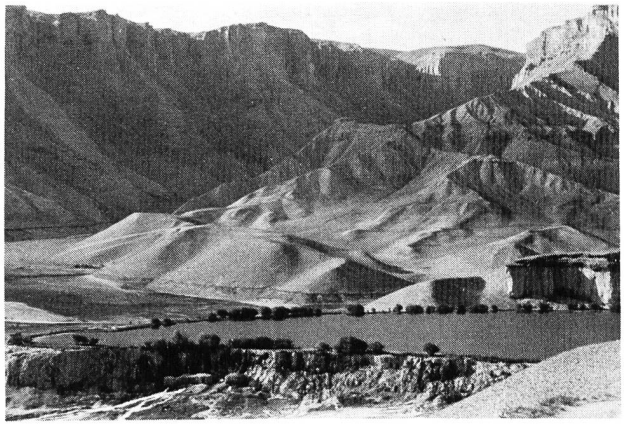
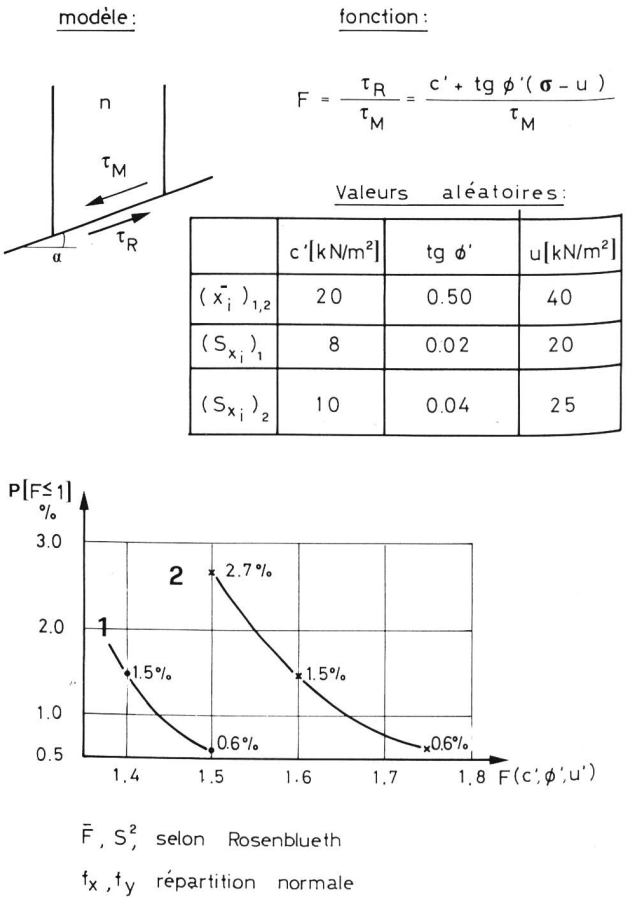


Photo 1. Lac naturel en Afghanistan formant son propre barrage par décantation de chaux (Photo Dr *Hager*).

Invitation à l'innovation

Commençant par le modèle mathématique il faut tout de suite remarquer que le mouvement de la masse, au-dessus de la surface de glissement admise, n'est pas uniforme. Cette imprécision du modèle vient du fait que les déformations des matériaux ne sont pas considérées. Pourtant on sait que de telles déformations ont lieu bien avant qu'un éventuel glissement ne se manifeste. Elles dépendent des

Figure 11. Relation probabilité *P* – sécurité *F*.



	c'[kN/m²]	tg φ'	u[kN/m²]
$(\bar{x}_i)_{1,2}$	20	0.50	40
$(S_{x_i})_1$	8	0.02	20
$(S_{x_i})_2$	10	0.04	25

Photo 3. Lac artificiel pour l'irrigation et la protection contre les crues (Photo de l'auteur).

propriétés mécaniques des matériaux, de la pente de la digue et des influences extérieures. Comme un facteur de sécurité *F* ne peut pas se mesurer pour une digue, mais que les déformations par contre sont faciles à obtenir, il serait beaucoup plus judicieux de créer des critères de déformations à la place des facteurs de sécurité peu significatifs. Une récente thèse de notre école, élaborée dans le domaine de la mécanique des roches, vise d'ailleurs déjà cette direction.

