

n°9

hiver 2010

« POUR mémoire »

comité
d'histoire

...

• revue du ministère de l'Écologie, du Développement durable des Transports et du Logement •

Antoine-Rémy Polonceau



André Coyne



Les barrages en France du XVIII^e à la fin du XX^e siècle

Histoire, évolution technique et transmission du savoir

par **Jean-Louis Bordes**, ingénieur des Arts et Manufactures,
Docteur en histoire

Les barrages sont des ouvrages dont l'origine se perd dans la nuit des temps. On en retrouve des restes dans toutes les civilisations dont beaucoup n'avaient aucun contact entre elles ni dans le temps ni dans l'espace¹.

Un barrage n'est jamais qu'un élément technique parmi d'autres dont l'ensemble constitue un aménagement des eaux qui a pour but de satisfaire un ou plusieurs besoins simultanés. Sa singularité et sa complexité justifie néanmoins qu'il soit l'objet de développements particuliers.

La réalisation d'un barrage se trouve au carrefour de plusieurs problématiques, technique, environnementale et sociétale. Qu'ils soient petits ou grands, les barrages posent de multiples problèmes d'insertion dans l'environnement. Ils modifient le cours des choses au sens propre comme au figuré, l'effacement

d'un paysage et la création d'un autre étant peut-être le moindre des changements. Ils n'en posent pas moins souvent un grave problème pour la société qui vit sur leurs territoires dont ils bouleversent les modes de vie et de circulation.

Au plan technique c'est à une époque donnée, l'expression la plus achevée de la mise en œuvre des techniques et des savoirs relatifs aux sciences de la nature, à celle des matériaux, des structures, des procédés de construction en un mot de l'art de bâtir. On peut parler à propos de barrage de système technique. Le risque inhérent à l'existence des barrages, dont la durée de vie est exceptionnellement longue, pose le problème au-delà de la constitution du savoir technique, de la transmission de celui-ci. Très tôt, les circulations techniques et transferts technologiques se sont opérés au-delà

des frontières nationales. Des structures étatiques et d'initiative privée furent créées afin de faciliter conservation et transmission du savoir et par la même d'améliorer l'économie et la sécurité des structures.

Dans une première partie, nous nous proposons à partir d'un panorama historique de décrire les grandes étapes de l'évolution des barrages en rappelant des œuvres ayant marqué leur époque en apportant un progrès voire constituant un saut technologique. Nous nous limiterons dans le temps en commençant au début du XVII^e siècle et

¹ *Pour une connaissance générale de l'histoire des barrages, consulter : N. Smith History of dams, London, Peter Davies, 1971, 1 vol, 279 p. N. Schnitter A history of dams, the useful pyramids, Rotterdam, Balkema, 1994, 1 vol, 266 p.*

dans l'espace au territoire de la France. Néanmoins, il sera impossible de ne pas rappeler certains acquis antérieurs et de ne pas faire état de certaines avancées en dehors du territoire national. Cette limitation n'est pas un handicap. La France a occupé une place particulière dans la technique des barrages, soit par leur nombre au cours du XIX^e siècle, soit par un ensemble d'innovations et d'ouvrages exceptionnels. On décrira la mobilisation des ressources, et les mises en valeur des bassins ou massifs montagneux (la Seine, le Rhône, le Rhin, le Massif Central, les Alpes et les Pyrénées), avec leurs caractéristiques propres. On montrera l'évolution des finalités des barrages, le poids de la finalité énergétique, l'importance de la loi sur l'eau de 1919.

Dans une deuxième partie, on examinera la lente et souvent difficile constitution des outils techniques nécessaires à une maîtrise de plus en plus grande de la réalisation des ouvrages. Un savoir bien que limité, s'était constitué bien avant le temps des ingénieurs. Un barrage est en soi un produit par excellence de la méthode expérimentale, enrichie par les apports successifs de la mécanique, des sciences de la nature, et par l'évolution des techniques.

La solution technique proposée par les ingénieurs pour réaliser un barrage résulte d'un compromis entre les besoins à satisfaire, les données du site et les moyens techniques disponibles à une époque donnée. On y retrouve en d'autres termes, l'influence de la géographie, les pratiques culturelles dans l'art de construire, et les blocages propres à toute organisation humaine.

Enfin dans une troisième partie, on suivra les efforts pour assurer la formation du savoir et sa transmission qui ne peut se faire qu'à une échelle internationale. A partir du XVIII^e siècle, avec l'émergence de l'ingénieur, les premiers traités, les premières écoles d'ingénieurs constituèrent autant d'instruments ou d'organes de recueil et de transmission du savoir. S'y ajoutent les corps d'État qui agissent en ce sens à travers les missions qui leur sont dévolues. Assez rapidement les sociétés savantes créées au cours du XIX^e et au début du XX^e siècle jouent un rôle sinon identique du moins constituent des forums de débat et de recueil d'expériences où des propositions émergent.

Dans le processus historique dans lequel les accidents s'inscrivent, les problèmes de sécurité se font de plus en plus prégnants, d'autant plus que les barrages, ouvrages vivants, s'inscrivent dans le temps. Ils vieillissent, peuvent être malades et mourir, ou plus simplement être abandonnés ou détruits car ils ne correspondent plus à aucune finalité. Ces processus doivent être maîtrisés. Les notions de contrôle et de surveillance, d'auscultation se sont développées en conséquence, et ont conduit à une réglementation toujours à améliorer. Celle-ci s'appliquant à un ouvrage complexe se doit d'éviter tout dogmatisme qui empêcherait d'utiliser toute la richesse de la méthode expérimentale.

Le résultat de ces travaux séculaires constitue un patrimoine économique, historique, technique, environnemental et sociétal. Sa gestion, son entretien,

son évolution renvoient à toute une histoire dont on ne peut pas faire l'économie.

Première partie : Panorama historique

Quelques définitions...

On rappelle que par barrage, on entend toute structure en travers d'un cours d'eau ou fermant une dépression, ayant pour but de retenir de l'eau soit pour la stocker pendant une durée fonction de la finalité, et/ou de créer une chute. La description qui va suivre s'appuiera pour en raconter l'histoire sur la notion de grand barrage. Celle-ci s'est imposée au début du XX^e siècle alors qu'augmentaient leur nombre et leur hauteur. Dans le cadre d'échanges internationaux toujours plus denses facilités après 1880 par le développement des moyens de transport, la commission internationale des grands barrages fondée en 1928 coordonnait les expériences et les réflexions des ingénieurs ayant à construire des ouvrages de plus en plus importants. C'est vers 1935 que la notion de grand barrage s'est affirmée. Un grand barrage est un barrage de plus de 15 mètres de haut au dessus du niveau de fondation. Cette valeur n'a aucune justification. Elle est simplement raisonnable. A partir de cette valeur un registre mondial des grands barrages a été établi, ce qui permet de disposer d'un outil statistique².

² *Registre mondial des grands barrages, Paris, Commission internationale des Grands Barrages, 1998, 1 vol, 319 p. et 1 CD ROM.*

On utilisera des dénominations relatives au type de barrage, barrage poids ou voûte et barrage en terre. Un barrage-poids résiste à la poussée de l'eau par son poids. Le corps du barrage est constitué de maçonnerie, ou de béton ou de «terre», c'est-à-dire de remblai. Malgré leur spécificité les barrages en terre sont des barrages-poids. Un barrage voûte est une structure en arc qui reporte la poussée de l'eau du réservoir sur les appuis constitués par les flancs de la vallée. Le barrage à contreforts est une variante du barrage-poids, le barrage à voûtes multiples une variante du barrage voûte. Les barrages en rivière sont constitués d'un seuil et de vannes séparées par des piles. Un des problèmes communs est la maîtrise du passage de l'eau à travers le corps du barrage lui-même, ses appuis et fondations ; il se présente très différemment selon les cas. Nous nous proposons de traiter essentiellement de la structure du barrage, c'est-à-dire du mur. Les ouvrages annexes, évacuateur, vannes, équipement de prise et de vidange ne seront abordés que de façon épisodique. Le sujet du barrage nous conduira à parler de «l'aménagement», ensemble des ouvrages nécessaires pour remplir la finalité recherchée (énergie, eau potable, etc...). Le barrage en constitue une pièce maîtresse spectaculaire mais qui économiquement, n'est pas de loin³ la plus importante la plupart du temps. Nous serons conduits à aborder son environnement dans la mesure ou celui-ci commande sa nécessité, son existence et sa conception.

On considérera deux grandes périodes, la première qui s'étend du milieu du milieu du XVII^e siècle à la fin de la première

guerre mondiale, avec la loi sur l'eau de 1919, la seconde depuis cette date jusqu'à nos jours. La loi de 1919 constitue une rupture dans le statut accordé à l'eau quant à son utilisation énergétique. L'évolution technique est moins sensible à cette rupture, bien qu'elle ait été affectée par la cadence de construction des ouvrages et l'augmentation de la taille de ceux-ci.

De l'origine des barrages en France à 1919,

Bien que l'origine de la construction des barrages se perde dans la nuit des temps, nous nous limiterons au cours de ce bref rappel du passé à ce qui s'est passé en France essentiellement depuis la période des Temps modernes et plus précisément à partir du règne de Louis XIV. Cette période est aussi dans le domaine qui nous intéresse, celle de l'émergence d'un savoir peu à peu fondée sur des méthodes rationnelles. On rappellera néanmoins que depuis la renaissance carolingienne de très nombreux moulins avaient été réalisés principalement pour moudre le blé dont environ 20% à des fins industrielles (pour actionner des soufflets de forge, des martinets, des foulons). A la fin du XIII^e siècle, on estime que le nombre de moulins s'élevait à 100 000, nombre que l'on retrouva dans l'enquête de 1809. La plupart de ces installations étaient implantées sur des rivières soit en dérivation soit directement dans le lit de celle-ci, associées à un seuil déversant en travers du lit qui créait la chute nécessaire. Seule une minorité, ce qui représentait environ plusieurs

milliers d'ouvrages, était associée à un étang. Ces digues de quelques mètres de hauteur, à 10 mètres au maximum, constituèrent le champ d'expérience qui a permis petit à petit la constitution d'un savoir pragmatique d'où devait émerger une maîtrise qui conduisit à la réalisation de grands barrages au sens contemporain du terme c'est-à-dire de plus de 15 mètres de hauteur au dessus des fondations (*encadré : Trois barrages du passé*). Le premier en France est celui de Saint-Ferréol de 30 mètres de hauteur en 1675, pour l'alimentation en eau du canal du Midi. Sa conception et son exécution sont dues à un quatuor qui comprend le chevalier Nicolas de Clerville, La Feuille, François Andréossy et bien sûr Pierre-Paul Riquet⁵. Il fut porté à 36 mètres de hauteur par Vauban moins de 10 ans après. Ce n'était qu'un exploit relatif, bien que cette structure à la fois en maçonnerie et en terre eût été le plus haut du monde comme remblai pour deux siècles. Il y avait à cette date 5 barrages de plus de 20 mètres en Europe dont 4 en Espagne, dont deux toujours en service de nos jours qui dataient de l'époque romaine, sans compter ceux culminant entre 15 et 20 mètres.

³ Des analyses sur les réalisations du XIX^e siècle donnent des chiffres qui recoupent ceux obtenus par EDF pour le XX^e siècle. L'investissement moyen dans le barrage représente 10% du coût total de l'aménagement.

⁴ J.L. Bordes, *Les barrages réservoirs en France, du milieu du XVIII^e au début du XX^e siècle*, Presses des Ponts et Chaussées, Paris, 2005, 443 p

⁵ J.L. Bordes, «Les barrages du XVII^e siècle à la fin du XIX^e, transferts technologiques et modes d'élaboration des ouvrages», dans *Les Archives de l'invention, colloque des 26-27 mai 2003, Conservatoire national des Arts et Métiers, Toulouse, CNRS/Université de Toulouse-Le Mirail, 2006, p 227-240*

Trois barrages du passé toujours présents



Proserpina - 1^{er} siècle de notre ère - Vue du parement amont - Situé près de Mérida en Espagne, ce barrage de 21,6 m de haut est constitué d'un mur amont à contreforts, buté à l'aval par un remblai de terre, disposition reprise souvent par la suite. Il reçoit l'eau d'un bassin versant propre de 7 km², et de 13 km² en dérivation, et il stocke 6 hm³. Destiné à l'époque à l'alimentation en eau et peut-être au fonctionnement de moulins, il sert de nos jours à l'irrigation.



Jugon-les-Lacs attesté en 1248 - Réalisé il y a près de 800 ans, cet ouvrage situé dans les Côtes d'Armor et constitué par un remblai en terre de 8,5 m de haut, stocke 2,5 hm³ sur un bassin versant assez important de 195 km². Ses finalités étaient l'élevage du poisson, la protection du château du seigneur du lieu par le maintien du niveau d'eau dans les douves, le fonctionnement de deux moulins à blé qui ne s'arrêtèrent qu'en 1920, et d'une forge au Moyen-Âge. Voilà donc un bel exemple d'utilisation à buts multiples d'un ouvrage bien intégré dans un environnement très marqué par l'action de l'homme. ©Éole photo



Saloup (1807) dans la forêt de Tronçais - Le barrage est constitué d'un mur au profil trapézoïdal de 13,5 m de haut, buté par un remblai comme à Proserpina. Le bassin versant a une superficie de 11 km². Le lac de 800 000 m³ est le réservoir de tête du complexe hydraulique des forges de Tronçais. Cet ouvrage tardif s'inscrit dans la tradition des lacs de forge dont il constitue un peu le chant du cygne. ©Inventaire Clermont-Ferrand

La période qui suit peut être elle-même divisée en quatre étapes :

- ★ La proto-industrie et les lacs de forges de la mi-XVII^e à la fin du XVIII^e siècle
- ★ Les débuts de l'ère industrielle jusqu'en 1850
- ★ L'affirmation des finalités énergétiques 1850-1890
- ★ Les premiers barrages hydroélectriques 1890-1919.

La première étape est dans la continuité de la période précédente laissée dans l'ombre, à la mention près du barrage de Jugon-les-Lacs (1248⁶). L'activité minière et métallurgique fut le moteur de la réalisation de retenues non négligeables, souvent de plus de 1 million de mètres cubes. Ces retenues toujours existantes, quelquefois en déshérence, parsèment le paysage des campagnes et rappellent par leurs noms quelle fut leur raison d'être (La Forge, La Vieille Forge, Le Martinet, Le Fourneau, etc...)

Des grands barrages furent réalisés. Celui de la Noie⁷ (1757) dans le cadre du système énergétique des mines de Poullaouën et Huelgoat était le produit d'un transfert technologique en provenance de Bohême où le principe des digues en terre à noyau étanche était connu. Celui de Caromb⁸ (1766) est un exemple encore rare d'une retenue justifiée par l'irrigation mais aussi financée par trois moulins installés à l'aval et fonctionnant par écluse à partir

⁶ Toutes les dates associées à un ouvrage dans la suite du texte, correspondent à celles de sa mise en service.

⁷ J.L. Bordes, *Les barrages réservoirs.....*, op. cit., p. 139-142.

⁸ *Ibid.*, p. 144-146.

de la retenue. Enfin le barrage du Lampy⁹ (1782), premier barrage supplémentaire pour l'alimentation du canal du Midi, barrage à contreforts, était par sa conception le produit d'un transfert technologique en provenance d'Espagne. Au début de l'ère industrielle, pendant la Restauration, la construction des canaux favorisée par la loi Becquey (1822) fut un des moteurs de la réalisation de barrages dont certains de plus de 15 mètres de hauteur. Programmé dès 1838, le premier barrage pour l'alimentation en eau d'une ville, mais aussi pour faire tourner des usines hydromécaniques, le barrage Zola, pour Aix était construit à partir de 1847. La finalité énergétique se combinait souvent à celle de l'alimentation des canaux depuis longtemps. Les écluses du canal du Midi étaient très nombreuses à être équipées de moulins.

Après 1850, les ouvrages nécessaires au relèvement des débits d'étiage au profit des usines hydromécaniques se multiplièrent. Très souvent à buts multiples, ils combinaient l'alimentation en eau potable et industrielle. La loi Freycinet (1878) dans son volet transport fut un des éléments qui favorisa à nouveau la construction de stockage pour alimenter les canaux. C'est la période où culmina le nombre de finalités par barrage.

Les premiers aménagements hydroélectriques se firent en combinant des barrages de prises de faible hauteur et des chutes plus ou moins importantes. Ce n'est que peu à peu qu'apparurent des ouvrages de 20 à 30 mètres de hauteur : La Bourboule (1896), Avignonet (1903), Rochebut¹⁰ (1909, hauteur 50 m, volume



barrage de Grosbois (1838)

de la retenue 26 hm³) sur le Cher est le premier réservoir de production d'électricité à des fins commerciales.

Au cours de deux siècles et demi écoulés depuis la réalisation de Saint-Ferréol et plus particulièrement pendant le XIX^e siècle, les évolutions techniques avaient été considérables, fruits d'avancées scientifiques majeures, marquées par l'émergence de l'ingénieur. Celles-ci concernaient les matériaux modernes, fonte, fer, acier et ciment, et la terre, matériau ancestral, le calcul des structures avec la naissance et le développement de la résistance des matériaux, les procédés de construction avec les matériels correspondants.

On retiendra pour cette époque dans le domaine hydraulique trois ouvrages ou ensemble d'ouvrages majeurs :

*Les barrages du canal de Bourgogne*¹¹ (1830-1838) : ils sont au nombre de 5 pour alimenter le bief de partage passant par le tunnel de Pouilly de 3.349 m de longueur. Deux barrages en terre, Cercey et Panthier, trois en maçonnerie, Grosbois, Chazilly et Le Tillot, avaient ensemble une capacité de stockage de 26 millions de

mètres cubes. Les données géologiques obtenues au cours de reconnaissances conséquentes (puits de très grande profondeur) permirent d'établir une carte géologique au 1/25.000, la première du genre. Les difficultés rencontrées au cours des travaux, glissements dans des excavations, et des remblais, glissement du corps du barrage de Grosbois sur sa fondation, ont constitué un champ d'observations exceptionnelles. A. Collin, jeune ingénieur des ponts et chaussées, au terme d'une étude expérimentale remarquable, arriva à des conclusions qui en font un pionnier de la mécanique des sols. Elles furent malheureusement mal acceptées. Cet épisode sera repris dans la deuxième partie de cet article.

*Le barrage voûte Zola*¹² (1847-1854) conçu et construit par François Zola, père de l'écrivain, qui fut pour peu de temps le barrage le plus haut de France (42 mètres). Il est situé près d'Aix-en-Provence. Cet ouvrage, qui a conservé

⁹ *Ibid.*, p. 129-134

¹⁰ *Ibid.*, p. 227-230

¹¹ *Ibid.*, p. 162-173

¹² *Ibid.*, p.177-191



barrage Zola (1854)

le nom de son concepteur, est le premier barrage voûte du monde moderne conçu de façon rationnelle. Il n'a pas eu de postérité immédiate du moins en France, et cet échec relatif n'est pas sans enseignement.

*Le barrage poids du Furens*¹³ (1862-1866) en amont immédiat de Saint-Etienne, marqua un saut technologique dans la conception et la construction des grands barrages en maçonnerie. Ce fut alors le plus haut barrage jamais conçu et réalisé par l'homme (56 mètres). Il battait le record vieux de 250 ans du Barrage de Tibi (1594, 50 m) près d'Alicante en Espagne. La méthode d'analyse de sa stabilité qui s'intéressait à la répartition des efforts dans la masse de la maçonnerie, ouvrait la voie à une meilleure compréhension du comportement de ces ouvrages et



barrage du Furens (1866)

à une amélioration de leur forme pour une plus grande sécurité. Ce travail est remarquable par la conduite cohérente des études dans la durée, les rôles conjugués du maître de l'ouvrage les ingénieurs des ponts et chaussées du service spécial de la Loire, la municipalité de Saint-Etienne, et les usiniers. Il avait été construit pour la triple finalité de relèvement du débit d'étiage (énergie), d'alimentation en eau et de protection contre les crues. Cette réalisation eut un retentissement mondial et demeura un modèle pendant près d'un demi-siècle.

70 «grands barrages» furent ainsi construits jusqu'en 1919. Comme on l'a souligné, ce n'était que la partie émergée de l'iceberg constitué des milliers de petits ouvrages parsemés sur tout le territoire français. Les plans d'eau qui en résultaient, constituaient en nombre plus de 95% des retenues que l'on pouvait dénombrer sur le territoire, soulignant les modifications anthropiques apportés à notre environnement naturel.

Sur ces 70, le nombre des barrages en maçonnerie s'élevait à 52. Les grands barrages en terre, 18 seulement, souffrirent du fait qu'à la fois les matériels et les connaissances techniques n'étaient

pas au niveau des enjeux ni des problèmes déjà rencontrés dans les ouvrages de hauteur inférieure à 15 mètres. Pourtant dans cette dernière gamme de hauteur, la plupart des digues, sinon la totalité, étaient en terre et ont pu malgré des insuffisances techniques bien connues de nos jours, continuer à fonctionner de façon satisfaisante, moyennant un entretien plus ou moins lourd. La prédominance des grands barrages en maçonnerie, résulte aussi des données géographiques et géologiques. Dans les vallées industrielles comme par exemple en amont de Saint-Etienne, les fondations étaient constituées de terrain résistant et des carrières pouvaient être ouvertes sans difficulté.

L'implantation en altitude des barrages vient corroborer ces observations. Avant 1919, 4 barrages sont implantés aux alentours de 2 000 m, tous dans les Pyrénées, ce qui n'est pas un hasard. Les Pyrénéens, avant les habitants des Alpes eurent la pratique de l'exploitation de leur lacs en altitude aussi bien pour l'irrigation que l'énergie hydromécanique, comme on peut le voir dans l'organisation du système du canal de la Neste¹⁴. Les barrages des vallées du Massif Central et des Vosges sont implantés entre 500 et 1 000 m. Les deux-tiers des grands barrages restant, antérieurs à 1919, sont à une cote inférieure à 500 mètres. On rappelle que 92,5%, 82% et 67% du territoire français se trouvent respectivement en dessous des cotes 1 000, 500 et 300 mètres.

¹³ *Ibid.*, p. 201-215

¹⁴ *Ibid.*, p. 215-220

La dimension modeste du territoire affecté par les barrages est une des caractéristiques des aménagements de cette période. Coté amont, les bassins versants sont de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres carrés, voire dans certains sites jusqu'à 250 km², sauf dans le cas unique du Verdon (1661 km²) avant 1900. Il faut en chercher la raison dans la modestie des demandes que ce soit les volumes d'eau à fournir ou les puissances mécaniques à développer. Une autre raison est qu'une science hydrologique à ses débuts¹⁵ (Belgrand à partir de 1842), ne permettait guère de dimensionner les évacuateurs de crue de façon raisonnable. Pour barrer des rivières à fort débit après 1900, avec des bassins versants de 1 000 km² et plus, on se risqua à construire des évacuateurs de crues à seuil libre (Rochebut) ou des ouvrages totalement déversant (Le Verdon, Avignonet), ou en dérivation (Sauviat). Coté aval, l'utilisation de l'eau était confiné à un espace limité sauf pour les systèmes d'irrigation et d'alimentation en eau comme le canal de Marseille. Cette période a été marquée par un accident majeur au retentissement mondial, la rupture du barrage en maçonnerie de Bouzey près d'Épinal en 1895, accident qui entraîna la mort de 87 personnes. Cet accident mit en évidence les conséquences mécaniques jusqu'alors insoupçonnées de l'infiltration

¹⁵ *Ibid.*, p. 273-277

¹⁶ Voir ci-dessous

¹⁷ Colli J.C. «Cent ans d'électricité dans les lois sur l'eau», *Bulletin d'histoire de l'électricité, n° spécial, 1986* Varaschin, D., «Légendes d'un siècle : cent ans de politique hydroélectrique française», *Annales des mines, Réalités industrielles, 1998, août*, pp 27-33.

de l'eau dans une fissure dans la partie amont d'un barrage de ce type et par contrecoup sous la fondation de ce même type de barrage et la nécessité de drainer le corps du barrage et sa fondation. Si certains ingénieurs¹⁶ comprirent le phénomène presque instantanément, la compréhension collective de celui-ci demanda des décennies, et ceci n'est pas sans enseignement. Cette étape de la compréhension des effets de la pression de l'eau dans les sols, puis dans les roches, a demandé près de 250 ans pour être formulée de façon satisfaisante ; elle fait l'objet d'un développement ultérieur.

L'entre-deux-guerres

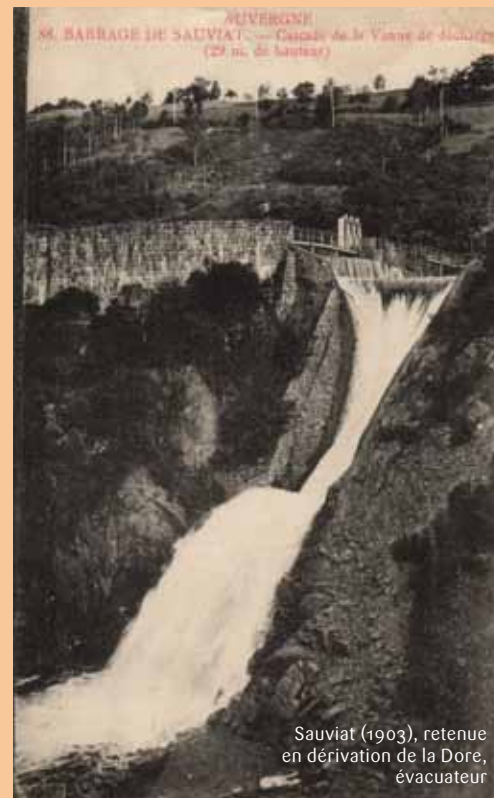
1920-1940

La crise énergétique et la loi de 1919¹⁷, premières concessions

Plus que dans beaucoup d'autres pays, la réalisation de grands barrages en France a été inséparable de sa politique d'équipement hydroélectrique. En dehors des moyens de transport, l'énergie nécessaire à la première industrialisation, a été fournie par l'industrie hydromécanique. Elle en fournissait en effet les deux tiers encore en 1860 dans les machines fixes. Mais les besoins énergétiques de l'industrie grandissant, ce type d'énergie a été supplanté par celle des machines à vapeur. En 1881 la révolution induite par l'électricité était à l'origine de la deuxième industrialisation en fournissant une énergie divisible et transportable. La France n'a pu s'équiper tout de suite d'une industrie électrique puissante car cette industrie est très capitalistique ; elle a pris un retard sensible par rapport



Le barrage du Verdon en construction (1869) Barrage de prise déversant en tête du canal du Verdon. ©Bibliothèque Méjanès, Aix-en-Provence



Sauviat (1903), retenue en dérivation de la Dore, évacuateur



La Bourboule (1896), une des premières usines hydroélectriques



Rochebut (1909)



Avignonnet (1903) en construction



Tuilière (1908) un des premiers grands barrages mobiles en rivière, sur la Basse-Dordogne

tableau n°1 - Quelques barrages marquants avant 1919

Régions	Noms	date	B _v	type	H	V _B	V _R	P _{usine}	Commentaires
Bourgogne	Grosbois	1838	28	PG	22	93	9,2		
Provence	Zola	1854	60	VA	42	7	2,5		
Massif central	Le Furens	1866	15	PG	56	40	1,35		
Provence	Le Verdon	1866	1691	PG	18				
Vosges	Bouzey	1881	17	PG	22		7,1		
Haute-Dordogne	La Bourboule	1896	75	PG	23	5	0,5	0,22	
Alpes	Avignonnet	1903	2000	PG	22	17		6,5	
Massif central	Sauviat								
Basse-Dordogne	Tuilière	1908	13 650	BM	33		5	17,8	+ 7,3 MW thermique Hauteur des vannes 13 m
Massif central	Rochebut	1909	1500	PG	50	66	26	3/7.35	
Pyrénées	Bouillouse	1910	29	PG	22,2	42,8	13	4,2	Altitude la crête 2013 NGF

Légendes (symboles de la CIGB) :

B_v : superficie du bassin versant en km²

Type : BM, Barrage mobile - PG, Poids gravité - VA, Voûte

H, hauteur en mètres du barrage - V_B, volume du barrage en millier de mètres cubes - V_R, volume de la retenue en millions de mètres cubes -

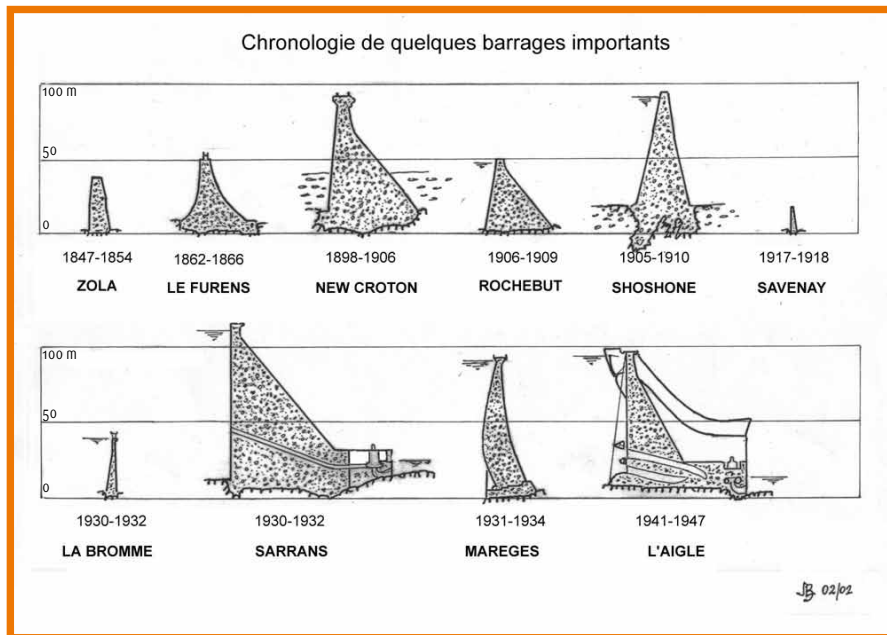
P_{usine}, puissance de l'usine associée en MW

à l'Angleterre, l'Allemagne, la Suisse et les États-Unis, qui la conduisit à une politique de transfert technologique par des filiales de sociétés étrangères, par achat de brevets ou de savoir-faire (création de Neyrpic en 1917 par exemple, à l'initiative de Louis Loucheur, alors ministre de l'armement).

La construction d'aménagements hydro-électrique n'avait pas été stoppée, bien au contraire, car l'occupation des régions charbonnières françaises par l'ennemi avait accéléré la construction d'aménagements, essentiellement de haute chute. La nécessité d'une politique d'indépendance énergétique s'était fait sentir depuis très longtemps, mais la première guerre mondiale avait mis en évidence de façon dramatique la dépendance énergétique de la France et les conclusions en furent tirées aussitôt après la guerre. La mise en valeur du potentiel hydroélectrique n'était qu'une des composantes de cette politique qui fut poursuivie de façon très cohérente jusqu'à nos jours et dont le programme électro-nucléaire de 1973 ne fut que le dernier avatar. Elle déboucha le 16 octobre 1919 sur une loi sur l'eau, véritable nationalisation de l'énergie hydraulique qui commençait ainsi.

«Nul ne peut disposer de l'énergie des marées des lacs et des cours d'eau, quelque soit leur classement, sans une concession ou une autorisation de l'État. Toutefois aucune concession ou autorisation ne sera accordée sans avis préalable des conseils généraux des départements représentant des intérêts collectifs régionaux, sur le territoire desquels l'énergie est aménagée.»

Quelques sections type de grands barrages 1840-1947



En d'autres termes, l'énergie des marées des lacs et des cours d'eau était devenue propriété publique. Dès lors avec des fortunes diverses, contrariées par les crises économiques et les guerres, la mise en valeur du potentiel hydroélectrique de la France allait être conduit à son terme. L'influence de la géographie étant essentielle dans l'élaboration des aménagements hydroélectriques, on examinera successivement le Massif central, les Alpes, les Pyrénées, le Rhône et le Rhin, et la Seine. En effet, les besoins de fourniture d'électricité allant croissant, la nécessité de régulariser les apports autant que possible, exige la constitution de réservoirs de taille supérieure à ce qui était la règle avant 1914, requérant à la fois des bassins versants de surface suffisante pour alimenter les réservoirs, et des conditions

topographiques convenables pour les créer ces derniers. On comprend que la hauteur des barrages va aller croissant, et va demander une plus grande maîtrise technique dans leur construction.

La raison de l'ordre d'examen des différentes zones géographiques résulte de la chronologie des effets de la politique décidée en 1919.

Nous avons disposé dans le tableau n°2, la liste des barrages qui nous semblent avoir marqué la période 1920-1940 par les solutions apportées aux problèmes posés. Nous y avons indiqué la puissance installée des usines qui leur étaient associées pour souligner la relation entre cette puissance et l'importance des barrages. Rappelons qu'avant 1914, l'installation hydroélectrique la plus

tableau n°2 - Quelques barrages marquants entre les deux guerres

Régions	Noms	date	B _v	type	H	V _B	V _R	P _{usine}	Commentaires
Massif Central	Eguzon	1926	2.400	PG	61	220	57	53	
Massif Central	Grande Rhue	1927		PG	42			25	
Massif Central	Petite Rhue	1927	188	PG	32	7			Associée à la retenue de Grande Rhue
Massif Central	Sarrans	1932	2540	PG	113	450	296	103	
Massif Central	La Bromme	1932		VA	30			167	Ferme la retenue de mise en charge de l'usine souterraine de Brommat I. Mis hors service en 1974
Le Rhin	Kembs	1932		BM	27	9	13	160	1 ^{er} ouvrage du canal d'Alsace
Alpes	Chambon	1934	254	PG	136	295	51,8	18	Usines de pied et de Saint-Guillerme, mais le barrage bénéficie à toute la vallée de la Romanche
Alpes	Sautet	1934	990	PG/VA	126	100	108	74	Idem pour le Drac
Massif Central	Marèges	1935	2950	VA	90	185	47	140	
Pyrénées	Artouste	1929	7,7	PG	30	24	23,5	20,5	

Légendes (symboles de la CIGB) :

B_v : superficie du bassin versant en km²

Type : BM, Barrage mobile - PG, Poids gravité - VA, Voûte

H, hauteur en mètres du barrage - V_B, volume du barrage en millier de mètres cubes - V_R, volume de la retenue en millions de mètres cubes - P_{usine}, puissance de l'usine associée en MW

puissante était celle de l'Argentière sur la Durance avec 28 MW (1909).

On notera enfin que trois des barrages retenus ont une hauteur supérieure à 100 m. Or dépasser cette hauteur n'est pas si commun. De nos jours, seuls 3% des barrages dans le monde dépassent cette hauteur, ce qui est aussi le cas de la France (avec 15 barrages à ce jour). En 1919 le barrage le plus haut de France était encore le barrage du Furens datant de 1866, et 19 ouvrages sur 70 dépassaient 30 m) Les barrages du tableau 2, se caractérisaient pour la plupart par l'importance de leur retenue rendue nécessaire par les exigences de productibilité des usines associées (directement à leur pied ou plus à l'aval sur le cours ainsi régularisé. En 1919 la plus grande retenue était celle du barrage de Rochebut (1909) avec 26

hectomètres cubes (il n'y avait que 5 retenues de plus de 10 hectomètres cubes, sur 70). Il en est de même pour les bassins versants drainés dont les surfaces sont sans commune mesure avec ce qui se faisait avant 1919, ce qui explique que l'évacuation des crues ait nécessité des solutions originales, ainsi que les ouvrages de dérivation des cours d'eau pendant la construction¹⁸.

Le changement d'échelle n'est pas seulement quantitatif mais qualitatif. Les barrages réunis dans le tableau 2, ne sont qu'une illustration constituée à partir d'un échantillon significatif. Notre propos n'est pas ici d'écrire une histoire des barrages mais d'insister sur les défis auxquels devaient répondre les ingénieurs de cette époque, qui les ont conduit à projeter et construire des ouvrages souvent exceptionnels.

La mise en valeur du potentiel du Massif Central, la création du service spécial de la Dordogne

A la différence des massifs alpins et pyrénéens dont les cas seront abordés ultérieurement, le Massif Central n'avait pas de tradition industrielle significative. Dès les débuts de l'électricité les sociétés qui se sont créées dans le Massif Central, avaient pour but l'éclairage des villes et le transport par tramways, et construisirent des barrages réservoirs, en haut des bassins versant des rivières descendant de ce qui était considéré comme le château d'eau de la France. Ce fut le cas de Clermont et Riom, pour lesquelles furent construits

¹⁸ Une étude statistique avant et après 1919 jusqu'à nos jours, montre que les bassins versants ont été multipliés en moyenne par 100, les stockages par 6.

les barrages de Queuille (1905) et des Fades (1917), de la Bourboule qui eut son barrage dès 1896, ou de Vichy et Thiers alimenté par l'usine du barrage de Sauviat (1903). Tous ces ouvrages étaient encore de dimensions modestes. La première opération d'envergure fut celle de Rochebut (1909) qui est le premier exemple de barrage réservoir à des fins de production d'électricité commerciale. Son usine développait une puissance entre 4 000 et 10 000 CV (3 et 7,35 MW) pour l'alimentation de la ville de Montluçon située à 15 km. et sa retenue avait un effet de régulation significatif. Malgré ce type de réalisation, le tableau ci-dessous qui permet de juger l'évolution de la production d'énergie hydroélectrique montre qu'avant la guerre de 1914 le potentiel hydroélectrique du Massif Central était largement sous exploité en comparaison avec celui des massifs alpins et pyrénéens. Ce tableau montre aussi l'effort de guerre pendant la quelle la puissance hydroélectrique installée a cru de 80%, s'élevant au total à un peu plus de 850 MW.

tableau n°3 Puissance hydroélectrique installée en 1914 et 1919¹⁹ en France exprimée en cheval vapeur

Régions	1914	1919
Alpes	412 000	750 000
Massif Central	54 740	140 000
Pyrénées	108 038	210 000
Autres régions	75 221	65 000
Total	650 080 (475 MW)	1 165 000 (852 MW)

La mise en valeur du Massif Central devait être la conséquence de son utilisation pour la traction électrique

des chemins de fer, combinée à l'alimentation de la région parisienne, en modulant la production des centrales thermiques autour de Paris. Tout cela fut rendu possible par les progrès dans les lignes de transport et les techniques d'interconnexion. La proximité relative du massif Central avec la région parisienne en facilita d'autant le développement hydroélectrique.

Cette politique de développement devait marquer le retour en force des ingénieurs du corps des ponts et chaussées qui entre 1880 et 1914 avait joué un rôle relativement effacé dans les réalisations et projets. Les sociétés d'électricité avec leurs moyens propres d'études, les entrepreneurs, les ingénieurs civils français et étrangers, en particulier suisses (Adrien Palaz), avaient été alors les acteurs principaux.

Mise à niveau et transfert technologique : le service spécial de la Haute-Dordogne²⁰

Un service spécial de l'administration des ponts et chaussées fut créé le 20 octobre 1920, avec pour mission de diriger les travaux exécutés sous la responsabilité de l'État sur la Haute-Dordogne : son troisième directeur, André Coyne en a pris la charge le 15 juin 1928.

La création d'un tel service spécialisé pour la conception et le contrôle de la construction des importants barrages nécessaires, s'est accompagnée d'une recherche d'information sur les réalisations similaires dans les pays industriels (USA, Italie, Suisse en particulier). Cette démarche s'inscrivait dans une vieille tradition qui sans remonter au XVII^e siècle, était la règle à la fin du XIX^e et au

début du XX^e siècle. Le tropisme nord-américain de ce type de relation état particulièrement fort dans le domaine des aménagements hydrauliques. A la veille de la première guerre mondiale, des stages réguliers aux Etats-Unis des élèves ingénieurs des ponts et chaussées avaient été envisagés. Après la guerre, le retard s'était accru et pour le combler, des missions aux États-Unis ont eu lieu, dont celle de Degove²¹ ingénieur des ponts et chaussées en poste au Service central des forces hydrauliques et celle du PLM (réseau Paris-Lyon-Méditerranée)²² la même année 1921. Ces missions se penchèrent en particulier sur les barrages voûtes américains, dont le barrage de Shoshone.

Premières réalisations, Eguzon (1926), Coindre (1927), Sarrans (1932)

La première réalisation notable de l'après guerre est celle du barrage d'Eguzon²³ sur la Creuse. Elle est le résultat du projet du PO (Compagnie du Paris-Orléans) d'électrifier 503 km de voie ferrée, et la volonté de l'UDE (Union de l'Électricité) propriétaire des centrales thermiques de la région parisienne dont celle de

¹⁹ *Histoire de l'électricité en France, tome 1, p 626. 1CV= 732 W*

²⁰ *Potiquet A., Recueil des lois, ordonnances et circulaires... ordonnances, arrêtés, lois, règlements concernant les Ponts et Chaussées, années 1920-1928*

²¹ *Degove M., Les grands barrages en maçonnerie aux USA, Paris, Eyrolles, 1922*

²² *Feuilly P., Touche E., «Rapport de la mission PLM envoyée aux États-Unis par la Cie PLM pour l'étude des grands barrages aux États-Unis» Annales des ponts et chaussées, 1^{er} semestre, 1922, p 73-129.*

²³ *Berthouet A., Chagnaud, l'histoire d'une fidélité, Paris, Chagnaud, 1996, 219 p, pour Eguzon voir p 59-68*



Eguzon (1926)

Gennevilliers, de combiner l'énergie hydraulique et l'énergie thermique.

Le site avait fait l'objet d'un projet dès 1903. Les choses se précipitèrent pendant la première guerre en 1915 sous la pression de la crise énergétique. A partir de la société PDTE créée en 1913 par Léon Chagnaud, (Production, Distribution, et Transport de l'Électricité) un projet est bâti pour alimenter les arsenaux de Bourges. Les travaux commencèrent en 1917, et furent freinés par d'énormes difficultés de main d'œuvre. Les difficultés s'accumulèrent. La loi de 1919 débloqua la situation.

Il s'agit du premier barrage en béton construit en France, béton cyclopéen. Le volume de ce barrage poids est de 210 000 m³, nettement au dessus de tout ce qui avait été fait jusqu'alors en France, et à l'époque un des plus volumineux au monde (concepteur Rabut, entrepreneur Chagnaud). Ce chantier marqua le début de la mécanisation. Pour la première fois le corps du barrage était drainé ainsi que les fondations, comme cela deviendra la règle avec la circulaire ministérielle de 1923. On réalisa aussi un rideau d'injection en amont du rideau de drainage. Le béton était coulé par plots, selon les pratiques américaines. Des mesures d'échauffement du béton

y furent réalisées ainsi que des mesures de déplacement de l'ouvrage à la mise en eau.

Le barrage terminé en 1926 fut salué comme une réussite et un acte de mise en valeur très important. Il marquait aussi le début des travaux d'interconnexion entre régions par la construction d'une ligne de 210 KV entre Eguzon et la région parisienne, qui reçut l'électricité «éguzonaise» le 17 juin 1926. C'était la première fois qu'une ville française recevait son électricité d'aussi loin.

L'aménagement de la Truyère : Sarrans-Brommat et La Bromme

Commencé en 1914 avec le barrage de la Cadène, l'aménagement de la Truyère fut de toute première importance tant par le volume des travaux que par les puissances installées. Il comprenait 3 barrages dont un barrage poids (Sarrans) de 113 m de hauteur et d'un volume de 450 000 m³ retenant 296 hm³ d'eau, un barrage déversant, deux usines dont une usine souterraine, de 300 MW de puissance au total, 9 330 mètres de galerie d'amenée et un canal de fuite de 1 030m, et enfin un petit barrage voûte de 30 m de hauteur. Ce barrage voûte était le premier construit en France

depuis le barrage Zola, si on excepte le petit barrage de Savenay de 17 m de haut construit par l'armée américaine en 1917-1918. L'ingénieur conseil de cet ensemble fut le Service chutes de la Société générale d'entreprises (SGE), qui en fut aussi l'entrepreneur.

Le barrage voûte de la Bromme qui fermait la petite retenue de mise en charge de la conduite d'alimentation de l'usine de Brommat, participait de la démarche de maîtriser la technique des barrages voûtes pour construire des ouvrages plus importants. Il fut étudié sur un modèle en plâtre chargé au mercure*, et équipé des tout premiers témoins sonores inventés par André Coyne.

Le barrage poids de Sarrans²⁴, bien supérieur à celui d'Eguzon, reprenait les dispositions de drainage et injection des fondations. Il était remarquable par



Sarrans (1932)

²⁴ Dumas J. «Les installations hydro-électriques de la Truyère», *Le Génie civil*, 52^e année, Tome CI, n° 12, 17 septembre 1932, p 269-277.

* Chargement au mercure : Pour assurer le chargement hydrostatique des modèles structuraux en plâtre conformément aux lois de similitude retenus, on a eu recours au mercure.

les dispositions d'évacuation par deux évacuateurs souterrains de 10 m de diamètre fonctionnant à surface libre puis en charge. L'exécution des travaux marque un progrès dans les techniques et matériels, en particulier dans les Blondins* utilisés.

André Coyne et la mise en valeur de la Haute-Dordogne : Marèges (1935), Saint-Étienne-Cantalès (1945), L'Aigle (1947)

Aux origines de l'aménagement de la Dordogne, se trouve la prospection (1916-1917) d'Adrien Palaz, ingénieur conseil suisse très introduit auprès des sociétés d'électricité en France, pour le compte de la Société de l'Énergie électrique du Sud-Ouest (EESO) qui avait réalisé le barrage de Tuilières sur la basse Dordogne²⁵.

Elaboration du projet de Marèges

L'importance du projet de Marèges et les innovations apportées par celui-ci conduisent à s'intéresser aux conditions dans lesquels le projet fut élaboré. De très longues études dès les années 1920/1921 furent conduites pour aboutir au projet d'un barrage voûte dont le projet d'exécution fut approuvé le 17 juillet 1931²⁶ par le ministre après avis du comité technique de la haute Dordogne, du conseil général des ponts sur avis de la commission des barrages de grande hauteur. Le ministre félicitait André Coyne pour les solutions nouvelles proposées pour résoudre le problème. On retiendra que dans son rapport du 11 décembre 1928, A Coyne arrivé depuis à peine 6 mois, repensait l'ensemble du problème du projet

présenté le 19 avril 1928. Il soulignait l'importance du problème des crues ce qui l'amena à déplacer le barrage de sa position initialement prévue.

Malgré la tentative avortée de construction d'une voûte sur les deux sites de la Rhue, plusieurs organismes d'État continuèrent à travailler en faisant des mesures sur la petite voûte de Savenay, et en s'informant sur tout ce qui se faisait à l'étranger. Le laboratoire de l'ONRSII (Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions, à Meudon), ancêtre de l'ONERA et pour partie du CNRS, avait été créé par la loi du 13 décembre 1922²⁷. Il résultait de la nécessité reconnue par tous d'une étroite collaboration entre la science et l'industrie. Un département d'essai de structures et de modèles réduits de barrage en plâtre chargé au mercure fut créé. Un arrêté interministériel du 20 sept 1929 institua une commission chargée de contrôler les essais de barrage sur modèle réduit. Un modèle pour Marèges dénommé «voûte n°1 de Bellevue» fut essayé dès 1927 (?). Un autre pour le barrage de la Bromme à la même époque plus ou moins, fut demandé par la société des forces motrices de la Truyère²⁸. Un rapport tardif mais complet sur les essais de la Bromme fut publié en 1936²⁹. Il y avait toute une série de recherches et de réflexions où on retrouve André Coyne à plusieurs titres et d'où devait émerger la voûte de Marèges (voir annexe 1).

Le Génie Civil, article A. Coyne d'octobre 1935 sur Marèges

La voûte de Marèges passe pour être audacieuse. Je voudrais m'expliquer sur ce qualificatif. S'il ne s'agit que de

l'échelle, il m'est évidemment agréable de constater que les ingénieurs ont fait quelques progrès depuis le temps où Delocre³⁰ annonçait - c'était en 1867 - qu'il n'était pas possible de dépasser, pour un barrage-voûte, la hauteur de 4m47. Il m'est aussi difficile de ne pas convenir que, sur beaucoup de points, la voûte de Marèges sort de l'ordinaire. Mais, s'il s'agit des coefficients de sécurité vrais de l'ouvrage, je répondrai que les gens audacieux sont les ingénieurs du temps passé qui, sur la foi de calculs à priori et sans la moindre confrontation avec la nature, ont cru possible de préciser par le menu les formes des profils à adopter pour les barrages. Sans doute, avaient-ils une excuse, c'est de ne pouvoir faire autrement.

La méthode suivie dans l'étude du barrage de Marèges est entièrement différente : c'est la méthode expérimentale, la seule qui vaille quelque chose en matière scientifique. Les dispositions adoptées sont le fruit d'expériences successives, faites principalement outre-mer, dans ce pays de Californie qui contient à

²⁵ AN F10 4459, 4451 et 4452 (projet Basiaux, ingénieur à Clermont-Ferrand)

²⁶ AN F14 14453

²⁷ «Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions» Recherches et Inventions numéro spécial 1932, 88p

²⁸ AN F17 17486

²⁹ «Les études expérimentales de l'ONRSII sur la stabilité des constructions» Recherches et Inventions, 17ème année, n°265, nov-déc 1936

³⁰ A. Coyne fait allusion à l'article d'E. Delocre, «Sur la forme du profil à adopter pour les grands barrages en maçonnerie des réservoirs», Annales des ponts et chaussées, 4^e série, 1866, 2^{ème} semestre, p. 213-272.

* Blondins : Câbles mis en place pour distribuer matériaux et matériels sur toute la hauteur du barrage et qui ressemblent à des télégraphiques. À l'origine, ce nom était celui d'un célèbre fildefériste qui traversa les chutes du Niagara au XIX^e siècle

lui seul : 800 barrages et où résistent depuis plusieurs dizaines d'années - sans qu'on sache encore très bien expliquer pourquoi - les barrages-voûtes les plus hardis du monde.