Dans le domaine des matériaux, les efforts actuels tendent à mieux en décrire les caractéristiques. Une propriété particulière est insuffisamment définie par une seule valeur, par exemple la moyenne de l'angle de frottement interne. Chaque caractéristique est en réalité une valeur aléatoire qui peut être décrite par le biais de distribution. Il s'agit donc de trouver la distribution de la probabilité d'une fonction à plusieurs variables aléatoires, dans notre cas l'expression de la sécurité *F*. La figure 11 donne les résultats d'un exemple simplifié, montrant l'influence remarquable de la dispersion des propriétés mécaniques sur la probabilité de rupture.

Ces méthodes probabilistes facilitent donc le jugement des matériaux et mettent en évidence – par la probabilité de rupture résultant des calculs – que le soin dans le choix et la mise en place des matériaux sont bien justifiés et contribuent, dans une large mesure, à la sécurité de l'ouvrage.

Finalement il faut encore mentionner l'analyse des digues sous l'effet des tremblements de terre. Dans ce domaine il reste encore une longue distance à parcourir avant que des méthodes rationnelles soient devenues intelligibles à la majorité des ingénieurs.

La connaissance des lois de contraintes – déformations, sous sollicitation dynamique, est indispensable. Si les installations de laboratoire correspondantes font défaut, des progrès dans ce domaine sont difficilement réalisables.

Si nous passons en revue ces nombreux points où la recherche doit encore approfondir et compléter nos connaissances et si nous nous rendons compte du fait que la réalisation de digues importantes continue jour après jour, nous ne pouvons pas éluder la question de la tâche et de la mission primordiale de l'ingénieur. En effet, il lui incombe de réaliser et de concrétiser tout d'abord ses idées, se basant sur son expérience et son intuition. Les ouvrages sont donc le moteur de la stimulation pour tout progrès technique et scientifique. Mais pour en arriver là, l'ingénieur doit manifester un esprit d'entrepreneur associé à un profond sentiment de responsabilité.

Si l'école arrive à montrer ce chemin aux futurs ingénieurs du génie civil, elle a bien rempli sa mission d'enseignement.

Leçon inaugurale présentée le 10 juin 1983 par *Richard Sinniger*, professeur, Chaire de constructions hydrauliques (CCH), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Département de génie civil, CH-1015 Lausanne-Ecublens.

Die grössten Dämme der Welt – 1983

T. W. Mermel

Water Power & Dam Construction

Der Verfasser und der erste Herausgeber, der Redaktor der Fachzeitschrift «Water Power and Dam Construction», danken einmal mehr allen Freunden und Kollegen aus der ganzen Welt, die ihnen geholfen haben, die Tabellen zu vervollständigen und zu berichtigen.

Höchste Talsperren der Welt

Rang	Name	Land	Grösste Höhe über der Fundation (m)
1	Rogun*	USSR	335
2	Nurek	USSR	300
3	Grand Dixence	Switzerland	285
4	Inguri	USSR	272
5	Boruca*	Costa Rica	267
6	Vaiont	Italy	262
7	Chicoasén	Mexico	261
8	Tehri*	India	261
9	Kishau*	India	253
10	Guavio*	Colombia	250
11	Mica	Canada	245
12	Sayano-Shushensk	USSR	245
13	Mauvoisin	Switzerland	237
14	Chivor	Colombia	237
15	Oroville	USA	235
16	Chirkei	USSR	233
17	Bhakra	India	226
18	El Cajón*	Honduras	226
19	Hoover	USA	221
20	Contra	Switzerland	220
21	Dabaklamm*	Austria	220
22	Mratinje	Yugoslavia	220
23	Dworshak	USA	219
24	Glen Canyon	USA	216
25	Toktogol	USSR	215

* Geplant oder im Bau

Talsperren mit dem grössten Volumen

Rang	Name	Land	Dammvolumen $m^3 \times 10^3$
1	New Cornelia Tailings	USA	209 500
2	Tarbela	Pakistan	121 720
3	Fort Peck	USA	96 049
4	Yacyretá-Apipe*	Paraguay/ Argentina	81 000
5	Guri*	Venezuela	75 700
6	Rogun*	USSR	71 100
7	Oahe	USA	70 339
8	Mangla	Pakistan	65 651
9	Gardiner	Canada	65 440
10	Tucuruí*	Brazil	64 300
11	Afsluitdijk	Netherlands	63 430
12	Oroville	USA	59 639
13	San Luis	USA	59 382
14	Garrison	USA	50 845
15	Cochiti	USA	50 230
16	Tabqua (Thawra)	Syria	46 000
17	Bennett W.A.C. (Portage Mt.)	Canada	43 700
18	Boruca*	Costa Rica	43 000
19	Nurek	USSR	42 670
20	Aswan (High)	Egypt	42 620
21	Kiev	USSR	42 400
22	Saratov	USSR	40 400
23	Mission Tailings	USA	40 088
24	Fort Randall	USA	38 380
25	Chapetón*	Argentina	37 910