C'est par une connaissance approfondie des réflexes de ces ouvrages, et notamment de leur probabilité de rupture, qui est jusqu'ici nulle, que nous sommes parvenus à la conception du barrage de Marèges, attentifs à pratiquer la maxime fameuse de Francis Bacon : *Natura vincitur nisi parendo*. Sur tout le reste, c'est la même méthode qui a prévalu : recherche patiente, humble et méthodique des enseignements de la nature, qu'elle prodigue généreusement à ceux qui savent l'observer; quelquefois, c'est un accident d'expérience qui a mené tout droit au but. Si le succès a couronné nos efforts, c'est à cela que nous le devons.



L'Aigle (1947)



Marèges

La poursuite de la mise en valeur de la Haute-Dordogne et d'autres bassins connexes

L'Aigle (1946)³¹ fut conçu dès 1935 pour la Société électrique de la Moyenne Dordogne. Son exécution fut intimement mêlée à des faits glorieux de la Résistance³².

A. Coyne inscrivit dans un site très étroit une voûte associée à l'usine dont les turbines furent distribuées le long d'un arc de cercle par manque de place, et sur le toit de laquelle fut disposé le coursier de l'évacuateur en saut de ski*.

Saint-Étienne-Cantalès (1945) dont la Société hydroélectrique de la Cère était le maître d'ouvrage, est un barrage qui s'inscrit dans une vallée plus large que

celle du site de l'Aigle 70 m de hauteur pour un couronnement de 270 soit l/h de l'ordre de 4. Les fonctions différentes de l'ouvrage sont réunies comme à l'Aigle. C'est une voûte épaisse. On notera un batardeau amont constitué par une voûte déversante expérimentale de moins de 8 mètres de hauteur pour une longueur développée de 80 mètres.

³¹ Coyne A., «Barrages-usines de l'Aigle et de Saint-Étienne-Cantalès», *Travaux*, Mars 1950, 24 p

³² Salat J.L., *L'Aigle sur Dordogne : un pays, des hommes, un barrage sous l'occupation*, Quota, 1987, 216 p

* Saut de ski : forme de coursier à l'aval d'un évacuateur de crue, ainsi dénommé à cause de sa similitude de profil avec celui d'un tremplin pour le saut à ski.

Les barrages alpins, Le Sautet (1934) et Le Chambon (1934) Figure 16 et 17

Comme on l'a affirmé déjà à plusieurs reprises, tout le territoire français a été le théâtre d'une utilisation très précoce de l'énergie hydromécanique. Le massif alpin a été une zone pionnière de l'hydroélectricité à cause des besoins de l'électro chimie et de l'électro métallurgie³³. La production d'énergie combina l'utilisation de lac en altitude et de hautes chutes. Les ouvrages de prise, de dérivation ou de fermeture des lacs utilisés furent d'abord très modestes. En 1914 en Savoie pas un barrage, barrage de dérivation ou de prise ou de surélévation



Le Sautet, (1932)



Le Chambon (1932)

d'exutoire de lacs, ne dépassait 10 mètres de hauteur.

Le barrage du Chambon³⁴, dont le promoteur fut une Société d'économie mixte réunissant les industriels de la vallée de la Romanche et l'Etat, avait pour finalités la protection contre les crues de la vallée de la Romanche, et la régularisation des débits au bénéfice des usines hydroélectriques de la vallée. Ce barrage poids, qui fut alors le plus haut barrage de France avec 136 m, avait des caractéristiques techniques remarquables. Les travaux de fondations s'avèrent particulièrement difficiles à cause de surcreusements ainsi que la mise au point des bétons.

Le barrage du Sautet³⁵, dont le promoteur la Société d'électricité Bonne et Drac (fondée en 1917), avec la participation Péchiney visait à fournir en électricité l'industrie métallurgique, et la région parisienne avec une ligne d'interconnexion. Ce barrage une fois de plus s'inscrit dans une longue histoire qui commence en 1894 avec Ivan Wilhem,

le père de Serre-Ponçon, qui le premier imagina de barrer le Drac au «cañon» du Sautet. Mais c'est après 1920 avec G Dussauey que le barrage prendra corps définitivement. C'est un barrage poids voûte de 126 m de haut ($l/h = 0,64$), conçu par Albert Caquot. Les conditions géologiques de la retenue étaient particulièrement complexes et l'exécution des fondations en fond du «cañon» furent difficiles.

Le massif Pyrénéen

L'électrification des chemins de fer en Pyrénées fut particulièrement précoce. Le barrage des Bouillouses (1912), le plus haut situé alors en France à 2016 NGF, avec la centrale de La Cassagne fut réalisé en vue de l'électrification de la ligne du «Train Jaune» allant de Villefranche-de-Conflent à Bourg-Madame. Plusieurs

³³ Bouchayer F. *Les pionniers de la houille blanche et de l'électricité*, Dalloz, Paris, 1954, 138 p

³⁴ «Le Chambon», *Travaux*, 1935 et 1936

³⁵ «Le Sautet», *Le Génie civil*, 1934 et 1935

hautes chutes furent équipées avant 1914, à la fois pour la compagnie du Midi à des fins d'électrification de chemin de fer, des industries électro chimiques et des industriels autour de Toulouse.

Les chemins de fer du Midi poursuivirent à partir de 1912 la mise en valeur de la vallée de l'Ossau dans laquelle le lac d'Artouste fut surélevé par un barrage terminé en 1929.

Quelques aperçus sur le Rhône et le Rhin

Les ouvrages sur le Rhin et le Rhône posent des problèmes spécifiques qui les excluent du champ de l'ensemble des barrages évoqués jusqu'alors. Nous ne ferons que mentionner trois d'entre eux. Le barrage de Kembs (1932), premier barrage du futur grand canal d'Alsace, fut étudié dès 1906 par des ingénieurs et industriels suisses. Après la première guerre mondiale, l'État devint l'acteur principal. La France avait obtenu dans le cadre du traité de Versailles le droit d'utilisation du Rhin. Le barrage de Kembs fut conçu pour alimenter la région

Lanoux 1960 lac des Pyrénées



parisienne. Terminé en 1932, il fonctionna avec du stockage par pompage, entre le lac Blanc et le lac Noir, dès 1927.

Huit barrages et usines au total équipèrent la section française du Rhin. Les travaux furent terminés en 1970.

La mise en valeur du Rhône rêvée dès le XVII^e siècle ne peut être traitée dans le cadre de cet article. Le premier projet de franchissement des « cataractes du Rhône » date de 1782. Pas moins de 27 projets furent élaborés jusqu'en 1920³⁶. Ils traitaient soit de l'utilisation énergétique soit de la canalisation, avec des prolongements vers l'irrigation. Sept projets d'aménagements énergétiques aboutirent à des réalisations qui n'étaient pas négligeables, toutes sauf une sur le Haut-Rhône. La plus importante fut la construction du barrage usine de Jonage à Cusset près de Lyon, mis en service complètement en 1905. L'usine était alors une des plus puissantes du monde (16 MW). Ces travaux et études conduisirent à la création en 1933, d'une structure originale la Compagnie nationale du Rhône qui combinait la mise en valeur du fleuve sous le triple aspect de l'énergie, du transport fluvial et de l'irrigation³⁷.

L'ouvrage de tête le barrage de Génissiat³⁸ barrage poids de 104 m de haut, fut conçu sous sa forme quasi définitive en 1912. Les travaux commencèrent en 1936 pour s'achever en 1948. Ils furent l'occasion de progrès remarquables dans plusieurs domaines : injection des alluvions sous le batardeau, coupure du fleuve en eaux vives, dérivation provisoire et évacuateur de crues en souterrain.

Le Rhône à l'aval de Seyssel à la mer fut alors canalisé par un système de 19 barrages et d'usines associées à des

écluses qui permettaient la circulation de chalands à grand gabarit de Lyon à la Méditerranée sur 330 km, objectif atteint en 1980. Le plus important de ces aménagement qui comme Génissiat eut un grand retentissement médiatique fut celui de Donzère-Mondragon³⁹ (1947-1952). Ce fut le plus grand chantier de terrassement en France, lié à un aménagement hydraulique soit un volume de 18 millions de m³.

Les travaux tant sur le Rhin que sur le Rhône furent l'occasion de progrès dans les domaines du matériel de terrassement, des épaissements, injections, maîtrise des écoulements à travers des digues de hauteur moyenne mais de très grande longueur, Géographie oblige. Par ailleurs le type même de barrage mobile devant laisser passer de très gros débits a posé des problèmes exigeant des études poussées sur modèle, (dissipation d'énergie, usure des radiers).

L'aménagement du Bassin de la Seine

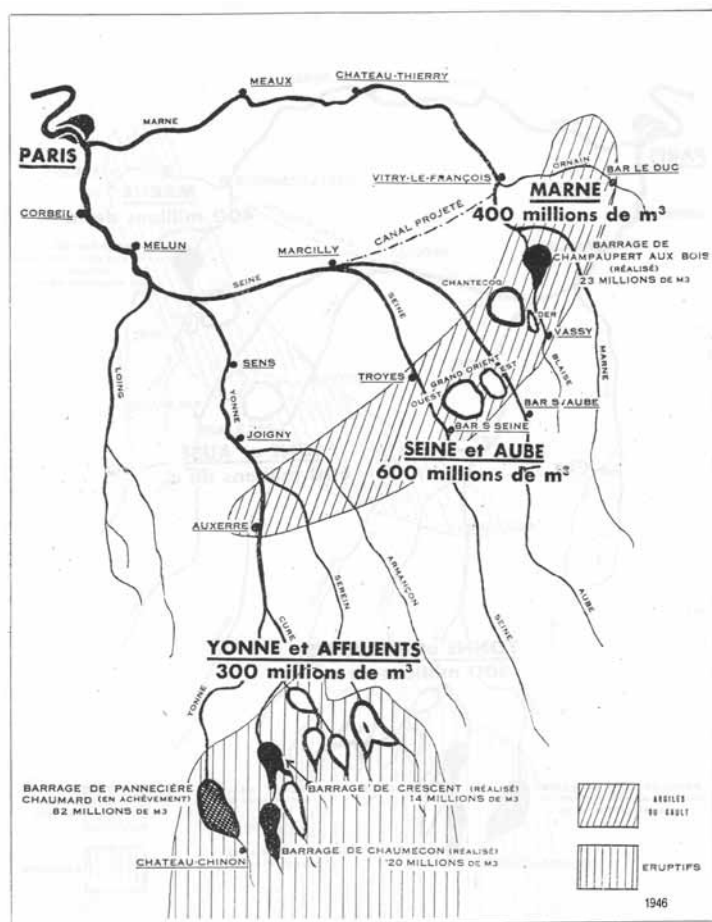
C'est un bel exemple de projet pensé sur la longue durée, fortement marquée par le territoire du bassin sous l'angle de la géographie (urbanisation) et de la géologie.

³⁶ J.L. Bordes, *Les barrages réservoir..., op.cit.*, p. 239-249 «Génissiat et l'aménagement du Rhône».

³⁷ A. Giandou, *La compagnie nationale du Rhône 1933-1998 : histoire d'un partenaire régional de l'État*, Grenoble, Presses universitaires de Grenoble, 1999.

³⁸ «Génissiat», numéro spécial, *la Houille Blanche*, 1953.

³⁹ «Donzère-Mondragon», numéro spécial, *la Houille Blanche*, 1955.



Projet H. Chabal.
Bassin de la Seine
Schéma
d'aménagement
1920

La Seine draine à son embouchure un bassin versant de 78 000 km², et à Paris 44 300 km². Bien que située dans une zone aux modulations climatiques modérées, ses crues peuvent être importantes (maximum observé 2 280 m³/s à Paris le 28 janvier 1910), et ses étiages faibles 30 m³/s, deux phénomènes qui posent de graves problèmes dans une zone très fortement urbanisée.

Au fur et à mesure du développement de l'agglomération parisienne, ses édiles furent d'abord de plus en plus

concernés par les conséquences des crues du fleuve. Chanoine en 1842 pour le bassin de l'Yonne, identifia plusieurs sites de stockages, et arriva à un volume total de 100 millions de m³. De façon un peu plus générale, dans le cadre de son étude monumentale sur le bassin de la Seine, fondatrice de la nouvelle science de l'hydrologie, mot dont il est le père, Belgrand en 1852 pour l'Aube et la Marne, préconisait la construction de grands réservoirs. Il précisa sa pensée en 1872. La carte schématique ci-dessus

bien qu'établie un siècle plus tard, montre les données géomorphologiques qui ont commandé la disposition générale des réservoirs.

Belgrand considérait la réalisation de ces réservoirs sous le quadruple aspect de l'amélioration de la navigation, du relèvement des débits d'étiage au bénéfice de l'industrie, de la fourniture d'eau pour l'irrigation, et de la protection de Paris et de sa région contre les crues. C'était un programme qui ne manquait pas d'envergure, mais dont le coût dépassait les moyens de la collectivité nationale d'alors.

La crue de 1910, crue historique, venant en second par sa hauteur et son débit, d'une fréquence plusieurs fois centennale, a provoqué la submersion de 59 000 ha de terrain en grande partie urbanisé, pendant plusieurs jours.

Une telle catastrophe ne pouvait qu'obliger les pouvoirs publics à poser à nouveau le problème de l'aménagement global du bassin de la Seine, pour éviter le retour d'un événement pareil ; Par son origine à plus haute altitude et sa forte pente, c'est l'Yonne qui contribue le plus aux crues, mais on n'a pu trouver dans son bassin que des réservoirs de faible capacité Settons et Pannessière (1950), notamment celui-ci, voûtes multiples de 50 m de hauteur alimentant aussi le canal du Nivernais).

Commencée avant la seconde guerre mondiale, l'aménagement de la Seine avec de grands réservoirs de stockage fut pour partie réalisé à partir de 1960⁴⁰ au moyen de grandes digues en terre.

⁴⁰ Voir la série d'ouvrages rédigés par G. A. Langlois : les lacs-réservoirs du bassin de la Seine, 4 volumes, Paris Somogy, 2002-2005.

Plus ou moins bien acceptés par les populations alentour, ces réservoirs virent leur gestion modifiées par une évolution des finalités en particulier dans le relèvement des débits d'étiage, et les finalités environnementales (tourisme et rôle d'abri pour les oiseaux et oiseaux migrateurs), ce qui fut un facteur d'acceptation sociétal.

L'introduction des grands barrages en terre en France après 1945⁴¹

Le développement des barrages en terre en France fut contrasté. Il y avait des milliers de digues en terre homogènes à travers le territoire. Mais la compréhension de leur comportement fut très sommaire jusqu'au progrès apporté par Karl Terzaghi à partir de 1923. Au contraire de pays jouant avec les contrastes de perméabilité d'un noyau plus étanche que les recharges (Bohème, Angleterre) l'usage en France de la digue homogène sans drainage rendait son emploi difficile. Malgré un compactage assez satisfaisant, compte tenu des matériels et contrôles de l'époque, de nombreux accidents survinrent sans toutefois entraîner la ruine des ouvrages. Un membre de l'administration alla jusqu'à parler du martyrologe des digues françaises.

On a souligné que les conditions géotechniques du territoire français expliquent que les barrages en maçonnerie puis en béton aient prévalu. Mais ces mêmes conditions géotechniques dans certains sites dont l'utilisation s'imposait, ont obligé les ingénieurs français à envisager d'autres solutions techniques, ouvrant ainsi un nouveau chapitre dans

le développement des grands barrages en France.

Le problème de la Durance : bref rappel des termes de celui-ci

Le barrage de Serre-Ponçon est un barrage dont la gestation a duré un siècle avant de devenir l'aménagement clé de mise en valeur de la Durance dont les caprices étaient redoutés par les riverains. Inscrite dans une tradition millénaire, l'eau servait non seulement à l'irrigation mais aussi à la production d'énergie. Moulins et arrosage furent intimement liés dès le Moyen Âge, dans le Midi de la France.

Les crues de 1843, mais surtout celles de 1856, affectèrent particulièrement la vallée de la Durance. Sous la pression des assemblées locales, une étude sur la protection des crues fut lancée par l'administration.

Six sites de barrages-réservoirs sont inventoriés dont Serre-Ponçon sur la Durance, et Sainte-Croix. Mais pour des raisons de coût l'idée d'emmagasiner les crues fut abandonnée.

Comme on pensait aussi au relèvement de l'étiage, afin de pouvoir garantir, voire augmenter, les prélèvements pour l'irrigation, l'eau potable et l'énergie, le ministère de l'Agriculture, le 17 février 1897 engageait des études pour trouver un stockage adéquat.

Le meilleur site semblant être celui de Serre-Ponçon, et malgré des doutes sur la profondeur du rocher. Ivan Wilhelm (1867-1951) obtint l'autorisation de poursuivre les études et établit un

projet complet. Ingénieur des Ponts et Chaussées affecté à Gap de 1892 à 1912, il fut un promoteur inlassable du barrage à Serre-Ponçon et vécut assez longtemps pour voir le tout début des travaux d'un ouvrage auquel il avait consacré une grande partie de sa vie.

Le barrage était en maçonnerie, d'une hauteur de 50 m au dessus du niveau de la rivière et permettait de stocker 183 hm³. Sa coupe-type présentait le profil usuel de l'époque. Comme le volume à réserver aux besoins agricoles avait été fixé à 200 millions de mètres cubes, le ministère fait rechercher d'autres sites dans le bassin de la Durance (ce seront Castillon et Gréoux sur le Verdon). Sans être jugé irréalisable, le projet de Serre-Ponçon fut écarté par la décision du ministère de l'Agriculture du 11 avril 1903, parce que difficile et cher. Mais il était entendu qu'il devait faire l'objet d'une recherche de solution pour plus tard.

C'est l'énergie hydroélectrique qui allait justifier enfin le barrage. Le 30 juin 1910, était constituée la Société pour la Régularisation de la Durance, au capital de 100 000 francs.

Cette création s'inscrivait dans la stratégie des sociétés de travaux publics pour s'assurer des débouchés. Le développement de l'énergie électrique

⁴¹ « Pour plus de détails, se référer à l'article de J.L. Bordes « Transferts technologiques et barrages en terre en France, le cas du Barrage de Serre-Ponçon », dans *Les circulations techniques, actes de la journée organisée par l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 5 juin 2003, Belfort Montbéliard, Presses Universitaires de Franche-Comté, 2004, p. 193-214.*

changeait complètement les perspectives de faisabilité de l'aménagement, en lui amenant la justification et le financement qui avait été le frein à la réalisation du projet jusqu'alors, plus encore que les difficultés techniques.

Deux projets furent étudiés : une solution de barrage en maçonnerie et une solution en béton armé. Les deux ouvrages avaient une hauteur au dessus du niveau de la rivière, sensiblement identique. Le volume de la retenue projetée était alors de 500 hm³, soit le triple de celle du projet de 1901.

Les ingénieurs français et les entreprises de travaux publics susceptibles d'entreprendre de tels travaux ne manquaient pas d'audace. Avec le barrage de Génissiat qui était à l'étude à la même époque, les projets français soutenaient la comparaison avec les plus audacieux dans d'autres régions du globe. L'époque des premières grandes réalisations en béton armé dont le premier règlement officiel ne datait que de 1905, était favorable aux innovations. Le projet audacieux d'une structure en béton armé fondée par un radier général sur 40 mètres d'alluvions, avec écran étanche de coupure totale et galerie de drainage date de janvier 1911⁴².

La capacité d'évacuation était de 1 500 m³/s, pouvant atteindre 1 800 m³/s grâce à deux évacuateurs en tunnels. Ces dispositions seront reprises dans le projet de 1952. Cette solution permettait de redresser la résultante des forces s'exerçant au niveau des fondations, de faciliter la surveillance et l'inspection du barrage, et enfin d'en réduire le coût.

La lecture d'un article de Wilhelm, laisse à penser que ce dernier en fut le projeteur avec l'aide de Rabut. Il y avait eu aux États-Unis des réalisations intéressantes de barrages en béton armé, qu'était allé visiter en 1907, l'inspecteur général Tavernier, responsable du service des forces hydrauliques des Alpes au Ministère de l'Agriculture. Bien que patrie du béton armé la France n'a pas été le lieu de grandes réalisations dans ce domaine comme l'avenir le montrera. Ce matériau n'était pas le mieux adapté pour les barrages.

Un barrage en maçonnerie de 130 m de hauteur, avait été conçu en 1910 par Whilhem, pour répondre aux nouvelles données du problème. Il était conforme aux pratiques de l'époque et supposait l'exécution d'une fouille de 42 m de profondeur dans des alluvions perméables. L'usine avait 80 000 CV, (8 groupes de 12 m³/s sous 85 m de chute). La solution du barrage en maçonnerie puis en béton, sera considérée jusqu'en 1947.

Au plan politique et économique, il faut noter que le dessaisissement de l'État dans la conduite de l'affaire au profit d'une société privée n'allait pas de soi. Le Conseil général des Hautes-Alpes estimait dans une délibération du 30 septembre 1910 que les études devaient être faites par l'État et non par une société financière. L'État devait rester maître d'un ouvrage tel que celui-ci.

Au plan technique, le problème principal était de déterminer une bonne fois pour toute l'extension en profondeur du sillon alluvial, ce qui commandait la recherche du type d'ouvrage à réaliser.

Commencé en 1913, un programme de puits galerie et sondage financé par l'État, fut interrompu par un accident sans conséquence humaine.

Ce n'est qu'en 1924 que trois sondages furent enfin exécutés, en vue de préciser la géométrie du substratum rocheux. Les résultats furent décevants. En août 1927, la commission géologique concluait à l'impossibilité de fonder un grand ouvrage dans la gorge de Serre-Ponçon, et par suite à l'inutilité de poursuivre les recherches.

Le site ne fut jamais oublié, bien qu'il ne figurât pas dans le programme de 1938. Nulle part ailleurs en France, un site n'avait réuni autant d'enjeux. Bien que l'enjeu hydroélectrique fût prépondérant, il était possible de greffer sur l'aménagement d'autres finalités : protection contre les crues d'une vallée, irrigation d'une partie de la Provence, alimentation en eau d'une région, mobilisation complète du potentiel hydroélectrique d'une vallée. En 1944, la commission du Conseil général des Ponts et Chaussées, chargée des études relatives à l'utilisation de l'énergie hydraulique, décidait la reprise des reconnaissances et des études en arguant du fait qu'il n'y avait aucun autre emplacement favorable à la construction d'une réserve importante d'eau sur la Durance, bien que les conditions de fondation du barrage de Serre-Ponçon se présentassent comme exceptionnellement difficiles

⁴² J.L. Bordes, « Transferts technologiques et barrages en terre en France, le cas du Barrage de Serre-Ponçon », art. cit.



Serre-Ponçon 1960

et onéreuses, et que le débit solide dût combler la retenue en 140 ans. Les études furent reprises par EDF après la nationalisation de 1946, par la région d'équipement Alpes III à Marseille.

La géométrie du canyon sous les alluvions fut déterminée en 1947, au moyen de nombreux sondages dont des sondages rayonnants à partir d'une galerie, comme cela avait été suggéré en 1913. La profondeur de l'ordre de 100 mètres était confirmée. L'exécution d'un ouvrage en béton se révélait quasiment impossible. La solution du barrage en terre, s'imposait. L'expérience française dans ce domaine était insuffisante. Il fallait aller la chercher là où elle se trouvait.

L'appel à la technique américaine des barrages en terre compactée en France

L'expérience européenne et particulièrement française des digues en terre au XIX^e siècle et au début du XX^e siècle n'avait pas été très heureuse. Depuis les digues du canal de Bourgogne 1830-

1838, les accidents avaient été fréquents. La plus haute digue en terre en France en 1939 atteignait 27 m, ce qui n'avait pas empêché les mêmes ingénieurs français en Algérie d'atteindre 70 m dès 1933. Par ailleurs la priorité donnée au développement hydro-énergétique, avait conduit pour des raisons géomorphologiques, à construire dans des sites favorables aux ouvrages en béton, ce qui avait donné lieu aux réussites déjà mentionnées.

A partir de 1930, sous l'effet conjugué de plusieurs facteurs, la construction des barrages en terre aux États-Unis prit un prodigieux essor. Les raisons en étaient la nature des sites imposés pour l'irrigation des grandes plaines de l'Ouest, le développement du matériel de terrassement et les progrès de la mécanique des sols sous l'impulsion de K. Terzaghi.

Le barrage projeté de Serre-Ponçon de 120 m de hauteur et de 16 millions de mètres cubes de volume, n'était dépassé en hauteur en 1947, que par celui de

Mud Moutain (État de Washington) de 130 m de hauteur, mais d'un volume égal au 1/6 et que par celui de Ambuklas aux Philippines de 132 m de hauteur et d'un volume moitié moindre. En 1947, la conception de Serre-Ponçon même pour les techniciens américains sortait de l'ordinaire.

Sur la base des reconnaissances reprises en 1947, EDF lançait un concours d'idée en 1949-1950, auprès des grandes entreprises de travaux publics, associées à des experts ou des entreprises américaines, parmi lesquels on retrouve les noms les plus prestigieux.