* Geplant oder im Bau

Grösste Stauseen

Rang	Name	Land	Seevolumen $m^3 \times 10^6$
1	Owen Falls	Uganda	204 800
2	Bratsk	USSR	169 270
3	Aswan (High)	Egypt	164 000
4	Kariba	Zimbabwe	160 368
5	Akosombo	Ghana	148 000
6	Daniel Johnson	Canada	141 852
7	Guri (Raul Leoni) (Final Stage)	Venezuela	136 335
8	Bennett W.A.C. (Portage Mt.)	Canada	74 250
9	Krasnoyarsk	USSR	73 300
10	Zeya	USSR	68 400
11	Cabora Bassa	Mozambique	64 000
12	La Grande 2	Canada	61 720
13	La Grande 3	Canada	60 020
14	Ust Ilim	USSR	59 300
15	Saratov	USSR	58 500
16	Volga-V.I. Lenin (Kuibyshev)	USSR	58 000
17	Caniapiscau (KA-3, KA-4 & KA-5)	Canada	53 800
18	Chapetón*	Argentina	53 700
19	Shintoyone	Japan	53 500
20	Upper Wainganga*	India	50 700
21	Bukhtarma	USSR	49 800
22	Atatürk*	Turkey	48 700
23	Cerros Colorados	Argentina	48 000
24	Irkutsk	USSR	46 000
25	Tucuruí*	Brazil	43 000

* Geplant oder im Bau

Wasserkraftanlagen mit den grössten Leistungen

Rang	Name	Land	Nennleistung heute (MW)	Nennleistung geplant (MW)
1	Itaipú	Brazil/ Paraguay	2800	12 600
2	Guri (Raul Leoni) (final stage)*	Venezuela	2300	10 000
3	Tucuruí	Brazil		8000
4	Grand Coulee	USA	6494	6494
5	Sayano-Shushensk	USSR	6400	6400
6	Corpus Posadas	Argentina/ Paraguay		6000
7	Krasnoyarsk	USSR	6000	6000
8	La Grande 2	Canada	2000	5328
9	Churchill Falls	Canada	5225	5225
10	Bratsk	USSR	4500	4500
11	Ust-Ilim	USSR	3675	4500
12	Yacyretá-Apipe*	Argentina/ Paraguay	2700	4050
13	Cabora Bassa	Mozambique	2000	4000
14	Rogun*	USSR		3600
15	Paulo Afonso I	Brazil	1524	3409
16	Ilha Solteira	Brazil	3200	3200
17	Gezhouba	P.R. of China		2715
18	John Day	USA	2160	2700
19	Nurek	USSR	900	2700
20	Revelstoke	Canada	900	2700
21	São Simão	Brazil	2680	2680
22	Mica	Canada	1736	2610
23	Volgograd 22nd Congress	USSR	2563	2563
24	Itaparica*	Brazil		2500
25	Chicoasen	Mexico		2400

* Geplant oder im Bau

Die allgemeine weltweite Rezession hat für die Bautätigkeit von Staudämmen und Staumauern auch eine markante Verlangsamung gebracht. Trotzdem ist das Volumen immer noch beträchtlich, da viele Länder ihre sauberen Energiereserven ausschöpfen möchten.

Diese Tabelle wurde der Fachzeitschrift «Water Power and Dam Construction» vom August 1983, Seite 43, entnommen. Wir danken *Fabian Acker,* Editor, für die Bewilligung zur Wiedergabe der Tabelle in unserem Heft. Im «Water Power and Dam Construction» sind zusätzlich noch 278 Wasserkraftanlagen alphabetisch aufgelistet. Dazu werden auch die wichtigsten Kennziffern der Anlagen gegeben.