EDF faisait appel à des experts du Corps des ingénieurs de l'armée américaine. Ils prirent place en 1951, au sein du comité technique qui assistait l'équipe responsable du projet de la Région d'équipement Alpes III à Marseille, dont le directeur était à l'époque A. Decelle. Dans les années 1950, de nombreux voyages d'ingénieurs d'EDF ou de leurs conseils français et des entrepreneurs consultés, eurent lieu aux États-Unis bien sûr, mais aussi en Algérie. Une telle imbrication favorisait les échanges d'idées et la prise en compte de toutes les capacités françaises.

Les relations techniques avec les États-Unis étaient soutenues. En 1946, Marcel Mary du service technique des grands barrages au ministère de l'Industrie, se rendait aux États-Unis pour l'étude des nouveautés dans la conception et les méthodes de construction des grands barrages. Il visita à cette occasion le barrage en terre d'Anderson Ranch en Idaho (hauteur 139 m) qui fut terminé en 1950.

Pendant la période de gestation du projet, en 1948 deux ingénieurs du

bureau A. Coyne et J. Bellier, G. Post et P. Londe séjournèrent pendant un an aux États-Unis d'où ils rapportèrent un livre publié en 1953 sur les barrages en terre qui servit de référence aux ingénieurs français pendant des décennies.

Le transfert technologique et la formation de plusieurs ingénieurs se fit aussi autour du laboratoire de mécanique des sols qu'EDF fit construire à Gap pour les besoins des études et contrôles exigés en 1954. EDF fit construire un appareil triaxial, qui fut un temps le plus grand du monde et qui permettait d'écraser des échantillons de 400 mm de diamètre. Le laboratoire accueillit un ingénieur américain pendant un certain temps. Le programme des travaux à venir fut à l'origine de la création, alors unique, d'un enseignement de troisième cycle et d'un laboratoire universitaire à la faculté des sciences de Grenoble en mécanique des sols, en 1957.

Ce n'était pas le seul lieu qui bénéficiait de ce développement. On doit mentionner le laboratoire du bâtiment et travaux publics (LBTP) du centre d'études du bâtiment et travaux publics (CEBTP) qui avait été le canal par son antenne algérienne du transfert des avancées en mécanique des sols des ingénieurs français qui œuvrèrent en Algérie.

Les études aboutirent à un projet approuvé par les autorités de contrôle technique en 1951, qui fit l'objet d'un appel d'offres en 1952. L'aménagement fut déclaré d'utilité publique, par la loi du 5 janvier 1955, précisant les conditions d'utilisation des eaux de la Durance.

En vue de l'adjudication, EDF exigeait que les entreprises pour être admises à présenter une offre fussent associées à des entreprises étrangères ou des conseils ayant des références dans le domaine des grands barrages en terre. C'est ainsi que L. Harza, A. Casagrande, K. Terzaghi, Mason and Johnson, Utah construction, entre autres collaborèrent à la préparation des offres.

Les travaux de construction de la digue furent adjudgés en octobre 1955 à un groupement d'entreprises pilotées par Citra (entreprises Schneider). La firme Albaret, vieille société de construction de locomobiles pour l'agriculture, créée au milieu du XIX^e siècle, s'était orientée assez rapidement avec succès, vers la construction de matériel de compactage. Au cours des travaux, elle permit aux entrepreneurs, pour respecter leur planning, de faire modifier spécifications et matériels de compactage, ce qui n'était du goût des conseils américains. Au lieu du rouleau à pied de mouton, ils purent

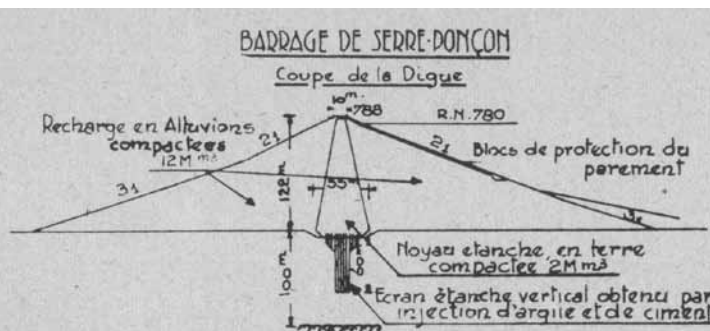
utiliser des rouleaux à pneu chargé à 50 tonnes, matériel qui fut utilisé avec succès à l'exportation. Un des principaux ingénieurs d'Albaret, jeune français venait directement de Californie, où il avait appris le métier avec Proctor.

L'apport français pour le barrage souterrain et le détour par l'Algérie (1930-1954)

La coupe type du barrage montre qu'il y a deux barrages, celui constitué par le remblai, et celui constitué sous le noyau étanche par l'injection des alluvions sur 60 mètres d'épaisseur. Le problème de la coupure alluviale était tout à fait exceptionnel du fait de l'épaisseur



Génissiat, excavation des fondations à l'abri du batardeau (1940) ©CNR.



Serre-Ponçon (1960)
Vue d'ensemble et coupe type

maximale des alluvions de 110 m. La pratique américaine de réalisation d'un tapis étanche en amont, dans la retenue, raccordé au noyau du barrage présentait de nombreuses difficultés dues à la topographie, à la hauteur du barrage, à la disponibilité des matériaux.

Les Français avaient une très ancienne pratique de l'injection des sols et des

roches. Les concepteurs du barrage demandèrent à l'entreprise Solétanche, de réaliser un rideau vertical étanche par injection des alluvions avec un mélange de ciment et bentonite au moyen du procédé technique du tube à manchettes. C'était l'aboutissement d'une longue aventure, commencé en Algérie dès 1927. De 1930 à 1938 les ingénieurs français construisaient le barrage du Ghrib, barrage en enrochement à masque amont de 70 m de hauteur, avec un grand rideau d'injection dans les grès tendres, immédiatement suivi en 1933 par celui de Bou Hanifia. Le problème de l'étanchement des fondations, dont la solution est mise au concours par l'administration, est l'occasion par l'entremise de la société SEC (devenue Solétanche après la guerre) de faire intervenir comme conseil K. Terzaghi qui précisa les filtres sous le masque, en même temps que furent définies les injections dans des sables. L'injection de sables fut l'occasion de la première utilisation du tube à manchette (inventeur E. Ischy), qui permet une véritable maîtrise de l'injection. On y utilisa des coulis de ciment puis ciment-silicate (brevet Rodio).

L'intérêt de cette méthode fut à l'origine en 1934 d'un programme d'études et d'essais de coulis (ciment silicate et argile) sous la direction de A. Mayer, avec P. Bachy au Laboratoire du bâtiment et des travaux publics. Les essais de laboratoire furent complétés par des premiers essais in situ dans les alluvions à Moissac en 1937. En 1936 on procéda à l'injection des alluvions du Rhône sous le batardeau de Génissiat. En 1938 ce sont les alluvions d'une vallée épigénique dans la retenue du barrage du Sautet qui



Jatiluhur (1967)

sont traitées. En 1945-1946 on procéda aux injections de la digue du Lac Noir dans les Vosges. Suivirent l'injection des injections en fond de la cuvette des fondations du barrage de Fessenheim en 1950, sur le Rhin.

Toutes ces réalisations permirent de proposer une coupure alluviale par injection à Serre-Ponçon. Après des essais exécutés de 1950 à 1952, les injections furent réalisées de 1952 à 1955. Ce fut une totale réussite qui fut répétée de nombreuses fois par la suite dans le monde entier.

les barrages en terre français en France et à l'étranger après Serre-Ponçon

L'assimilation des techniques modernes de conception et d'exécution des barrages en terre par les ingénieurs français fut très rapide. En 1953 commençaient les études du barrage du Mont-Cenis situé au col du Mont-Cenis dans les Alpes à la frontière franco-italienne. Cet ouvrage en terre et enrochements, avait une hauteur de 120 m et un volume de remblai 14 millions de mètres cubes. Il fut terminé en 1968. Les études furent assurées par le bureau A. Coyne et J. Bellier, pour le compte d'EDF. Ce même bureau avait obtenu en 1954 un contrat pour les études et la supervision de la construction du barrage de Jatiluhur à Java de 105 m de hauteur et d'un volume

de remblai de 9,1 millions de mètres cubes, terminé en 1967. De nombreux barrages en terre allaient être construits dans le cadre de l'activité française des bureaux d'études et des entreprises, tant sur le marché intérieur qu'à l'exportation. Les références françaises relatives à la conception ou l'exécution de barrages en terre, en France et à l'étranger concernent des dizaines d'ouvrages parmi les plus importants et remarquables, mis en service ces dernières années.

Tout ceci n'a rien de très normal. L'expérience des ingénieurs français leur permettait de pouvoir se mettre au niveau des meilleurs dès lors qu'ils avaient à traiter ce problème. On ne peut que constater que le poids des conditions géomorphologiques, économiques et sociales qui font qu'une communauté technique excelle dans un domaine, ou dans un autre, à un moment donné.

L'apport essentiel des ingénieurs français dans la résolution du problème de l'étanchéité des fondations, s'explique très bien à partir de ce qui s'est passé en Algérie. Les conditions géologiques qui prévalaient dans ce pays ont obligé les ingénieurs français au contraire de leurs camarades restés en France à trouver des solutions pour construire des barrages sur des sols, auxquels rien ne les avait préparés. Ils ont trouvé des solutions originales qui furent signalées dans les publications techniques américaines dès 1938. Ils y ont gagné une liberté technique qui explique leur représentation à la commission internationale des grands barrages avant la seconde guerre mondiale. Cette réussite s'explique aussi par un dialogue très ouvert, entre maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entrepreneurs, qui permettaient la prise en

compte de variante d'entreprises. Ce fut une pratique française qui a beaucoup aidé l'innovation dans le génie civil.

Le temps des voûtes au cours des années 50 et 60

De l'origine des barrages voûtes⁴³

En France les traces les plus anciennes de barrages voûtes dateraient de l'époque romaine au vallon de la Baume au sud de Saint-Rémy-de-Provence. La hauteur en était modeste, 12 m. Ensuite on dispose de restes et témoignages en Turquie datant du VI^e siècle sous la domination byzantine à la frontière turco-syrienne. Mais à partir d'une pratique technique développée en Asie centrale à partir du III^e siècle par les Sassanides, les ouvrages anciens les plus remarquables dans le domaine des barrages voûtes, se trouvent en Iran, lorsque la dynastie mongole des Ilkahn reconstruisit le pays ravagé un siècle plus tôt par leurs propres armées. Le barrage de Kurit à 620 km au sud-est de Téhéran construit à la fin du XIII^e siècle avec 64 m de haut fut le plus haut barrage voûte du monde jusqu'au début du XX^e siècle. On retrouve ensuite des barrages voûtes en Espagne, dont celui d'Elche de 23 m de hauteur, construit à partir de 1632, et celui de Relleu de 27 m de hauteur, réalisé au cours du XVII^e siècle. En Italie, Ponte Alto construit à partir de 1611 et surélevé jusqu'à la hauteur de 39 m en 1887 inspira probablement François Zola qui conçut en 1838 le premier barrage voûte de l'ère industrielle en France près d'Aix en Provence. Ce

barrage de 42 m de hauteur, terminé en 1854, passa inaperçu en France et fut connu aux États Unis à partir de 1885. Inconnu encore plus, fut le barrage de Jones Falls au Canada construit de 1828 à 1831 de 19 m de hauteur, mais avec un rapport de longueur sur hauteur de 5. A partir de 1880 de nombreux barrages voûtes entre 15 et 30 m de hauteur furent alors construits, en Australie et aux États-Unis. Le barrage de Buffalo Creek (Shoshone) dans le Wyoming construit de 1905 à 1910 atteignait 99 m de hauteur. Après la seconde guerre mondiale, les barrages voûtes devinrent courants en France, Italie et Suisse, où de remarquables ingénieurs marquèrent leur époque.

La recherche d'outils conceptuels pour dimensionner les barrages voûtes et comprendre leur comportement s'est développée en même temps que s'affinaient les applications de la théorie de l'élasticité et la résistance des matériaux à partir des années 1860 en parallèle avec l'étude des barrages poids. La formule du tube établie empiriquement par Mariotte au XVII^e siècle et démontrée par Navier (1826) fut le premier outil. Très rapidement, dès avant 1900 s'est posé l'intérêt de faire varier le rayon de courbure moyenne de la voûte en fonction de la hauteur. Le calcul avec ajustement de clé fut élaboré peu avant la première guerre mondiale, et trouva son aboutissement dans la «trial load method», appliqué au dimensionnement du Hoover dam (1935). Plus tard après 1960, la méthode des éléments finis apporta un progrès dont les bénéfices considérables ne sont pas tous encore acquis.

On doit insister sur l'aller et retour entre l'observation, la mesure et les calculs. La confiance des projeteurs fut très tôt renforcée par l'observation de la tenue à la submersion d'ouvrages au début du siècle (le barrage-voûte de Sweetwater en Californie, a subi des déversements lors de crues en 1895 et 1915). Le barrage expérimental de Stevenson Creek (1926), conçu spécialement pour être ausculté, et dont le comportement fut étudié en parallèle avec des modèles réduits, avait été précédé par des mesures faites sur les tout premiers barrages voûtes existant aux USA et en Australie. A Coyne (1930) apporta dans ce domaine le **témoin sonore***, un outil d'auscultation tout à fait remarquable. EDF construisit aussi le barrage expérimental du Gage, remarquable par sa minceur.

Le développement des barrages voûtes fut une des réponses apportées par les constructeurs aux contraintes de site, concernant les problèmes d'évacuation des crues, d'éloignement des sites des lieux de production, de recherche de volume minimal des ouvrages, d'utilisation optimale de la qualité des fondations et des appuis et fortement aidé par les progrès réalisés dans la fabrication, la mise en place et les résistances à attendre des bétons.

⁴³ N Schnitter, « The evolution of arch dam », *Water Power and Dam Construction*, 1976, part one, october, p.34-40, part 2, November, p. 19-21.

* *Témoin sonore ou extensomètre à corde vibrante : Capteur de déformation, consistant en un fil d'acier tendu entre deux points, dont on mesure la fréquence de vibration. Cette fréquence qui dépend de la tension, varie donc en fonction du déplacement entre les deux points de fixation.*



Kariba (1959)

Les 55 voûtes d'André Coyne⁴⁴

De 1945 à 1960, 120 grands barrages furent construits en France dont 58 voûtes. André Coyne fut le concepteur de 44 d'entre elles (après Marèges déjà citée). il en conçut 55 au total dont 9 à l'étranger.

Dans le temps très bref de trois décennies, aidé par la réceptivité à ses propositions de grands maîtres d'ouvrage, André Coyne a marqué son époque en réalisant des ouvrages très innovants marqué par :

- ★ la concentration des fonctions barrage, déversoir, usine hydroélectrique, comme il le fit pour la première fois sur les sites de l'Aigle, et de Saint-Etienne-Cantalès, avant Bort-les-Orgues, et Monteynard ;
- ★ l'insertion des voûtes dans des vallées de plus en plus larges : au début les voûtes étaient utilisés pour des sites étroits (rapport largeur sur hauteur l/h inférieur à 3) comme à Monteynard l/h=1,1, puis dès avant 1960, 9 à Moulin Ribou, (1958) avant 7 à Bangala (1962) ;
- ★ l'augmentation de la portée des voûtes multiples, en établissant un record

du monde à l'époque au Nébeur sur l'Oued Mellègue (Algérie), puis à Grandval sur la Truyère, dont la crête est rectiligne, avant que ses disciples ne réalisent au Canada, le barrage Daniel Johnson, le plus haut des barrages à voûtes multiples du monde (214 m) où la portée de la voûte principale atteint 159 m, contre 80 m pour les autres) ;

- ★ les déversements de gros débits par dessus ou à travers les voûtes : après les innovations dues au **saut de ski**^{*}, à Marèges, ce sont les ouvrages déjà cités auxquels il faut ajouter les exemples de Grangent sur la Loire et Kariba sur le Zambèze, celui-ci remarquable par les débits de la rivière, comme par le court délai de 4 ans pour les études et l'exécution.

Dès lors que la qualité géologique du site autorise cette solution, les formes des barrages voûtes sont très variées. Elles dépendent des données du site : topographiques, hydrauliques pour les contraintes d'évacuation des crues ou de dérivation du cours d'eau à barrer.

Comme le montrent les textes déjà cités, A. Coyne s'est toujours voulu docile aux contraintes imposées par les données naturelles. Il se défendait d'être un théoricien et se définissait comme un praticien, confrontant ses idées ou ses intuitions aux faits observés, s'aidant de la discussion avec les membres de son équipe. Le calcul était un outil qui servait à la retouche des dessins de la voûte, affinée ainsi par approximations successives.

Les bétons ont fait l'objet d'études et d'attention de la part dès les travaux de Marèges. Les progrès dans les barrages voûtes sont pour partie ceux des matériaux qui les constituaient et des procédés de leur mise en place. Dans la même démarche, les procédés d'exécution ne sont pas moins importants et doivent être pris en compte dans l'élaboration de l'ouvrage. On sait tout le prix que A. Coyne attachait à la qualité de l'entrepreneur, et à l'importance des solutions constructives dans l'élaboration d'un projet.

⁴⁴ Coyne A., «Arch dams : their philosophy», *Journal of power division, Proc ASCE, Vol 82, n° PO 2, avril 1956; actes du Symposium on Arch dams tenu à Knoxville Tennessee, 17p.*

Martin J., «Les 55 voûtes d'André Coyne dans l'histoire mondiale des barrages voûtes», dans *Quels problèmes pour quels barrages ?*, Centre d'études d'information et de formation pour les ingénieurs de la construction et de l'industrie, Paris, 26-27 avril 1989, 30p.

* Saut de ski : Forme de coursier à l'aval d'un évacuateur de crue, ainsi dénommé à cause de sa similitude de profil avec celui d'un tremplin pour le saut à ski.



Vouglans 1968

La catastrophe de Malpasset⁴⁵

C'est dans cette série de réussites obtenues non sans efforts et difficultés que le 2 décembre 1959 le barrage de Malpasset se rompt au terme de son premier remplissage accidentel, retardé pour des problèmes d'expropriation de terrain dans la retenue. Il y eut 421 morts et des dégâts matériels considérables.

Au-delà de l'émotion qu'on imagine, les ingénieurs furent frappé de stupeur devant les conséquences d'un phénomène sans précédent et par conséquent dont ils n'avaient pas imaginé les mécanismes. Les recherches pour comprendre ce qui s'était passé, définir les règles nouvelles à observer, demandèrent plusieurs années et allaient ouvrir

dans la conception et la surveillance des barrages une ère nouvelle, sur laquelle on reviendra (*annexe 2*).

Après les années 60, la construction des grands barrages se maintient à un rythme soutenu. Le nombre de grands barrages passe de 249 en 1960 à 594 en 2000. L'équipement hydroélectrique se poursuit en complétant la mobilisation des ressources. Des stockages d'énergie par pompage (STEP) (Revin 1973, Montézic 1981, Grand Maison 1984) sont réalisés. L'équipement des parties hautes des bassins se terminant, il n'est pas étonnant de constater que plus des deux tiers des barrages construits en 40 ans, soient en terre. La croissance des finalités irrigation et eau potable explique aussi cette tendance. On trouve de grands barrages en terre, à noyau ou à masque amont associé à des coupures alluviales en paroi moulées en béton plastique. Les méthodes de calculs permettent d'affiner les formes des barrages en béton, (Vouglans 1969), ainsi que de mieux comprendre écoulements et singularités.

La prise en compte de progrès dans les bétons a conduit changer les méthodes de mise en place et avec le béton compacté au rouleau (BCR) un type de barrage en béton comme le barrage poids a retrouvé des avantages dans certains sites avec aussi des solutions originales de coursier hydrauliques.

Les méthodes de surveillance et les matériels d'auscultation sont précisés ou développés. Surveillance et auscultation sont intégrées dans la démarche de projet.



Roselend (1962)

Le tableau n° 5 (voir page 96) rappelle quelques belles réalisations de cette époque illustrées par les photos de Roselend (1962) et Grand Maison (1984).

Au tournant du millénaire, le patrimoine des grands barrages et moins grands en France

Au terme cette revue historique sommaire, on propose une brève synthèse de l'ensemble des barrages sur le territoire français en précisant leur nombre, leur répartition sur le territoire, et leurs finalités, afin de mieux comprendre les enjeux qu'ils

⁴⁵ P Duffout, « Cinquantenaire de la rupture des fondations et du barrage de Malpasset (Var) », troisième série, t XXIII, n° 9, Travaux du Comité français d'histoire de la géologie, 2009, p. 201-224.

* Saut de ski : Forme de coursier à l'aval d'un évacuateur de crue, ainsi dénommé à cause de sa similitude de profil avec celui d'un tremplin pour le saut à ski.



Grand Maison (1984)

représentent. Un barrage n'est qu'un maillon dans un aménagement au service d'une ou plusieurs finalités. Ces dernières peuvent évoluer dans le temps. On peut en introduire de nouvelles en supprimer d'autres lorsque les priorités changent. L'importance de l'ouvrage, son esthétique, son impact sur le paysage, ne doivent pas faire oublier qu'il n'est jamais qu'un instrument au service de finalités aux multiples implications, voulues par les acteurs économiques et sociaux.

Quelques éléments statistiques⁴⁶ permettront de mieux préciser tous ces points :

- ★ nombre de grands barrages : 598 dont 60 de plus de 60 m et 15 de plus de 100 m de haut ;
- ★ nombre de barrage de plus de 10 m de haut : de l'ordre de 740 ;
- ★ nombre de barrages de moins de 10 m : plus d'une dizaine de milliers.

La courbe du nombre de grands barrages construits en fonction du temps montre une variation d'allure exponentielle jusqu'en 1990. Si elle ne montre pas

ensuite un net plafonnement, il s'agit désormais de barrages plutôt modestes : on ne construit plus en France de très grands barrages.

Le volume d'eau stocké « provisoirement » dans les retenues de ces barrages est de l'ordre de 12 milliards de mètres cubes, à rapprocher des 140 milliards de mètres cubes ruisselés sur le territoire en moyenne sur une année.

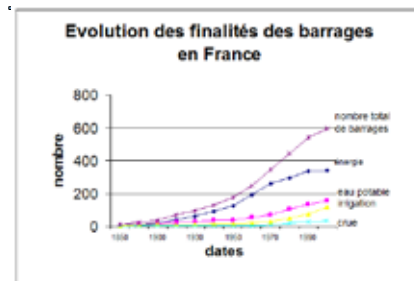
Parmi les finalités on distingue les suivantes :

- ★ le stockage d'eau en vue de régulariser le débit pour :
 - la fourniture d'énergie, soit sous forme hydromécanique, soit à partir de 1890 sous forme hydroélectrique,
 - l'alimentation des canaux à bief de partage afin de permettre le transport par voies d'eau,
 - la protection contre les crues.
- ★ le stockage d'eau pour garantir les prélèvements pour :
 - soit pour l'irrigation,
 - soit pour l'eau potable.
- ★ l'utilisation des bassins de retenue des eaux :

- la finalité piscicole,
- la finalité récréative,
- la finalité stratégique (l'alimentation des fossés d'une place forte n'est plus guère invoquée aujourd'hui).

On peut définir un critère de multifonctionnalité en divisant le nombre total de finalités décomptées par le nombre de barrages. Ce critère valait 1,54 en 1850, il atteint 2,08 en 1880, puis tombe à 1,04 en 1930 et remonte à 1,46 en 2000.

La figure ci-dessous compare l'évolution du nombre de barrages pour les principales finalités : énergie, irrigation eau potable, protection contre les crues.



Le poids considérable de la finalité énergétique dans l'histoire des aménagements hydrauliques en France, apparaît clairement. A l'opposé la protection contre les crues par stockage demeure marginale. La protection par stockage a toujours été jugée aléatoire et trop coûteuse. Elle a été assurée de préférence par la solution universelle et très ancienne de l'endiguement des écoulements associée à des champs d'inondation. Outre le stockage,

⁴⁶ Base de données, Comité français des barrages et réservoirs, 2003.

tableau n°4 - Quelques barrages marquants 1945-1960

Régions	Noms	date	BV	type	H	V _B	V _R	P _{usine}	Commentaire
Massif Central	Saint-Etienne Cantalès	1945	691	PG/VA	75	150	135	80	
Massif Central	L'Aigle	1947	3 270	VA	95	240	225	220	
Rhône	Génissiat	1948	10 910	PG	104	700	56	417	
Tunisie	Oued Mellègue	1952		MV	45	25			Record mondial de portée des voûtes 50m, en son temps
Alpes	Tignes	1952	171	VA	180	635	235	93	Le plus haut barrage en France
Rhône	Donzère Mondragon	1952		BM	32	85	20	354	
Massif Central	Grandval	1959	1782	MV	88	181	271	68	
Zimbabwe	Kariba	1959		VA	128	1 000			
Zambie									

tableau n°5 - Quelques barrages marquants 1960-2000

Régions	Noms	date	B _V	type	H	V _B	V _R	P _{usine}	Commentaires
Alpes	Serre-Ponçon	1960	3600	TE	129	14 100	1.270		
Alpes	Roselend	1962	44	VA/CB	150	940	187		
Ain	Vouglans	1968	1 120	VA	130	545	592		
Alpes	Le Mont Cenis	1968	51	TE	120	14 850	315		
Alpes	Sainte-Croix	1974	1 591	VA	95	55	767		
Alpes	Grand Maison	1984	50	TE	160	12 900	137	1840	STEP, réservoir supérieur
Pyénées	Laparan	1985	35	VA	106	201	16		
Deux-Sèvres	La Touche Poupard	1994	55	PG	36	46	15		en béton compacté au rouleau BCR alimentation en eau

Légendes (symboles de la CIGB) : B_V : Superficie du bassin versant en km² - Type : BM, Barrage mobile – CB Barrage à contreforts - PG, Poids gravité – TE Barrage en terre et enrochements - VA, Voûte. - H, hauteur en mètres du barrage – V_B, volume du barrage en millier de mètres cubes – V_R, volume de la retenue en millions de mètres cubes – P_{usine}, puissance de l'usine associée en MW, à l'époque de la mise en service.

on trouve au titre de la protection contre les crues, les barrages à pertuis ouvert, retardateurs de crues⁴⁷.

C'est la demande énergétique, qui a soutenu ou permis des réalisations qui n'auraient pas été possible, isolées. On peut citer le canal de Provence ou la canalisation du Rhône. Toutefois cette tendance tend à évoluer sous l'effet de plusieurs changements :

★ l'irrigation se développe de façon plus autonome, avec les périmètres de taille réduite à partir des lacs collinaires ;

★ l'alimentation de l'eau pour les villes mobilise des capitaux qui permettent des investissements conséquents.

Mais d'autres tendances ou tensions se font sentir sur les ouvrages existants, avec le relèvement du débit réservé résultant de la loi sur l'eau de 2006. D'autres acteurs se sont invités autour des barrages pour réclamer suivant les retenues une nouvelle utilisation ou une modification de celles déjà existante. On peut ainsi parler d'une «eau écologique», d'une «eau ludique», d'une eau «inondante»⁴⁸. Mais leur

valeur change avec le système de référence utilisé.

⁴⁷ Cette pratique est très ancienne. Le barrage écréteur du Pinay (1711) a protégé efficacement Roanne en 1846 et 1856. Ce principe a été repris pour 4 barrages dans le Gard.

⁴⁸ P. Bolland, P. Huet, E. Lafont, J.-P. Leteurtois, P. Pirron, Rapport sur la Durance, ministère de l'écologie et du développement durable, ministère de l'agriculture, de l'alimentation de la pêche et des affaires rurales, ministère délégué à l'industrie, ministère de l'équipement des transports du logement du tourisme et de la mer, 2002, 37 p.

Les bénéfices d'un grand aménagement dépassent souvent les limites du territoire affecté, surtout l'hydroélectricité. Le partage des bénéfices nécessite un dialogue entre tous les acteurs. Certains d'ailleurs n'en ont pas ou n'en ont plus conscience. C'est un lieu de débat moderne, où la notion de vivre ensemble n'est pas un vain mot.

Deuxième partie : Évolution technique

Après un parcours chronologique de la réalisation des barrages en France, nous proposons pour mieux comprendre les évolutions techniques d'en examiner les principaux mécanismes. Nous chercherons à savoir comment les ingénieurs ont répondu aux demandes des aménageurs. Dans la mesure où le manque de connaissances techniques pouvait être un obstacle, nous chercherons à savoir comment le savoir a été transmis, conservé et quelles ont été les voies des transferts technologiques, pour éviter un blocage technique significatif

De l'importance de la méthode expérimentale⁴⁹ et de la notion élargie de laboratoire

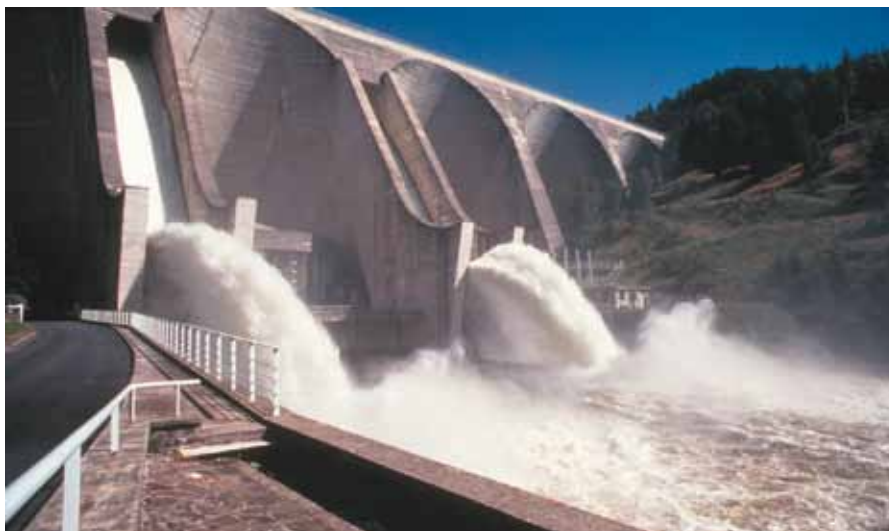
En novembre 1930, André Coyne écrivait dans le numéro du centenaire du Génie civil, dans l'article «Barrages» :

«La méthode expérimentale est seule capable d'éclairer le champ très vaste et très obscur des problèmes qui restent à poser et à résoudre en matière de barrages, et de nous en donner la matière et la solution.

C'est à elle que l'on doit la plupart des progrès réalisés depuis cinquante ans. Qu'il s'agisse du retrait, des fissures et des filtrations d'eau, de la distribution des pressions, des températures, des

qui s'est fait ailleurs. Il est toujours très difficile de connaître exactement ce qu'ont fait les autres, et l'on risque de copier les fautes : s'inspirer uniquement des précédents conduit, en matière de barrages aussi bien que pour les autres ouvrages hydrauliques, à de lourdes erreurs».

Ce texte a gardé toute sa pertinence, malgré les progrès considérables accomplis



Grandval barrage sur la Truyère (1959) voûtes multiples à crête réctiligne

contraintes internes, de l'influence du climat, des déformations en service, des conditions de déversement ou des causes de rupture, on a déjà entrepris et on poursuit un peu partout des observations et des mesures systématiques, tant sur les barrages en vraie grandeur que sur des modèles réduits.../...Quel que soit le soin que l'on prenne pour se documenter, il faudrait se garder d'en conclure qu'on sera à l'abri de tout risque, si l'on copie ce

pendant près d'un siècle. On insistera à ce propos sur la spécificité du barrage, ouvrage toujours unique, faisant corps structurellement avec son environnement géologique et géomécanique. Faut-il rappeler que ce dernier n'est jamais le même d'un ouvrage à l'autre et

⁴⁹ J.L. Bordes, «Barrage et méthode expérimentale» dans *Édifices et artifices*, (R. Carvois, A. Guillerme, V. Nègre, J. Sakarovitch, dir) Paris, Picard, 2010, p. 303-312.

que l'on ne calcule pas un barrage mais qu'on le vérifie.

Pour compléter de manière plus formelle, la citation d'André Coyne, par méthode expérimentale, on entend une démarche rationnelle partant de l'observation des faits et qui, s'appuyant sur des modèles théoriques ou lois physiques peu à peu élaborés au cours d'une longue histoire de l'observation des comportements des matériaux et des structures, permet d'avancer dans une connaissance de plus en plus poussée de l'état de ces structures et de leur niveau de sécurité, pour les concevoir de façon sûre et économique. C'est la méthode inductive, méthode pratique et efficace, qui s'oppose à la méthode déductive (qui procède de propositions ou principes posés à priori). Son origine est très ancienne.

La méthode expérimentale est inséparable de la notion de laboratoire. C'est le lieu où elle s'exerce. Mais dans le cas particulier du barrage pour lequel des essais de chargement préalable comme pour les ponts sont impossibles, le lieu du laboratoire et sa durée sont considérablement élargis. Ils englobent non seulement au sens étroit du terme les locaux où sont essayés les matériaux, des éléments de structure et les modèles réduits hydrauliques, mais encore le site du barrage lors des reconnaissances géologiques et géotechniques, l'ouvrage lui-même en construction, et ce dernier enfin terminé lors du premier remplissage, phase qui constitue un essai en vraie grandeur. Mais on ne saurait en rester là. La surveillance de l'ouvrage pendant son exploitation prolonge le travail expérimental jusqu'à la fin de vie de l'ouvrage.

Depuis la fin du XVII^e et plus sensiblement depuis le milieu du XVIII^e siècle on peut suivre l'histoire de la lente élaboration des outils techniques nécessaires à l'exercice de la méthode expérimentale. Ce sont des dizaines de dates et autant d'évènements qui marquent cette progression, fruit d'une démarche collective transnationale. Afin de mieux se repérer, on trouvera ci-joint un tableau chronologique récapitulatif des principaux évènements considérés comme fondateurs dans les domaines suivants : laboratoires, sondages et essais in situ, auscultation des structures, codes de calcul et réglementation, qui seront autant de têtes de paragraphe dans ce qui va suivre.

Création de laboratoires, essais et modèles

Les grands ingénieurs et savants du XVII^e au début XIX^e siècle furent aussi de grands expérimentateurs. Mais il s'agissait d'essais ponctuels (essais d'écrasement de Vicat 1833) ou de créations isolées (Lamé et Clapeyron, laboratoire de génie civil à Saint-Petersbourg, 1830). On ne peut guère parler d'un temps des laboratoires de génie civil qu'à partir de 1850 (création du laboratoire d'essai des matériaux du CNAM et du laboratoire des ponts et chaussées). Des avancées fondamentales furent obtenues. La loi de Darcy a été établie en 1856 en laboratoire. Les laboratoires d'hydraulique sur modèle sont nés en Allemagne en 1891, et en France en 1904. Des essais sur des éléments de structure en béton armés se développèrent avec la naissance du béton armé (Hennebique,

Coignet, Considère) à partir de 1890. Un des premiers laboratoires d'essais de structures sur modèles réduits fut à Meudon en 1923, celui de l'Office national des recherches scientifiques et des inventions. Celui de l'ISMES à Bergame (Italie) créé en 1951 est particulièrement réputé. Les premiers laboratoires de mécanique des sols virent le jour en 1920 aux USA et 1934 en France. Dans le sillage des travaux de Terzaghi et en particulier de sa thèse (1923), cette discipline se développa alors de façon autonome de la Résistance des matériaux.

Matériels, sondages et essai in situ

Nécessaires à la connaissance de la structure et la nature des matériaux constituant les fondations et carrière, les techniques de sondages étaient bien rudimentaires au XVIII^e siècle, malgré leur emploi pour les mines. De grands progrès furent obtenus dans le cadre du forage de puits artésiens. Le sondage au diamant se développa à partir de 1862 (Lescot), mais ne portèrent leurs fruits qu'au début du XX^e siècle. Les essais de pénétration connus au moins depuis le XVIII^e siècle dans leur principe furent systématisés pour les essais dynamiques aux USA (SPT, 1902), et pour les essais statiques en Suède en 1917.

Le début du XX^e siècle fut aussi celui de la géologie appliquée au barrage⁵⁰. Les grands ouvrages alors étudiés, Serre-Ponçon, Génissiat, et d'autre plus modeste mais non moins intéressants,

⁵⁰ J.L. Bordes, « Histoire des débuts de la géologie appliquée aux barrages », *Revue française de Géotechnique*, n° 105, 4^{ème} trimestre 2003, pp 77-87.

conduisirent les géologues à s'intéresser au-delà de la seule imperméabilité à l'aspect mécanique des structures. On citera les noms de Kilian, Lugeon, Gignoux et Barbier. Les trois derniers ont laissé des traités qui permirent de transmettre leur savoir et leur expérience.

L'auscultation des structures

L'importance des structures métalliques construites après 1850 avait conduit leurs concepteurs constructeurs à vérifier calculs et dispositions constructives par des mesures de la déformation, seule réponse aux sollicitations directement accessible (Dupuy 1877, Rabut 1891). C'était le premier pas d'une démarche, celle de l'auscultation des structures in situ, qui constitue de nos jours un outil essentiel à la surveillance des barrages. Elle se limita d'abord à celle des structures en fer.

En 1852, le barrage en maçonnerie de Grosbois en France, construit de 1830 à 1838, fut l'objet de relevés topographiques qui devaient permettre de suivre le déplacement de sa crête. Depuis son premier remplissage en 1838, cet ouvrage avait posé de nombreux problèmes et exigé plusieurs renforcements.

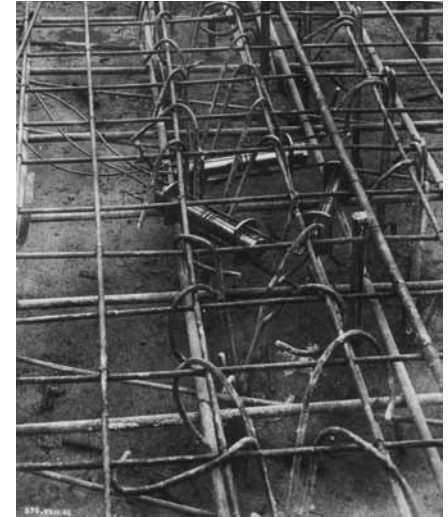
A la fin du XIX^e siècle, en Inde, les observations faites au moyen de piézomètres ouverts ont permis de mieux comprendre les écoulements sous les barrages d'irrigation fondés sur alluvions. On mesurait ainsi une pression d'eau qu'on n'appelait pas encore interstitielle. En 1907, ce type d'instruments a été utilisé par les ingénieurs anglais dans ce même pays pour déterminer la surface

libre de la nappe d'écoulement établie dans un barrage homogène en terre. Dès 1917, des piézomètres étaient utilisés aux États-Unis dans les barrages en terre et, par la suite, des perfectionnements ont conduit à la conception des cellules de mesure de pressions interstitielles hydrauliques.

Malgré ces premières mesures, c'est seulement après la 1^{ère} guerre mondiale que le laboratoire continua dans ce domaine à sortir de ses murs en auscultant les structures des barrages en béton. En 1922, un programme important d'instrumentation des barrages-voûtes fut lancé en Californie. Ce programme avait pour but la compréhension du comportement mécanique de ce type de structures, pour en réduire les coûts et accroître leur sécurité. Il culmina en 1927 avec le barrage voûte expérimental de Stevenson Creek, équipés de plusieurs centaines d'appareils récemment développés. Les résultats en furent rapidement diffusés dans le monde entier⁵¹.

Le capteur extensométrique à corde vibrante, alors appelé «témoin sonore» et breveté par André Coyne en 1931, constitua en France un progrès important. Ce capteur permettait de mesurer sur une base courte le déplacement relatif de deux points avec une très grande résolution et précision et stabilité sur des dizaines d'années. Après de premiers essais dans le barrage-voûte de la Bromme (1930-1932), construit sur la Bromme, la première grande auscultation fut celle du barrage de Marèges (1932-1935) sur la Dordogne, barrage-voûte particulièrement novateur, où 78 capteurs de ce type furent placés dans

le corps de la voûte et 40 autres dans le renforcement des appuis et culées. Cette instrumentation répondait au besoin de pallier l'insuffisance des méthodes



Exemple de témoins sonores : l'Aigle 1947

de calculs par l'observation directe, avec des mesures, de la réponse des structures aux sollicitations appliquées. D'autres opérations dans un pont, un mur de quai, une conduite forcée en béton précontraint permettaient à Coyne⁵², en 1938, de montrer les capacités du matériel et la richesse de la méthode.

De nouveaux appareils et méthodes sont apparus depuis cette époque. La mesure en un point n'avait pas le caractère intégrateur d'une mesure sur une grande base comme celle donnée

⁵¹ P. Caufourier, « Le barrage d'essais de Stevenson creek (Etats-Unis) », *Le Génie civil*, 16 janvier 1926, 15 octobre 1927.

⁵² Coyne, A., « Quelques résultats d'auscultation sonore sur les ouvrages en béton, béton armé ou métal », *Annales de l'institut du bâtiment et des travaux publics*, 1938, juillet-août, pp 33-56.

par les pendules directs ou inverses à partir des années 60. Ces derniers permettaient de connaître la réponse de la fondation et répondaient aux questions des exploitants très concernés par la stabilité des fondations, après la catastrophe de Malpasset. Par ailleurs les méthodes de suivi topographique se sont sensiblement améliorées.

Au cours du dernier quart du siècle dernier, la pratique de l'auscultation a été grandement modifiée par les progrès en micro-informatique. Ceux-ci permirent l'acquisition automatique et le traitement de données, en particulier des signaux faibles ou des variations de faible amplitude, et changèrent de ce fait la nature même des résultats de l'instrumentation. L'importance croissante conférée à la sécurité publique a conduit les autorités de nombreux pays à légiférer dans le domaine des procédures de contrôle et de surveillance des barrages lors des études, de la construction et enfin pendant la période d'exploitation. La mise en place des systèmes d'auscultation et leur exploitation fait partie des procédures de surveillance et de contrôle.

Les sociétés savantes et notamment la Commission internationale des grands barrages, fondée en 1928, ont toujours accordé la plus grande importance au recueil des données d'expérience sur les ouvrages. Le nombre considérable de rapports consacrés à ce sujet ainsi que les publications spéciales qui s'ensuivaient, montrent l'intérêt que revêt l'ensemble des techniques d'auscultation⁵³. La symbiose des pratiques des constructeurs de barrages avec une démarche de nature expérimentale s'impose avec évidence.

Ainsi depuis plus d'un demi-siècle, l'auscultation des ouvrages de génie civil s'est peu à peu constituée en une approche systématique du comportement des ouvrages. Elle est à l'origine de progrès importants dans la connaissance de phénomènes physiques qui se développent dans les structures, en particulier en fonction du temps (déformation de fluage). C'est une démarche très analogue à celle du médecin qui associe l'observation visuelle, la mesure périodique de grandeurs physiques au moyen d'appareils (on parlera alors d'instrumentation), l'analyse des résultats, leur traitement et l'analyse en retour avec l'emploi de calculs directs de l'ouvrage au moyen d'un modèle mathématique recalé grâce aux mesures.

Mais l'auscultation est bien plus qu'une technique au service de la seule sécurité. Dans la mesure où il faut suivre des ouvrages pendant des décennies, l'auscultation permet de suivre au mieux leur «état de santé» et ainsi de gérer dans les meilleures conditions l'entretien, la réparation, voire même éventuellement le déclassement et la mise hors service. L'auscultation devient ainsi un outil de gestion du patrimoine de l'infrastructure d'un pays.

Codes de calcul et méthodologie

La modélisation par le calcul n'est qu'une étape dans la démarche expérimentale par la formulation en langage mathématique d'une hypothèse relative au comportement de la structure étudiée, issue du processus d'observation. Ce n'est pas un aboutissement, car cela reviendrait à refuser de tenir compte de tout apport ultérieur de l'observation.

Dans la conception d'un barrage le calcul intervient à différents niveaux, au stade de la vérification d'un ouvrage dont on a choisi le parti et qui a été préalablement dessiné. On ne calcule pas un barrage, on le vérifie.

On construit des barrages bien avant de savoir les calculer. Toutefois dès la fin du XVII^e et au cours du XVIII^e siècle, les premières expressions mathématiques de phénomènes modélisés apparaissent. Il s'agissait de calculs à la rupture très simple qui aidèrent de Bélidor à Navier à dimensionner les barrages poids. Coulomb dans son célèbre mémoire de 1773, à partir de son expérience de terrain proposait un schéma fécond de calcul de poussée des terres. Toutes ces approches marquèrent le début d'un processus continu couronné par le calcul du barrage poids du Furens⁵⁴ (1866) alors le plus haut barrage du monde, qui constitua un véritable saut technologique. François Zola en 1838 fit une analyse juste du barrage-voûte qu'il projetait⁵⁵, mais c'était une analyse presque essentiellement qualitative. L'expérience de la rupture de Bouzey (1895) conduisit à tenir compte pour les barrages-poids des effets de l'eau, mal compris jusqu'alors.

Barrage poids ou voûte, le problème dans son principe était le même. Mais il était plus compliqué pour les voûtes,

⁵³ *Dans le cadre de l'activité de ses groupes de travail, entre 1969 et 1989, la CIGB a publié pas moins de 5 bulletins relatifs à la synthèse de l'expérience accumulée dans le domaine de l'auscultation des barrages, sans compter 12 questions consacrées à l'auscultation sur 87 lors des congrès (1933-2006)*

⁵⁴ *Bordes J.L., Les barrages-réservoirs en France... op. cit., p 177-191*

⁵⁵ *ibid, p 201-214*

système hyperstatique de haut degré, et c'est l'expérience qui petit à petit a permis d'améliorer les codes de calculs, expérience qui s'est appuyée sur l'observation et la mesure des ouvrages existants, les essais sur modèles pour certaines écoles techniques, en un mot sur la méthode expérimentale.

Les calculs des voûtes, s'appuyant sur la résistance des matériaux et pour partie sur la théorie de l'élasticité, étaient très lourds, longs et compliqués. Ils furent améliorés petit à petit, par approximations successives depuis la fin du XIX^e siècle, jusqu'à l'imposant outil que constituait la «trial load» pour le calcul des voûtes, aboutissement d'une évolution sur plusieurs dizaines d'années achevée à l'occasion de la construction du Hoover dam sur le Colorado terminé en 1935, ouvrage poids voûte alors le plus haut du monde avec 220m de hauteur.

Ces calculs d'ajustements arcs/consols ne reflétaient qu'imparfaitement la réalité. Leur mise en œuvre fut améliorée progressivement par les progrès de l'informatique à partir de la fin des années 50. Mais la véritable révolution fut l'introduction de la méthode des éléments finis⁵⁶ dans le courant des années 60. Cette méthode, imaginée au début des années 1950 pour les besoins de l'industrie aéronautique, passait par un découpage de la matière en éléments qui permettaient une souplesse de représentation jusqu'alors inconnue de la forme des ouvrages y compris les fondations, et la possibilité de faire varier les propriétés de la matière les constituant, en particulier par le biais des lois des matériaux. Les calculs qui en résultaient n'ont été rendus possibles que grâce à la puissance croissante des

ordinateurs. Ces outils extrêmement puissants permirent de calculer des ouvrages avec beaucoup de raffinement et dans des délais raisonnables. Toutefois si on pouvait assez bien cerner la partie qui dépendait des procédés de fabrication (béton, terre compactée, armatures et câbles de précontrainte), la représentation des fondations demeurait tributaire de la qualité et de la densité des reconnaissances, ainsi que de l'évaluation des propriétés des matériaux constituant les fondations, estimation toujours entachée du risque de passer à côté du «détail géologique mineur», suivant l'expression de Karl Terzaghi⁵⁷.

On peut disposer actuellement d'une méthode permettant de constituer pour chaque ouvrage un modèle mathématique adapté au fur et à mesure par la prise en compte des observations et mesures effectuées sur l'ouvrage réalisé, d'abord au cours de sa réalisation par une meilleure prise en compte des conditions réelles des fondations (géométrie et propriétés), ensuite au cours de la première mise en eau, et enfin en cours d'exploitation. Cette association du modèle théorique et de l'observation du comportement statique et dynamique de l'ouvrage est une voie féconde pour essayer d'en mieux prévoir le comportement⁵⁸. Le calcul constitue alors une espèce d'aboutissement de la démarche expérimentale, qui paradoxalement est un nouveau départ en renvoyant aussitôt l'ingénieur à l'objet de son processus créatif. Il s'agit d'un processus itératif sans fin.

Toutefois cette approche déterministe ne doit pas faire oublier celle également

très féconde qui consiste à traiter statistiquement les valeurs données par les appareils de mesures. Après avoir éliminé l'influence des facteurs tels que la hauteur d'eau dans la retenue et la température, on vérifie la stationnarité de la réponse. Si cette stationnarité n'est pas constatée, on recherche quels peuvent être les facteurs complémentaires affectant la réponse de la structure, comme par exemple le fluage non élastique du béton ou d'une partie de la fondation, jusqu'à obtenir un résidu nul. Cette analyse permet de suivre la réponse de la structure sur des dizaines d'années, et de détecter les signes imperceptibles d'une évolution pouvant être annonciatrice d'une pathologie.

Il y a néanmoins de nombreux phénomènes qui échappent pour partie ou totalement à la mesure ou au calcul, comme l'érosion interne par exemple. On ne les encadre que partiellement par une caractérisation chiffrée. Leur détection a été le fait d'une surveillance visuelle dont on ne soulignera encore jamais assez l'importance. C'est le cas aussi de cette grave maladie du béton que constitue l'alcali-réaction diagnostiquée aux alentours de 1938. L'œil reste encore le meilleur capteur dont dispose l'homme.

⁵⁶ R.W. Clough «Early history of the finite elements method from the point of view of a pioneer», *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Volume 60, Issue 1, Pages 283-287, 2004, John Wiley & Sons, Ltd.

⁵⁷ Terzaghi K., «Effects of minor geological details on the safety of dams», *American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Technical publications*, 215, 1929, p 31-44.

⁵⁸ Tardieu B., Ozanam O., *Le modèle accompagnateur de projet : conception et suivi des grandes infrastructures*, Paris, Hermes, 1997, 158 p.



Bort-les-Orgues 1951

On retrouve ainsi l'importance de la démarche ancienne d'une description naturaliste et de l'énoncé de recommandations d'ordre qualitatif, tout à fait analogue aux maximes de Bélidor du XVIII^e siècle, qui ouvre la porte à une démarche quantitative toujours progressive.

Ouvrages phares, accidents et innovations

Toutes les évolutions qui viennent d'être brièvement analysées se firent dans le cadre des contraintes auxquels avaient à faire face les ingénieurs dans le cadre de leur mission (contraintes économiques, techniques dues aux imprévus du site mais aussi des limites de leurs connaissances, organisationnelles...). Mis au défi par la société, c'est-à-dire, une collectivité locale, un service de l'État, une société industrielle, de répondre à sa

demande, ils essayèrent d'aller aux limites de leur connaissance, et des moyens techniques alors disponibles tout en respectant les normes de sécurité qui étaient les leurs à l'époque. Il est assez troublant de constater qu'il y eut peu de blocage technique. Ou les ingénieurs se surpassaient comme au Furens, après d'ailleurs avoir cherché à éviter le record, ou on ne leur réclamait que des choses raisonnables. L'histoire de certains ouvrages phares mis dans la perspective des avancées qu'ils permirent, mérite d'être parcourue à la fois sous l'angle de l'apport, la compréhension immédiate et la transmission des enseignements.

La construction des canaux à partir de 1820 en France, va faciliter l'élaboration d'une pratique de la construction des barrages nécessaires à leur alimentation. La procédure du «projet» suivant la

signification de ce mot qu'en donne Belidor, dans laquelle le concepteur décrit, justifie et estime l'ouvrage à construire, permet de discuter et de conserver la mémoire. Après la Révolution, le projet était soumis par son auteur à l'approbation de la commission de la navigation du Conseil général des ponts et chaussées, qui désignait un rapporteur qui se rendait sur le site. Entre les années 1830-1870, le conseil était constitué de membres ayant l'expérience des travaux. Au cours de cette période, on rechercha des méthodes de calcul qui rendaient compte des efforts à l'intérieur des ouvrages. Jusqu'aux environs de 1850 et disons depuis le début du XVIII^e siècle, les barrages en maçonnerie étaient calculés comme des solides rigides indéformables, dont on vérifiait la stabilité au renversement et au glissement. Contrairement à ce qui a été souvent écrit, il n'y avait aucune irrationalité dans la démarche des ingénieurs d'alors. Le Lampy, Grosbois, sont des barrages qui ont été vérifiés. Si le profil de Grosbois nous semble aberrant, ce n'est pas parce que nos prédécesseurs faisaient n'importe quoi, c'est parce qu'ils ont suivi une démarche parfaitement explicitée dans le projet du barrage, qui s'appuyait sur une appréciation erronée des qualités de la fondation et de l'encastrement du barrage. Personne n'avait lu jusqu'à ces dernières années le texte du projet de 1829 qui se trouve aux Archives nationales⁵⁹.

⁵⁹ A.N. F14 6861, rapport de projet de Grosbois et Cercey signé Lacordaire et Bonnetat, de 1829, 100 p. et plans.

Le barrage de Grosbois et les 4 autres barrages d'alimentation de la même époque, constitue une étape majeure dans l'évolution des connaissances dans le domaine de la mécanique des sols et en particulier des effets de l'eau. Conçu dans les années 1828-1829 par Bonnetat et Lacordaire, ingénieurs des ponts et chaussées, ce barrage en maçonnerie de 22 m de hauteur construit de 1830 à 1838, se fissa lors de son premier remplissage qui fut dès lors stoppé. A. Collin jeune ingénieur des ponts et chaussées, affecté depuis 1833 chercha à comprendre les mécanismes des désordres afin de pouvoir définir les travaux de confortement. Il fut aidé si l'on peut dire dans sa démarche, par des désordres concomitants dans les talus d'excavations, ou de remblai de barrages. Ces travaux lui permirent de conduire une analyse qui l'amena à une synthèse qui fait l'objet de l'annexe 5.

La conception du barrage du Furens apparaît alors comme l'œuvre d'une équipe, dont le travail s'inscrit dans la durée. L'article fondateur de la méthode

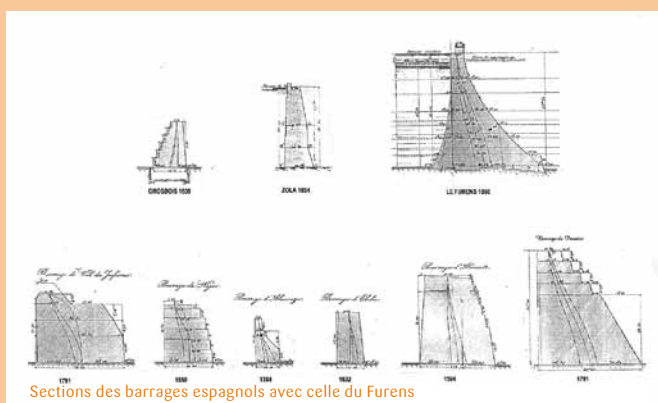
est celui de Sazilly publié dans les Annales des ponts et chaussées en 1852. Mais il procédait d'une analyse due à Méry publiée dans ces mêmes annales en 1840. Ce qui nous paraît important, est l'ordre donné en 1854 par la commission de la navigation du Conseil général des ponts et chaussées aux concepteurs du barrage des Settons, de redessiner leur barrage en s'appuyant sur l'analyse de Sazilly. L'administration joua ainsi un rôle clé dans la constitution d'un savoir et de sa transmission.

Aussi lorsque A. Graeff, du service spécial de la Loire, étudia à partir de 1856 le barrage de Furens, les outils techniques étaient-ils disponibles. Mais il s'agit encore d'un travail d'équipe : A. Graeff n'est pas seul : la liste donnée par lui-même est exemplaire, liste en conclusion à la notice de présentation de la maquette du barrage pour l'exposition universelle de 1867 : «M. Conte-Grandchamp a établi l'avant-projet, M. Delocre a étudié le profil théorique, M. Graeff en a dressé le projet définitif, M. de Montgolfier en fit exécuter tous les ouvrages sauf la

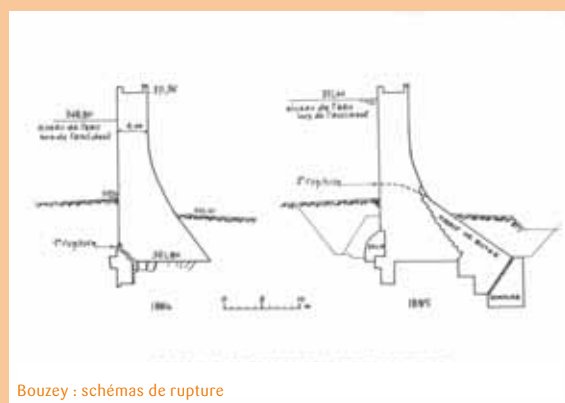
prise d'eau. Trois conducteurs se sont distingués : MM. Falkowski, Odin aîné et Duplay. Les entrepreneurs furent MM. Chonier et Moustiers».

Les recherches des ingénieurs pour assurer leur réussite s'étendirent au passé. L'expérience des barrages espagnols vieille de plusieurs siècles fut analysée à la lumière des calculs devenus alors possibles. La dimension internationale est toujours présente.

Ce travail fut habilement médiatisé par de nombreux articles extrêmement documentés dans les Annales des ponts et chaussées, et de multiples publications dans les revues françaises et étrangères puis dans des traités de construction de barrages anglais et américain. Plusieurs maquettes furent réalisées pour l'exposition universelle de 1867 à Paris. Appelé le «barrage français», son profil amélioré au fil de nouvelles réalisations en France et à l'étranger, demeura un modèle pendant près d'un demi-siècle.



Sections des barrages espagnols avec celle du Furens



Bouzey : schémas de rupture

Cette accumulation d'expériences et de connaissances n'allait pas sans pertes ou retard dans la diffusion de certaines leçons à tirer. On a raconté la difficulté de Collin à se faire comprendre. On peut regretter la méconnaissance dont fut victime le barrage Zola en France. Alors que Graeff étudiait le barrage du Furens en 1856 et se posant le problème de la solution voûte, il déclarait ne pas connaître de barrage existant d'une hauteur de l'ordre de celle prévue. La mise en eau du barrage Zola datait de 1854. L'administration avait eu à traiter de ce barrage. Il est vrai que l'ingénieur des ponts et chaussées Tournadre ne publiera une note dans les Annales des ponts qu'en 1872. Celle-ci fut connue des ingénieurs australiens et américains. On la retrouve en bonne place dans la 1ère édition du traité de Wegmann en 1888.

L'accident de Bouzey⁶⁰ vint malheureusement ternir cette réussite. Il s'agissait d'un barrage en maçonnerie d'une hauteur modeste de 22 m, terminé en 1881 pour assurer l'alimentation du canal de l'Est. Le site de Bouzey a été le théâtre de deux accidents :

★ Le premier en 1884, sans conséquence pour les personnes, situé dans la fondation, a été analysé en tenant compte de la pression de l'eau à la base du barrage. Il avait provoqué le déplacement d'une partie du barrage sans toutefois conduire à sa ruine. On a remédié à cet état de fait en élargissant la fondation et en reportant la résultante (barrage plein) sur une butée. Une variante avait suggéré d'y associer une galerie de drainage, qui fut écartée. La cause de l'accident fut imputé aux sous pressions, qui à l'époque, croyait-on ne pouvaient exister que dans un milieu perméable.

★ Le second en 1895 dans le corps du barrage, suivant une ligne de rupture dessinée sur la figure de droite. On déplora 70 morts.

La raison de la rupture est le dessin d'un profil trop mince qui conduisait au développement de contraintes de traction sur la face amont qui ne pouvait que faciliter l'amorce de fissures et l'introduction de l'eau en pression entraînant ainsi la ruine de l'ouvrage Maurice Lévy, inspecteur général

des ponts et chaussées, membre de l'Académie des sciences comprit le mécanisme de la rupture dès le début, comme le montre un compte-rendu à l'Académie des sciences en août 1895⁶¹. Il montrait le déséquilibre qui résultait de la pénétration de l'eau dans une fissure, définissait des règles de profil pour les nouveaux barrages. Pour les anciens, il préconisait la mise en place d'un masque qui isolait le corps du barrage de la retenue, masque drainé sur sa face aval, solution qui fut par la suite remplacé par le drainage du corps du barrage. Mais cette analyse ne fut pas assimilée immédiatement. La circulaire ministérielle sur les barrages de grande hauteur de 1923, reprit pour partie les termes de l'analyse de M. Lévy.

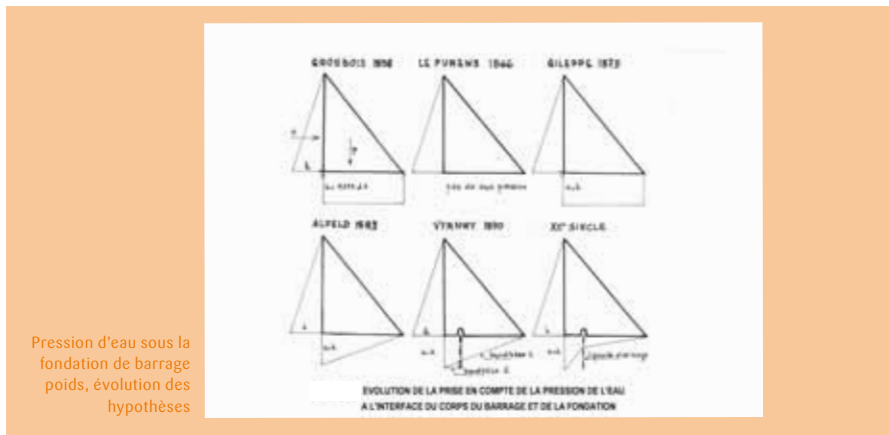
Pour prévenir le retour de telle catastrophe, plusieurs dispositions furent prises :

- ★ Vérification de la stabilité de tous les barrages en maçonnerie existants, à la lumière des enseignements tirés de la catastrophe de Bouzey par décision ministérielle du 10 mars 1896, qui incluait la définition de nouvelles normes de calcul ;
- ★ Création d'une commission des grands barrages au sein du conseil général des ponts et chaussées.

Cet accident posait le problème de la stabilité des barrages poids sur sa fondation. La figure page 102 montre

⁶⁰ A. Coyne, « barrage de Bouzey », dans *Leçons sur les grands barrages*, Ecole nationale des ponts et chaussées, 1943, p. 20-24.

⁶¹ M. Lévy, « Quelques considérations sur la construction des grands barrages », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, tome CXXI, 1895, séance du 5 août 1895, p. 288-300.



Pression d'eau sous la fondation de barrage poids, évolution des hypothèses

l'évolution de la prise en compte de la pression au contact du corps du barrage et de la fondation, première des fissures potentielles avant toute autre pouvant survenir dans le corps des barrages. Le rôle pionnier d'A. Collin apparaît bien, qui à Grosbois réalisa un calcul de sensibilité de la stabilité du barrage, qui lui permit de déterminer le type de rupture survenu.

A partir de l'expérience de Grosbois (1838), l'examen de l'évolution des hypothèses prises en compte ne manque pas d'intérêt en montrant l'approche progressive d'une démarche collective : Au Furens (1866), la confiance accordée à l'imperméabilité des mortiers mis sur le parement amont du barrage ainsi qu'à l'obturation systématique des fissures du rocher en amont, conduit à ne pas prendre de valeur de la sous-pression en fondation.

Les Belges par contre au barrage de Gileppe (1875), prennent en compte une sous-pression revenant à déjauger la totalité du barrage en référence au niveau amont.

Les Allemands pour Alfeld (1883) en Alsace ont une démarche très moderne, surtout si l'on sait que ce calcul était appliqué à toutes les sections horizontales du barrage

Les Anglais introduisent à Vyrnwy (1890) le drainage des fondations qui ne sera généralisé en France qu'après 1920. Au courant du XX^e siècle, les hypothèses retenues s'appuyèrent sur des mesures dont une synthèse remarquable a été faite par A. Casagrande⁶².

Le problème de l'écoulement de l'eau dans les sols⁶³ ou dans un massif de maçonnerie a été un objet de réflexion et de préoccupation dès le XVIII^e siècle. Mais ce fut une série de tâtonnements, d'intuitions trop souvent mal fondées, de pratiques allant à l'encontre de ce qu'il aurait fallu faire. La nécessité de mieux comprendre s'accrut avec tous les ouvrages hydrauliques (digues, écluses, remblais, barrages) consécutifs à la construction des canaux A. Collin fit des progrès dans ce sens montrant l'intérêt du drainage dans les matériaux argileux mais fut mal entendu (*voir annexe 5*). La notion et la connaissance du régime des pressions restait sommaire à la fin du XIX^e siècle. Il fallut combiner la loi de Darcy (1856) au travail de Forcheimer en 1914 pour tracer des réseaux d'écoulement. J. Frontard dans le cadre de l'accident de la digue de Charmes⁶⁴, montrait l'existence de pression dans l'argile, battant en brèche l'idée suivant laquelle, il ne pouvait y avoir de pression que dans un terrain perméable. L'apport le plus fondamental fut celui de K. Terzaghi en 1923 avec sa définition de la pression neutre qui fonda définitivement la mécanique des sols comme une branche de la Résistance des matériaux. Il établissait la relation entre la résistance au cisaillement d'un massif de sol et le régime des pressions qui y régnait.

La rupture de la fondation du barrage de Malpasset fit prendre conscience des effets mécaniques de l'eau dans un milieu fissuré (*voir annexe 2*). Cet apprentissage ne se fit pas sans peine. Trois commissions administratives et judiciaires se succédèrent pour essayer de faire la lumière⁶⁵. Quatre thèses (J.

Bernaix, V. Maury, B. Schneider, C. Louis) furent faites. Dans le courant de l'année 1967, on pouvait arriver à une conclusion acceptée par la communauté impliquée. Sans attendre l'ensemble des données, des dispositions avaient été prises pour mieux implanter dans les fondations de barrages voûtes, les rideaux d'injection de drainer les fondations, réexaminer tous les barrages, implanter ou renforcer les systèmes d'auscultation.

Comme cela avait été le cas après la rupture de Bouzey, des structures administratives de contrôle et des instructions réglementaires furent renforcées ou mises en place : Comité technique permanent des barrages (CTPB en 1967) et circulaire interministérielle de 1970 pour les barrages de plus de 20 m de hauteur.

Matériaux, méthode d'exécution, contraintes de site et conception des ouvrages

Notre propos était à travers l'histoire des barrages et une analyse thématique de montrer l'importance de la méthode

⁶² Casagrande A., «Control of seepage through foundations and abutments of dams», *Géotechnique*, Vol 11, n°3, sept 1961, p.159-182.

⁶³ J.L. Bordes, «Aperçu historique sur la notion de la pression de l'eau dans les sols et les milieux fissurés du XVIII^e au début du XX^e siècle en France», *Revue française de Géotechnique*, n° 87, 2^{ème} trimestre 1999, p.3-15.

⁶⁴ J. Frontard, «Notice sur l'accident de la digue de Charmes», *Annales des ponts et chaussées*, 9^{ème} série, vol. 23, sept-oct 1914, p. 173-292.

⁶⁵ Bellier J. «Le barrage de Malpasset», *Travaux*, n°389, juillet 1967. M. Mary., *Barrages voûtes ; historique, accidents et incidents*, Dunod, Paris, 1968. P. Duffaut «Cinquante ans de la rupture des fondations et du barrage de Malpasset (Var)» art. cit.

expérimentale dans la constitution d'un savoir. Nous nous sommes intéressés à tout ce qui concernait le mur proprement dit. Mais un barrage ne se limite pas à cette seule fonction. Un barrage intègre ce qu'on appelle des ouvrages annexes, ce qui ne veut pas dire qu'ils sont d'un intérêt secondaire. Ils ont pour fonction d'éviter la submersion du barrage (évacuateur de crues) ou d'assurer le contrôle de la montée du plan d'eau (vidange de fond) ou enfin assurer les finalités d'un barrage (prises d'eau). Les contraintes de sites données géologiques, hydrologie, par les conditions de dérivation et d'exécution influent sur le type et le parti du barrage, comme on a pu le voir dans la description de certains d'entre eux. De même les disponibilités des matériaux et matériels peuvent influencer grandement sur les solutions retenues. On peut se poser la question qui de Terzaghi ou de Caterpillar a été le plus important dans le développement des barrages en terre ? Le sujet est trop vaste pour être traité ici, et a été abordé par petites touches dans la première partie de cet article.

Troisième partie : La transmission du savoir et les transferts technologiques

Les canaux de transmission en sont multiples et pour beaucoup très anciens, à l'échelle des quatre derniers siècles. Nous allons essayer d'examiner les

principaux malgré les croisements et la superposition de beaucoup d'entre eux, principalement à cause des hommes qui circulent à travers toutes ces formes de communication, et malgré les multiples recoupements avec le contenu des deux premières parties.

Les traités, et les revues

Tout au début, la place du barrage en tant qu'ouvrage est modeste, il est confiné dans quelques chapitres comme dans l'Architecture hydraulique de Bélidor (1737-1770)⁶⁶.

L'abbé Bossut professeur de Monge à l'École de Mézières, rédige un des tout premiers traités consacrés aux digues en 1764⁶⁷. Enfin, nouvel exemple de transfert technologique en provenance de l'étranger, l'ouvrage de Delius⁶⁸ sur l'exploitation des mines, comportait une partie très importante sur les barrages qui fournissaient l'eau et l'énergie. La technique des barrages en remblai à noyau, très répandue en Bohême, y était présentée.

Elle ne se développa pas en France au contraire de ce qui se passa en Angleterre. Les données géographiques et géologiques ne sont pas étrangères à ce contraste. Par la suite tout au long du XIX^e siècle, les barrages seront traités comme organes d'alimentation dans les nombreux traités de navigation intérieure de Minard (1841) à Jacquinet et Galliot (1922).

Le premier vrai traité de barrage est celui publié à New-York par l'ingénieur américain d'origine suisse Wegmann qui connut huit éditions de 1888 à 1927. La première édition traitait presque

exclusivement de l'expérience française et espagnole. Cet ouvrage se retrouve dans les bibliothèques françaises.

En France, H. Bellet publie en 1907 un traité entièrement consacré aux barrages, premier d'une série régulière de livres jusqu'à nos jours. L'actualité éditoriale était alimentée par la publication de cours dispensés dans les écoles d'ingénieurs ou par des sujets d'actualité comme un voyage aux Etats Unis avec Degove ramenant l'expérience des barrages voûtes en 1922, ou Post et Londe celle de la pratique des barrages en terre compactée en 1953.

Il en était de même à l'étranger et les traités américains ou anglais principalement se retrouvaient dans les bibliothèques des écoles concernées, contribuant à la mise en commun de l'expérience à travers le monde.

Les revues présentaient l'avantage d'une transmission plus rapide de l'information, au risque d'une réflexion moins approfondie. Une centaine dans le monde aux alentours de 1800, elles étaient 10 000 en 1900. Mais jusqu'en 1920 dans les revues françaises, le barrage est un sujet beaucoup moins traité que les ponts, les routes ou les chemins de fer. Trois revues jouèrent un rôle particulier : les Annales

⁶⁶ Bélidor, B. *Forest de, Architecture hydraulique, Paris, C. A.*

⁶⁷ Ch. Bossut, Abbé, *Recherches sur la construction des digues, Paris, C. A. Jombert, 1764, 60 p., 7 pl.*

⁶⁸ Delius, C.F., *Traité sur la science de l'exploitation des mines par théorie et pratique avec un discours sur les principes des finances, traduit en français par M. Schreiber, Paris, Philippo-Denys & Pierres, 1778*

des ponts et chaussées, le Génie civil, et la Houille blanche respectivement fondée en 1830, 1879 et 1902.

Les Annales des ponts et chaussées, organe du corps des ponts et chaussées publiaient des articles, véritable état de l'art sur un problème donné. Certains articles comme sur l'hydrologie de la Seine par Belgrand (1846 et 1852), les mesures sur les ponts du réseau de l'Ouest par Rabut (1896) ou l'accident de la digue de Charmes par Frontard (1914), ayant jusqu'à 200 pages et plus, furent des références et des outils de travail remarquables.

Le Génie civil qui fut fondée par ce qu'on appelait à l'époque des ingénieurs civils dont beaucoup de centraliens, avait une ouverture plus grande à la fois sur l'ensemble de l'industrie et sur l'étranger. On peut y suivre le développement de l'hydroélectricité dans toute l'Europe et aux États-Unis, par des articles à caractère monographiques, de courtes notes, et des revues de publications étrangères. Les très grands barrages américains d'avant 1914, New Croton, Soshosne, Roosevelt y furent traités avec beaucoup de détail.

La Houille Blanche était consacrée à l'hydraulique et à l'énergie hydraulique. Cette revue publia par la suite des monographies techniques très complètes, sur de grandes réalisations⁶⁹. On mentionnera la revue Travaux qui publia à partir de 1934 des articles très fournis en données techniques et économiques. Cette énumération est incomplète et laisse dans l'ombre de nombreux titres.

Les écoles

Les écoles furent par excellence des lieux de formation et de transmission du savoir. L'École des ponts et chaussées fondée en 1747, fut la première en France et dans le monde. Elle précéda de peu l'École du génie de Mézières (1748) où enseignèrent Monge, l'abbé Bossut et où fut élève C. A. Coulomb. Suivirent toujours en France, plusieurs écoles à la fin du xviii^e et tout au long du XIX^e siècle, écoles souvent généralistes mais avec une composante génie civil qui donnait à ses élèves les outils nécessaires pour aborder les problèmes des barrages. La pratique qui consistait dans les écoles à nommer des professeurs qui avait une activité en parallèle dans les travaux publics et le bâtiment contribua à une diffusion souvent rapide de nouvelles techniques. Il en fut ainsi avec le béton armé à l'École centrale, où des projets de sortie dès 1894 traitaient de structures en béton armé. Les traités mentionnés plus haut étaient pour la plupart issus des cours donnés dans les écoles.

Les corps techniques

La prééminence en France de l'État dans la définition et la conduite de travaux à des fins militaires, puis d'aménagement du territoire pour aider au développement industriel, a favorisé l'émergence d'un corps d'État à la fois maître d'ouvrage «délégué» assumant les responsabilités du propriétaire qu'était l'État ou certaines collectivités locales, et les responsabilités de maître d'œuvre. C'est le corps des ingénieurs des Ponts et Chaussées qui date du 1^{er} février 1716.

Un certain nombre d'organes furent créés pour assurer des missions de contrôle des travaux conçus et supervisés par les services de l'État.

Ce fut tout d'abord la commission des canaux (1822) renommée de la navigation (1831). Vinrent plus tard, la commission de l'hydraulique agricole (1882), la commission des barrages (1895) dite en 1923 des barrages de grande hauteur. Une dualité ministère des Travaux publics et agriculture intervint dans le problème des barrages parce que l'agriculture intervenait sur les rivières ni navigables et flottable. Ceci explique pourquoi les services de Forces hydrauliques créées le 25 mars 1903, furent du ressort du ministère de l'Agriculture jusqu'en 1945. L'action de ces commissions fut souvent indirecte et importante. On a souligné son rôle dans le développement des barrages en maçonnerie aux alentours des années 1850. Il n'y pas à proprement parler de productions de ces commissions dont les débats n'avaient pas vocation à être publiés et qu'on retrouve maintenant en archives.

Un cas de capitalisation et de diffusion de l'expérience mérite un court développement. Il concerne le service technique des grands barrages (STGB) 1935.

La réussite de l'activité du service spécial de la haute Dordogne, l'augmentation du nombre de projets et de leur importance conduisirent les pouvoirs publics à créer un service par modification de l'arrêté

⁶⁹ Se reporter à la bibliographie en fin de l'article.

du 28 février 1920 qui avait institué un service central des forces hydrauliques et de distribution d'énergie hydraulique, par l'arrêt du 2 novembre 1935. Ce nouveau service avait pour mission de «constituer et tenir à jour une documentation technique sur les travaux de distribution d'énergie électrique, d'aménagement des cours d'eau et notamment des grands barrages, d'étudier les types et conditions générales des ouvrages en vue notamment de faciliter la préparation d'exécution par l'État, les départements et les communes de réseaux de distribution ou d'usines hydroélectriques ou de grands barrages». André Coyne déjà en charge de la Haute-Dordogne était nommé à la tête de ce service qui prenait le nom suivant les termes de l'arrêté de «Service technique des grands barrages et d'aménagement de la haute Dordogne».

André Coyne dans le cadre de ce service déploya une activité multiple. Quelques chiffres en donneront une idée de son activité : du 4 août 1939 au 31 mars 1942, il a effectué 133 tournées dans toute la France sur des sites de barrages en projets ou en travaux soit pratiquement une par semaine, malgré les difficultés de déplacement de l'époque.

Ce n'est qu'en avril 1944 que voyait le jour un bulletin du service technique des grands barrages réfugié à Mauriac. Dans son éditorial, A. Coyne écrivait : «A ce premier numéro, conçu pourtant dans la gêne de jours troublés, rien ne manque: haute tenue scientifique abondance et variété des sujets, et surtout amorces de débats techniques et de féconds échanges de vues».

Conserver l'expérience, en analyser le bien fondé et la transmettre ont été des exigences constantes de son action.

Les sociétés d'étude, ingénieurs conseils

Dans le génie civil, au contraire du monde anglo-saxon où les rôles entre le maître de l'ouvrage, ou propriétaire, l'ingénieur ou maître de l'œuvre (ou architecte) et l'entrepreneur qui exécute, sont très clairement définis, en France, le maître de l'œuvre trouve difficilement sa place entre un maître de l'ouvrage qui a des moyens de conception tout à fait conséquents et un entrepreneur qui avec le principe de la variante, particulièrement à partir de 1882, s'est doté lui aussi de moyens d'études s'appuyant sur la pratique de moyens d'exécution exceptionnels (particulièrement dans les ponts). Cette situation s'inscrivait dans un passé décrit dans le paragraphe précédent.

Aux limites du domaine du génie civil et de celui des travaux hydrauliques, l'existence d'ingénieurs conseils était par contre chose tout à fait courante. Construire une usine était devenu un métier à partir de 1820-1830. La plupart de ces ingénieurs étaient issus de l'École centrale, ou y professèrent. Ce champ d'expertise explique que les ingénieurs civils jouèrent un rôle important dans les premières réalisations hydroélectriques jusqu'en 1919, dans lesquels la structure du barrage étaient encore modeste, l'usine importante et l'implication de L'État réduite.



Sainte-Croix 1974

Dans le génie civil, seul le bureau d'études Pelnard, Considère et Caquot (1881-1976) fondé en 1906 représente l'activité libérale. Sa création fut en liaison directe avec la naissance du béton armé qui ouvrait des perspectives de réalisations tout à fait nouvelles. Ce bureau établit plusieurs projets de barrages en béton armé dont celui de la Sélune. Après 1920, A. Caquot qui est un des très grands ingénieurs du XX^e siècle, signa les projets des barrages du Sautet et de la Girotte. Plus tard dans le domaine des barrages, dans des circonstances analogues d'innovation et d'ouverture de marché, André Coyne (1889-1960), créa en 1947 un bureau d'études qui joua un rôle très important dans la maîtrise d'œuvre des

barrages (voir annexe 4). La pratique ainsi instituée en France présenta tout au long du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle un certain nombre d'avantages. La réalisation d'un ouvrage laissait face à face deux acteurs, les ingénieurs de l'État ou de très maîtres d'ouvrage et ceux de l'entreprise. La maîtrise technique des premiers leur permettaient d'analyser de comprendre et d'accepter les innovations de matériaux ou de procédés que proposaient les entrepreneurs. Ceux-ci pour répondre avec succès à la demande publique, dans un marché étroit, se sont appuyés sur l'innovation pour essayer de maintenir et d'augmenter leur marge. Ces dernières années, de nouveaux acteurs sont apparus et ont modifié ces rapports.

Sociétés savantes et associations professionnelles

On peut remonter sans peine jusqu'aux Académies du XVII^e siècle et en France l'Académie des sciences, sans compter les Académies de province. Dans le domaine du génie civil, le mémoire de Ch. A. Coulomb, mémoire fondateur de la mécanique des sols fut présenté à l'Académie des Sciences en 1773. C'est en réponse à un concours lancé par l'Académie de Toulouse en 1762 que l'abbé Bossut rédigea son opuscule sur la construction des digues. Mais c'est au XIX^e siècle que se constituèrent les premières sociétés sur des bases plus étroites comme la Société Géologique de France en 1830. Mais pour trouver des

sociétés aux préoccupations proches des barrages, il faut attendre 1912 avec la fondation de la Société hydrotechnique de France dans le sillage de la Houille Blanche et des congrès correspondants, le premier à Grenoble en 1902. En parallèle furent créées des organisations à caractère général et professionnel, plus ou moins ouvertes, comme la Société d'encouragement pour l'industrie nationale (1802), la Société des ingénieurs civil de France (1848) dont les bulletins constituent des réservoirs d'information participant à la diffusion du savoir. Ce n'est qu'après 1920 que seront créées d'autres sociétés touchant de près ou loin le barrage, Société internationale de mécanique des sols et fondations (1933) (France 1945), Géologie de l'ingénieur, Société internationale de mécanique des roches (1963).

A l'échelon international, la conservation de l'expérience et du savoir-faire de l'art des barrages, sa transmission et son analyse critique a trouvé son relais dans la Commission internationale des grands barrages (CIGB). Son origine lointaine remonte aux congrès organisés autour des expositions universelles dès 1855. Mais l'origine plus immédiate est celle des congrès internationaux de navigation intérieure dont le premier date de 1884. Dans ces congrès étaient régulièrement traitées des questions relatives aux digues et barrages dans le cadre des canaux, mais de façon plus ou moins marginale.

Le 5^e congrès tenu à Paris en 1892 fut l'occasion de la présentation par les ingénieurs français d'un ensemble de barrages tant en maçonnerie qu'en

terre, tout à fait exceptionnels pour l'époque. Le site du Furens fut un des lieux d'excursion des congressistes. 1.472 délégués venant de 22 pays, soit 42% d'étrangers participèrent au Congrès.

Au cours des années qui suivirent la première guerre mondiale de 1914-1918, alors que le développement des installations hydroélectriques prenait son plein essor, l'utilité d'un organisme s'intéressant spécialement à la construction des barrages se fit de plus en plus évidente.

Dans les années 1925 et 1926, au cours de différents congrès, fut émis le vœu de constituer un organisme international. Ce vœu fut repris au Congrès de la Conférence Mondiale de l'Énergie (C.M.E.) qui eut lieu à Bâle en 1926, étant entendu, en principe, que la France prendrait l'initiative de cette création.

La C.I.G.B. fut définitivement constituée le 6 juillet 1928, à Paris, à l'occasion du Congrès de l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Énergie Électrique, à laquelle étaient représentés : les États-Unis, la Grande-Bretagne, l'Italie, la Roumanie, la Suisse et la France.

La Commission prit le titre de Commission internationale des grands barrages de la Conférence mondiale de l'énergie à Berlin en 1930.

Aux termes des Statuts, l'objet de la Commission, est de « provoquer les progrès dans l'étude, la construction, l'entretien et l'exploitation des grands barrages, en rassemblant les renseignements à ce sujet et en étudiant les questions qui s'y rapportent ».

La CIGB s'acquitte de cette mission principalement par la réunion tous les trois ans de Congrès Internationaux où sont discutés, par les spécialistes en la matière, les problèmes relatifs à la construction des grands barrages qui paraissent les plus importants.

L'ordre du jour de chaque congrès comprend quatre questions principales qui font chacune l'objet de rapports particuliers et d'un rapport général. En outre, les participants peuvent adresser des communications sur toute autre question qu'ils jugeraient intéressante.

Les rapports qui doivent être étudiés au cours de chaque congrès sont distribués à l'avance aux participants et analysés, question par question, dans un rapport général.

Les Comptes rendus édités après chaque Congrès représentent à ce jour près de cent volumes et de 50 000 pages.

Des Bulletins techniques ou recommandations, sont le fruit de groupes de travail. Ils constituent un exemple remarquable d'échange technologique et de capitalisation de l'expérience. En 2009 ils sont au nombre de 132.

Parmi les autres fruits de ce travail collectif, on retiendra le Registre mondial des barrages dont la compilation a été entreprise en 1938, disponible désormais en tableaux Excel, et Les leçons tirées des accidents de barrages⁷⁰ après une enquête mondiale en 197?

Trois ingénieurs français ont présidé cette commission. Le premier, Eugène Mercier de 1933 à 1936, puis André Coyne de 1946 à 1952 (2 mandats), et enfin Pierre Londe de 1979 à 1982.

Les voyages d'études

Il est difficile de les traiter à part car ils irriguent toutes les circulations dont il a été question. On peut souligner comme les barrages, qu'ils remontent à la nuit des temps. Les exemples de voyages et de transferts technologiques concomitants sont innombrables. Ils sont à l'origine de très nombreuses publications. Quand ils n'ont pas fait l'objet de relation, on en trouve la trace dans telle ou telle innovation lorsqu'on remonte à l'origine. Les voyages en Angleterre, puis aux États-Unis se multiplièrent tout au long du XIX^e siècle, et aussi en Espagne et en Allemagne. Ces voyages quel que soit le statut du voyageur, élève, ingénieur en mission pour sa société, son service ou mandaté par le gouvernement, ont fait l'objet de relations bien conservées pour la plupart. On y a fait allusion tout au long des pages précédentes.

La réglementation

Elle constitue une forme de recueil et de transmission du savoir, au risque de bloquer son évolution et de figer en dogme des vérités qui peuvent n'être que partielles. Elle doit être révisée régulièrement ce que montre d'ailleurs la succession de circulaires ministérielles relatives à la surveillance des barrages, ces dernières années, enrichies de l'expérience accumulée, à l'intérieur et à l'extérieur des frontières.

Au fil des années, elle s'est faite plus contraignante et précise, le thème de la sécurité étant prégnant dans notre société moderne. Mais avant de prévoir

le pire, il s'agit de l'éviter en entretenant au mieux les structures existantes. C'est bien là, la grandeur et la servitude de la surveillance des barrages : rester aux aguets en permanence pour que rien n'arrive, alors que rien ne se passe.

Conclusion

Un barrage est probablement l'ouvrage d'art par excellence, le plus complexe, à la fois objet technique et monument.

Les barrages existant sur le territoire français et les aménagements hydrauliques dont ils sont un des maillons essentiels, constituent un patrimoine économique, technique, monumental et environnemental. Ce patrimoine exceptionnel est vivant, profondément inséré dans le territoire, l'économie et la société. Il évolue en fonction des finalités qu'il satisfait. Sa conservation, son adaptation et son entretien requièrent des moyens techniques et économiques conséquents. Si son développement en France est limité par différentes contraintes, il n'en est pas de même dans le monde.

L'histoire de ces ouvrages est une donnée fondamentale, y compris dans le domaine technique. Elle nous renseigne sur les raisons de leur existence, dont certaines devenues évidentes ne sont plus explicites. Au plan technique, elle participe à leur connaissance physique en vue d'une meilleure gestion. Sa

⁷⁰ *Registre mondial des barrages, op.cit. Leçons tirées des accidents de barrage, Commission internationale des Grands Barrages, Paris, 1974, 1 vol, 1069 p, réédité et mis à jour en 2001.*

transmission importe au plus au point pour la sécurité des barrages.

La connaissance technique et scientifique de ce type d'ouvrage participe d'une démarche collective internationale de type expérimental qui s'inscrit dans la durée. Nous espérons en avoir donné des exemples convaincants. Bien que nous ayons précisé que nous allions nous en tenir aux barrages en France, les références à des expériences étrangères ont émaillé le récit que nous avons fait. Chaque nouvel apport naît d'un progrès précédent. Ce qui est vrai pour le progrès scientifique et technique, est vrai aussi pour la naissance et l'élaboration des ouvrages eux-mêmes. Un barrage est le produit d'une méthode par approximations successives, qui est peut-être la meilleure à la fois pour trouver la bonne solution technique et la faire accepter par tous les acteurs concernés. Suivant l'échelle adoptée et l'angle d'observation, les auteurs d'un barrage et plus encore d'un aménagement sont nombreux. Personne ne peut se prévaloir d'être le père unique d'un ouvrage.

Le rôle des barrages dans la gestion de l'eau dans le monde reste essentiel⁷¹. On a souligné l'importance de l'hydroélectricité en France. Si cette finalité a perdu de sa priorité dans les raisons de construire pour aujourd'hui, le capital existant demeure un atout qu'il faut préserver.

L'hydroélectricité représentait encore 95% des énergies renouvelables en France en 2008. Préserver la biodiversité et les ressources naturelles, peut mettre

en cause le développement et le bon fonctionnement des aménagements hydroélectriques, comme le soulignait le rapport Dambrine⁷² en 2006. L'effacement préconisé à ce jour d'ouvrages pour faciliter la migration des poissons se limite à peu de chose et le développement de l'hydroélectricité est préconisé non seulement par le suréquipement des ouvrages existants mais aussi par l'addition de nouveaux usages en dehors de la production d'énergie, et enfin par la réalisation de nouveaux barrages pour autant qu'ils ne contrarieraient pas les efforts en faveur de la biodiversité.

Il est vrai que plus d'un siècle après ses premiers développements, l'énergie hydroélectrique n'a rien perdu ni de son intérêt économique ni de ses avantages dans le domaine environnemental. L'hydroélectricité est en effet un des moyens de valorisation des énergies renouvelables à production intermittente comme l'éolien ou le photovoltaïque, qui sont en cours de développement. A partir de l'eau stockée dans les retenues, son délai de mobilisation de production est de l'ordre de quelques minutes. Le stockage d'énergie par pompage (STEP) est le seul moyen confirmé de stockage de l'énergie électrique. Des solutions originales dans ce domaine sont en cours d'élaboration pour lever les objections contre leur implantation sur le territoire. C'est aussi le champ de la mise en œuvre de très hautes technologies, ce qu'ont oublié ses détracteurs et une partie du grand public.

Le barrage qui retient l'eau stockée, est donc la structure dont la pérennité

importe, tant pour les ouvrages existants que ceux qui seront nécessaires dans l'avenir pour atteindre les objectifs fixés d'énergie renouvelable. Ceci explique que l'attention des politiques et du public soient concernée par les questions de sécurité. Ce domaine spécifique qui renvoie à la nature et aux données techniques des barrages est l'objet de tous les soins des ingénieurs. La surveillance des structures à très longue durée de vie, relève d'une pratique obscure qui requiert une grande maîtrise technique et beaucoup d'abnégation. Elle au cœur de la méthode expérimentale. Le savoir accumulé sur un barrage particulier dans le cadre de la surveillance, doit être l'objet de tous les soins pour sa conservation et sa transmission, non seulement à travers des documents mais par les hommes dont la capacité d'observation est irremplaçable.

L'auteur remercie vivement M. Pierre Duffaut pour son assistance durant l'élaboration de cet article, la rédaction de plusieurs des annexes et la relecture de l'ensemble de la publication.

⁷¹ *Commission internationale des grands barrages, Les barrages et l'eau dans le monde, Paris, 2008, 63 p.*

⁷² *F. Dambrine, Sur les perspectives de développement de la production hydroélectrique en France, ministère de l'Économie et des Finances, la Documentation française, mars 2006, 55 p.*

Annexe 1

Marèges cinq innovations majeures¹



Marèges (1935)

C'est dans le cadre de la construction du barrage de Marèges (1930-1935), alors plus haut barrage voûte à double courbure d'Europe (90m), qu'André Coyne devait mettre en œuvre un ensemble d'innovations, intégrant tous les progrès faits dans la fabrication des bétons, celle des aciers à haute résistance, ou les progrès dans les essais sur modèle hydraulique. Le barrage de Marèges :

1. L'encastrement du pied des consoles de la voûte à double courbure a été réduit par un amincissement du côté amont. La stabilité à vide de chaque plot a été assurée par un calage contre le rocher et des béquilles dans le fond de la vallée. Nul doute que ce barrage

en carène, appuyé sur des béquilles semblables à celles dont sont munies à l'échouage les barques de pêche, n'ait subi l'influence de l'expérience antérieure d'André Coyne qui débuta sa carrière au Port de Brest.

- 2.** Il mit dans cette voûte novatrice le second système d'auscultation par témoins sonores (brevet Coyne).
- 3.** Il imagina pour évacuer les crues le saut de ski (brevet Coyne) : Le déversoir de la rive droite permettait de lâcher pour la première fois un jet à 40 m au-dessus du lit de la rivière par un tremplin encore horizontal, qui fut relevé dans les solutions ultérieures comme au barrage de l'Aigle.
- 4.** Il utilisa une des toutes premières fois des tirants à grande capacité (brevet Coyne) pour assurer la stabilité de la culée poids en rive droite.
- 5.** La coupure de la rivière se fit à l'aide de grands gabions lestés en charpente métallique et grillage, surmontés ensuite d'enrochements au talus amont raidi verticalement grâce à des tirants internes (technique dite du mur à échelle, brevetée précédemment par André Coyne) ; l'emprise de ce batardeau déversant amont fut réduite.

Le barrage s'insère particulièrement bien dans un site étroit où l'épanouissement de la vallée à l'aval a permis d'implanter l'usine, et beaucoup plus tard une 2^e usine de suréquipement.

Le rocher en fond de vallée, enfoui depuis des dizaines de milliers d'années sous 12 mètres d'alluvions, était dans un tel état de fraîcheur et rendu tellement irrégulier par la présence de marmites d'érosion qu'on n'hésita pas à y fonder

directement le barrage sans même le pêtarder en surface.

L'implantation du barrage ayant été fixée avec certitude à quelques mètres près grâce aux sondages de reconnaissance, les galeries de dérivation provisoire furent très courtes d'autant plus que pour les raisons suivantes. Le pied aval du batardeau amont ainsi constitué était tenu par une voûte en béton très tendue à caractère expérimental. On imposa pour la première fois des bétons plastiques qui furent mis en place par tapis puis compactés à l'aide de vibrateurs de surface et de pervibrateurs aiguilles.

La mise en eau se déroula sans incident en 1935 et les fuites du barrage furent pratiquement nulles.

Cet ensemble de qualité a justifié que le CFBR fasse le choix de Marèges pour une présentation d'un barrage aux élèves ingénieurs à l'automne 2009.

¹ Dumas J., « L'aménagement de la chute de Marèges sur la Dordogne », *Le Génie civil*, 54^e année, Tome CV, n°1, juillet 1934, p1-10.
Coyne A. et Bidault des Chaumes A., « Le barrage et la centrale électrique de Marèges sur la Dordogne », *Le Génie civil*, 55^e année, Tome CVII, n°17, octobre 1935, p 385-394.

Annexe 2

MALPASSET **et la naissance** **de la mécanique** **des roches**

Les pratiques concernant les travaux au rocher, en surface et en souterrain, ont été développées de façon empirique par les carriers et les mineurs au long des siècles passés ; quant aux constructeurs, le « roc » était pour eux une fondation toujours convenable contrairement au « sol » menacé d'affaissement, d'érosion, parfois de rupture. La distinction entre sol et roc reposait sur des critères de bon sens qu'on n'a toujours pas réussi à préciser d'une façon partout valable, tellement la nature présente de cas particuliers. « Quand on peut fonder un bâtiment directement sur le roc massif à une profondeur permettant l'exécution économique des travaux, la conception des fondations s'en trouve grandement simplifiée » (Conseil national de la recherche canadien) ; *(voir aussi annexe 1 Marèges)*.

Les propriétés des roches extraites des carrières étaient limitées aux demandes des constructeurs (aptitude du matériau au façonnage et possibilités d'utilisation) ; les catalogues des carrières françaises donnaient la densité, la résistance à la compression, la gélivité, parfois la remontée capillaire, et spécifiaient les usages suivant notamment le contact

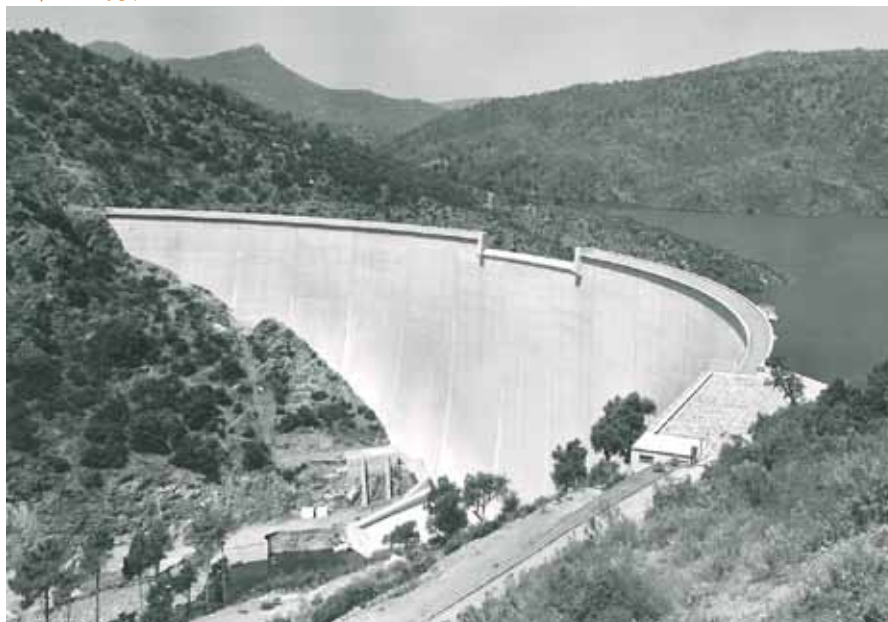
avec le sol et l'exposition à la pluie). Les structures naturelles du terrain peuvent jouer un rôle considérable tant sur l'extraction et la préparation des pierres de construction que sur la façon de les disposer. Ainsi certains terrains sédimentaires diaclasés fournissent directement des pierres utilisables pour monter des murs, et si le maçon les superpose en lits superposés comme le carrier les a trouvés, il sait donner aux lits une parfaite horizontalité et il décale les joints verticaux et pour la meilleure stabilité.

La rupture du barrage de Malpasset, le 2 décembre 1959, a mis en lumière l'insuffisance des connaissances et pratiques dans ce qu'on n'appelait pas encore « mécanique des roches », alors que la « mécanique des sols » avait déjà acquis ses lettres de noblesse à partir

de travaux anciens de Vauban, Coulomb et Collin notamment et surtout grâce à l'impulsion décisive de Karl Terzaghi. Le premier ouvrage intitulé Mécanique des roches est publié en français par l'ingénieur d'EDF Joseph Talobre en 1957 ; il sera d'ailleurs remanié en 1966, sous l'influence directe de la catastrophe. Au lendemain de la rupture des fondations de Malpasset, un grand nombre d'études ont été lancées, mobilisant l'ensemble de la communauté intéressée, dont notamment quatre thèses patronnées par le Bureau Coyne et Bellier.

L'échelle spatiale des comportements et donc des descriptions est apparue comme un élément primordial : La construction sur les pentes de bâtiments, piles de ponts et barrages, le creusement des tunnels profonds et le

Malpasset 1954



comportement des versants instables ont amené les ingénieurs à passer du matériau de construction au terrain naturel « en place » (ou in situ), en tenant compte des multiples structures géologiques formées à plus grande échelle par des surfaces de séparation plus ou moins apparentes, modifiant profondément les déformabilités et les résistances mesurées sur échantillons (joints de stratification des roches sédimentaires, diaclases des roches ignées, failles tectoniques) : cette échelle de prise en compte, proposée par les géologues autrichiens, a été appelée « massif rocheux » (rock mass en anglais, Gebirge en allemand), le mot roche ou parfois « matrice rocheuse » étant utilisé à l'échelle de l'échantillon ou du « bloc » situé entre les surfaces (rock ou rock matrix, Gestein). Des études sur modèle physique et/ou mathématique ont montré par exemple que le « bulbe de contrainte » sous une charge ne se diffuse pas aussi largement dans une structure feuilletée mais peut gagner beaucoup en profondeur.

Le rôle mécanique de l'eau sur le comportement du massif rocheux, qu'il soit à l'état naturel ou modifié par des interventions humaines (barrage d'une vallée, tunnel sous nappe, drainage de versants) est le deuxième facteur reconnu comme crucial. Ce rôle procède de l'élargissement du concept de sous-pression mis en évidence par Maurice Lévy en 1895 après la rupture du barrage de Bouzey, près d'Epinal. Le corps des barrages poids et leur terrain de fondation étaient depuis munis de systèmes de drainage, mais la pratique n'avait pas été étendue aux barrages dont la minceur donnait peu de prise à cette force de soulève-

ment. Or elle s'exerce aussi au sein du terrain de fondation et, dans la plupart des cas, la sous-pression est une force significative à côté du poids propre et des charges imposées par des bâtiments et des barrages, si aucun drainage n'est mis en place pour la réduire. Pierre Londe a étudié les conséquences mécaniques de l'écoulement d'eau dans les fractures et il a proposé dès 1965 un abaque pour discuter l'équilibre d'un bloc rocheux tétraédrique en fonction des coefficients de frottements et des sous-pressions sur trois faces, la quatrième étant à l'air libre et recevant les poussées d'un réservoir et d'un barrage, ou au choix d'un bâtiment ou d'une pile de pont.

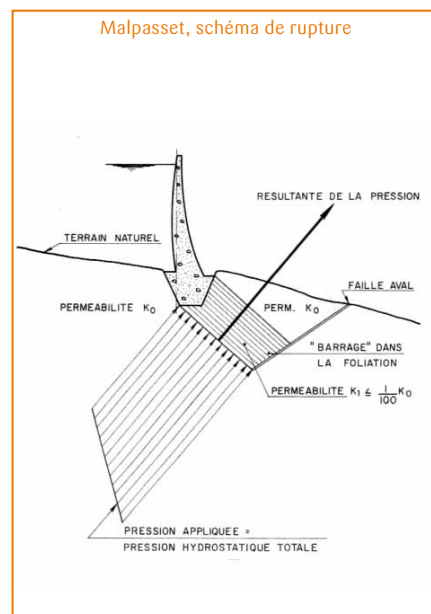
Au laboratoire de nouveaux essais ont été développés, dont le fluage, le cisaillement, la variation de perméabilité sous contrainte (déterminante à Malpasset), et un essai de résistance a été rendu possible sur le terrain grâce à un appareil portable agissant sur des échantillons tout venant, sans carottage ni surfaçage.

Sur le terrain, outre la mise en œuvre systématique de méthodes d'essai déjà connues comme l'essai « au vérin » de poinçonnement en surface, l'essai de cisaillement, la caverne en pression, et de méthodes nouvelles comme l'essai de compression radiale en forage (à la manière du pressiomètre) dont l'échelle reste inférieure au mètre, la mesure des propriétés du massif rocheux aura recours surtout à des méthodes géophysiques globales (basées sur la transmission d'ondes), complétée par l'étude au laboratoire des surfaces de séparation (l'essai de cisaillement étant peu sensible à l'échelle), et surtout par la me-

sure géodésique des déformations sous l'influence des conditions naturelles ou imposées ; les structures bâties sur le sol, dont les barrages, sont d'excellents témoins des déformations du terrain. L'auscultation des ouvrages et les méthodes de calcul sont apparues complémentaires, et donc inséparables.

Ainsi, les recherches en vue de comprendre la rupture de Malpasset ont donné en moins de dix ans une impulsion essentielle à la Mécanique des roches telle qu'on la connaît quarante ans plus tard.

Références : Londe, P. 1965, Une méthode d'analyse à trois dimensions de la stabilité d'une rive rocheuse, Ann. Ponts et Chaussées, 135 (1), 37-60.



Annexe 3

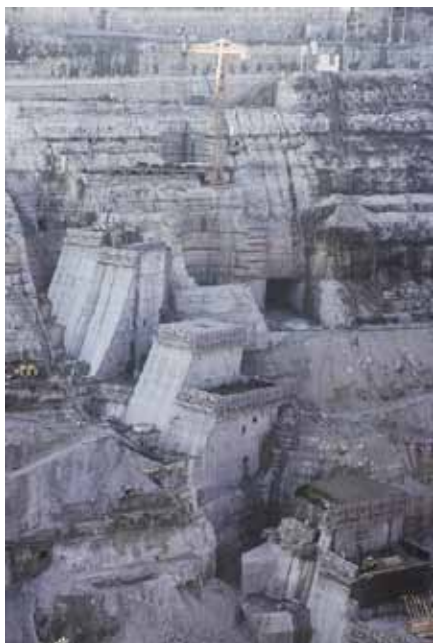
La mécanique

des roches

au barrage de Vouglans

Cadre topographique et géologique

Mis à l'étude à partir de 1956 et construit de 1963 à 1968, ce barrage voûte a bénéficié des premiers enseignements de la rupture du barrage de Malpasset, ainsi que des acquis alors les plus récents de la mécanique des roches, ce qui lui vaut cet encadré.



Vouglans

Issue d'une source vaclusienne à 700 m d'altitude, la rivière d'Ain coule vers le sud pour rejoindre le Rhône en amont de Lyon ; à partir des rapides du Saut de la Saisse, elle s'encaisse dans les plateaux calcaires en une vallée étroite et sinueuse profonde d'environ 200 m..

Le site du barrage a été choisi dans un tronçon rectiligne. Le rocher est masqué au pied de la rive gauche par un remplissage fluvio-glaciaire, le lit rocheux (bed rock) étant 30 m plus bas que le lit actuel de l'Ain.

Les versants montrent une succession de bancs calcaires massifs presque horizontaux, de 2 à 15 m d'épaisseur, recoupés par quelques grandes diaclases verticales, obliques sur l'axe de la vallée. La structure du massif rocheux, remarquablement simple et symétrique, n'a pas nécessité l'usage de relevés ni de diagrammes statistiques.

Les caractéristiques du barrage voûte sont indiquées tableau 5 :

La courbure des arcs supérieurs diminue au voisinage des appuis suivant un tracé parabolique en raison de la grande largeur. La crue de projet, 2050 m³/s, est évacuée pour l'essentiel par des pertuis vannée en surface. Les puits de prise d'eau, les galeries en charge et l'usine sont en souterrain en rive droite.

Pour fonder le barrage au rocher, l'excavation des terrains meubles a été faite à l'intérieur d'une fouille blindée en béton, circulaire en plan, formant ensuite un bassin d'amortissement pour les jets des évacuateurs de crue.

Le voile d'injections est incliné vers l'amont, et suivi d'un voile de drainage ;

des interventions ultérieures sont possibles grâce à une galerie « périmétrale » (voir figure plus loin).

Reconnaitances : Une galerie a vérifié la continuité du rocher sous la terrasse rive gauche, à la cote 340, où elle a attiré l'attention sur un joint stylolithique particulier ; en effet sur une épaisseur d'environ 2 cm, son « remplissage » marneux contient 10 à 15 % de montmorillonite gonflante et a justifié les essais mentionnés ci-dessous.

Essais classiques sur échantillons : pas d'anisotropie en module ni en résistance, un effet d'échelle très modéré (σ_c varie de 110 à 90 MPa quand le diamètre passe de 36 à 145 mm).

Essais sur le terrain, d'abord à la plaque, ensuite en forages, avec deux dilatomètres dont celui qui venait d'être mis au point à EDF, complétés par un essai original au vérin plat (mesure au centre du vérin).

En conclusion le terrain de Vouglans est apparu le moins déformable des sites étudiés, ainsi que le plus homogène ; et on a retenu pour le calcul du barrage un module du massif du même ordre que celui du béton.

Essais sur le joint argileux : des carottes ont été prélevées à cheval sur le joint, au diamètre 250 mm, et placées dans une boîte de cisaillement sur une machine construite spécialement pour la mécanique des roches (forces normale et tangentielle de 500 kN, surface maximale cisailée 400 x 600 mm (0,24 m²).

En complément on a réalisé en souterrain un essai à grande échelle sur une superficie cisailée de 4,4 m².

Les résultats des essais mettent en évidence des variations de cohésion suivant la déformation et l'échelle (carottes, essai in situ) mais que le frottement n'est pas sensible à l'échelle.

Calculs

La méthode proposée par P. Londe a été appliquée à la stabilité au glissement d'un grand bloc rocheux tétraédrique reposant sur le joint 340 et limité par deux diaclases verticales obliques.

Les calculs ont montré qu'en l'absence de drainage, les pressions de l'eau sont du même ordre que le poids ; ce sont donc elles qui commandent l'équilibre. C'est seulement sur des blocs plus petits que la poussée de la voûte devient prépondérante par rapport au poids du bloc. L'intérêt de cette analyse est de pouvoir faire varier les facteurs dans des plages très étendues. On comprend aussi que cette approche met en évidence les facteurs les plus lourds et permet de les traiter en priorité.

Drainage

Le drainage d'ensemble est assuré par un «voile» formé de forages reliant des galeries horizontales, placé à l'aval du voile d'étanchéité (*figure ci-contre*).

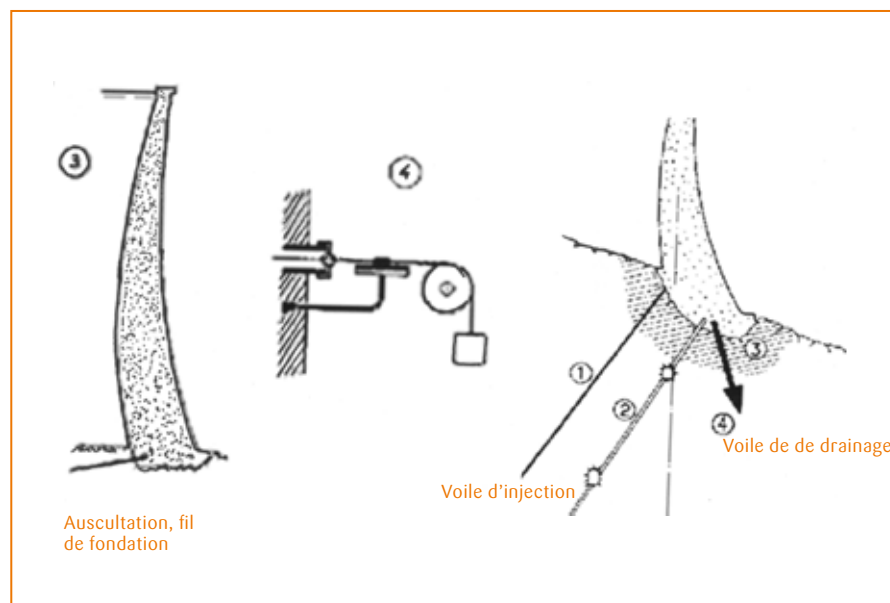
Auscultation

En sus des dispositifs habituels (300 «témoins sonores», 5 lignes de pendules, de nombreux piézomètres et des voyants topographiques), des «fils de fondation» (*figure ci-contre*) de 5 à 18 m ont été

placés en 9 points à partir de la galerie périmétrale pour mesurer l'extension du massif rocheux au pied amont du barrage. Ce dispositif expérimental a fonctionné pendant la mise en eau, montrant que l'extension (quelques millimètres) était localisée dans les 5 à 6 mètres de rocher proches du béton.

Sources : Congrès CIGB d'Istanbul, Q 32 R 49, pp. 793-818, 1967.

Congrès CIGB de Montréal, Q 38 R 49, pp. 935-960, 1970.



Annexe 4

André Coyne



André Coyne est né le 10 février 1891 à Paris¹. Engagé volontaire le 1^{er} octobre 1910, il entre à l'École polytechnique en octobre 1911, dont il sortit en octobre 1913. Sous-lieutenant de réserve du Génie au 5^e régiment du génie en octobre 1913, il fut nommé élève ingénieur à l'École des ponts et chaussées, le 1^{er} octobre 1914. Mais mobilisé en août 1914, il participa à la campagne contre les puissances centrales, d'abord comme officier du génie puis comme pilote aviateur à partir du 16 mai 1917, (détachement à l'aéronautique) dans l'armée d'Orient puis l'armée du Danube. Il fut décoré de la Croix de guerre avec 3 citations, de la Distinguished Flying cross, de la Valeur Italienne. Il fut nommé chevalier

de la Légion d'honneur à titre militaire le 16 juin 1920.

Cette expérience d'aviateur qui exige courage détermination, pour dominer la solitude, et faire corps avec un appareil technique au cœur d'éléments naturels dans lequel il vole, a certainement marqué durablement son comportement. Après être retourné à l'École des ponts et chaussées en 1919, il est affecté en avril 1920 au service maritime à Brest (ports, phares et balises). Il va très rapidement marquer cette période par son intervention dans les projets et réalisations suivantes : Cale du Moulin à mer (1927), construction de terre-plein à l'est de la jetée de l'Est avec réalisation de murs à échelle (1928, brevets Coyne), consolidation du phare de la jument d'Ouessant, pont sur l'Elorn (Entreprise Limousin E. Freyssinet). Il fut nommé membre de la commission des barrages de grande hauteur du Conseil général des ponts et Chaussées en 1924.

Nommé chef du service spécial d'aménagement de la Haute-Dordogne avec résidence à Paris le 15 juin 1928 (prise de poste le 1^{er} juillet 1928) en remplacement de Maurice Degove décédé (1887-1928), il quittera la Bretagne et la mer non sans regret et appréhension.

On a raconté sa réussite en Dordogne, la création du service technique des grands barrages. Son intégration dans les organisations internationales se fit rapidement. Vice-président de la CIGB en 1936, rapporteur général aux deux premiers congrès de 1933 et 1936, il en fut le président de 1946 à 1952. Il fit partie du comité d'experts pour la surélévation du barrage d'Assouan dès 1937.

Pendant la seconde guerre mondiale, il fut un résistant aidant de jeunes ingénieurs ou des élèves ingénieurs fuyant la STO qui transformèrent des chantiers de barrage en bases du « maquis ».

Son comportement était tout entier tourné vers l'action. Il accordait la plus extrême importance aux conditions d'exécution comme cela ressort des comptes rendus de ses inspections. Dans l'éditorial du premier numéro du bulletin du service technique des grands barrages après avoir défini les conditions du travail à faire, il écrivait : «C'est à cette condition que nous pourrions constituer peu à peu en confrontant sans cesse les vues théoriques avec l'expérience un corps de doctrine large et souple, précis et vivant tout orienté vers l'action».

Nous avons dit plus haut sa démarche toute fondée sur l'observation des ouvrages, pour l'auscultation desquels il imagina le témoin sonore, produit de son esprit très inventif qui l'amena à déposer plus de 30 brevets.

En 1946, lors de la création d'EDF où il avait sa place, il préféra prendre le risque de créer un bureau d'études indépendant avec son gendre Jean Bellier qui le secondait depuis l'aventure de Marèges, quelques fidèles de cette époque et un groupe de tout jeunes ingénieurs embauchés au STGB pendant la guerre. C'est avec cette équipe qu'il continua l'œuvre qui donne son titre à cet encadré. Il préservait à travers la structure d'un cabinet indépendant, une liberté d'invention, de proposition et d'intervention en France et à l'étranger, qu'il n'aurait pas eu au

¹ Fichier Richard, ENPC.

sein d'une organisation plus importante et plus lourde.

Pendant les 13 ans qui suivirent, entouré d'une équipe particulièrement jeune à qui il donna l'occasion d'expériences exaltantes, avec de larges responsabilités, il accomplit une œuvre d'une dimension sans rapport avec le nombre de ses collaborateurs.

Pour sa fin de vie on ne peut faire mieux que de citer un de ses plus proches collaborateurs.

« Son existence exemplaire aurait mérité de s'achever dans la sérénité d'une vieillesse encore féconde. Mais la tragédie ravagea tout en moins d'un an. Miné soudain par la maladie, puis torturé par la catastrophe de Malpasset, André Coyne épuisa ses dernières forces à tenter d'en éclairer les causes et enjoignit à ses disciples d'arracher, lui disparu, à la Nature, après tant de confrontations réussies, son secret meurtrier. Ils y parvinrent en suivant les règles mêmes de son enseignement technique et moral et aidèrent ainsi la Science qu'il leur avait transmise à tirer un progrès de l'épreuve par un surcroît de connaissance et de sûreté pour l'avenir² ».

² L. Giuliani

Annexe 5

Alexandre Collin et les barrages de Bourgogne

Dans la première moitié du XIX^e siècle, en même temps que les questions d'étalement et d'équilibre des fondations, des ingénieurs avaient eu à traiter le problème de la stabilité des talus de déblais et remblais en terre. La construction des canaux et chemins de fer avait demandé d'importants travaux. Un remarquable ouvrage de synthèse a pour titre « Recherches expérimentales sur les glissements spontanés des terrains argileux »¹. Il fut publié à compte d'auteur avec l'aide de subventions de divers ministères, en 1846, après que deux projets de mémoire à l'Académie des Sciences en 1840 et 1844 et qu'une proposition d'article dans les Annales des Ponts et Chaussées en 1841 n'avaient pas pu être publiés en raison de problèmes éditoriaux, et des réticences de certaines autorités comme Poncelet. A. Collin (1808-1890), ingénieur des Ponts et Chaussées, fut en poste de 1832 à 1844 au canal de Bourgogne. Il a fait la synthèse des données et observations de ruptures survenues dans cinq digues, sept remblais de canaux, deux talus en déblais de route et 12 tranchées de canaux soit un total de vingt-six sites. Il avait été le témoin et l'acteur de l'analyse des causes et le projeteur des réparations sur six d'entre eux. Sur certains, il y avait eu non pas un, mais plusieurs glissements.

Il a réuni de précieuses observations sur le terrain, en notant les formes des glissements, leur position par rapport à différentes couches, les conditions dans lesquelles se sont produites les ruptures. Il s'est intéressé aux propriétés de l'argile en faisant des essais de cisaillement en laboratoire, en fonction de la teneur en eau et de la vitesse de sollicitation. Il a fait des remarques sur la stabilité à long terme et à court terme des talus. Sa démarche qui procède de la méthode inductive, s'appuie sur l'élaboration d'une théorie, à partir d'une analyse aussi rigoureuse que possible des observations sur le terrain. Dans un autre domaine, à Grosbois, dans le cadre de l'expertise des désordres ayant affecté le barrage, il a procédé en 1838 à des essais de chargement in situ des argiles de fondations du barrage pour estimer leur déformabilité. Dès 1833 au moyen de puits, il avait effectué un relevé pour la première fois, dans l'histoire du Génie civil, de la surface d'un glissement en rive gauche du même barrage. Il a réalisé un calcul inédit de stabilité du barrage de Grosbois après l'accident de 1838, en introduisant une sous-pression sous la fondation, qu'il fait varier dans un calcul de sensibilité, pour comprendre quel a été le type de rupture

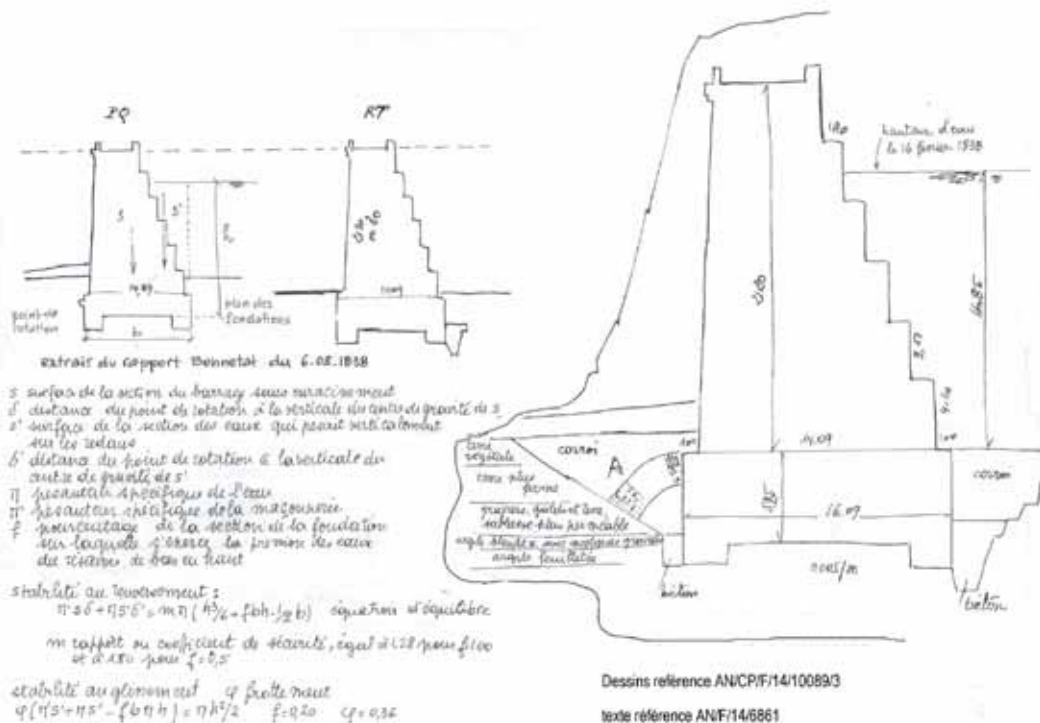
A la différence de beaucoup d'ingénieurs de son époque qui avaient tendance à prendre les problèmes en force, A. Collin avait compris qu'on ne pouvait pas s'opposer à un glissement qui a démarré, et que l'eau intérieure ou celle infiltrée à

¹ La valeur du travail de Collin ne fut pleinement reconnue qu'en 1946 par des chercheurs anglais dont A.W. Skempton qui fit traduire son œuvre en anglais.

partir des pluies était à l'origine de la plupart des sinistres par les modifications apportées au comportement de l'argile dans son ensemble.

Aussi distinguait-il sans les opposer les moyens répressifs et préventifs (réparation de l'accident et prévention) des moyens seulement préventifs combinant drainage et soutènement. Ces propositions s'appuyaient non seulement sur la forme des glissements, les conditions de survenance des accidents mais sur une analyse du comportement des matériaux

argileux qui le conduisait à privilégier le drainage en expliquant fort clairement les mécanismes. Comoy dans un très bel article publié dans les Annales des Ponts et Chaussées en 1875, illustre l'efficacité du drainage, à la fois à titre «préventif et répressif». Cette postérité de Collin a été réduite. Skempton y voit une des raisons de la stagnation du développement de la mécanique des sols et des ouvrages en terre au XIX^e et ce jusqu'au début du XX^e siècle.



Calcul de stabilité de Grosbois après l'accident de 1838

Bibliographie

On rappelle ici certains des ouvrages cités en note de pied, ainsi que d'autres pour approfondir la connaissance des barrages.

Histoire

- ★ **Architecture de l'électricité**, catalogue de l'exposition organisée en 1992, à l'espace Electra à Paris, Norma, Fondation Electricité de France, 1992, 173 p.
- ★ Bellier J., **Les Barrages**, collection Que sais-je, Paris, PUF, 1982, 126 p.
- ★ Bordes, J.L., **Les barrages-réservoirs en France du milieu du XVIII^e siècle au début du XX^e siècle**, collection Histoire et Techniques, Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 2005, 448 p.
- ★ Gérard P., **L'épopée hydroélectrique d'Electricité de France**, Association pour l'Histoire de l'électricité en France, 1996, 681 p.
- ★ **Histoire générale de L'électricité en France**, tome 1 : Espoirs et conquêtes 1881-1916, sous la direction de F. Cardot et F. Caron, Paris, Fayard, 1991, 1 vol, 999p, tome 2 : **L'interconnexion et le marché 1919-1946**, sous la direction de M. Lévy-Leboyer et H. Morsel, 1994, 1438 p, tome 3 : **une œuvre nationale de l'équipement 1946-1987** sous la direction de H. Morsel.
- ★ **Hydraulique et Electricité française**, numéro spécial de la Houille Blanche, 1951
- ★ Mary, M., **Barrages voûtes ; historique, accidents et incidents**, Dunod, Paris, 1968.
- ★ Schnitter, N.J., **A history of dams, the usefull pyramids**, Rotterdam, Balkema, 1994, 1 vol, 266 p.

★ Smith, N., **History of dams**, London, Peter Davies, 1971, 1 vol, 279 p.

Monographies

- ★ Langlois G.A., **Les lacs réservoirs du Bassin de la Seine : Pannecière, Somogy, éditions d'art, Paris, 2004, 126 p.**
- ★ **Le lac du Der Chantecoq**, Somogy, éditions d'art, Paris, 2004, 128 p.
- ★ **Le lac d'Orient**, Somogy, éditions d'art, Paris, 2004, 126 p.
- ★ **Le lac Amance**, Le lac du Temple, Somogy, éditions d'art, Paris, 2005, 96 p.
- ★ **La Houille Blanche**, numéros spéciaux sur Bort-les-Orgues (1953), Donzère-Mondragon (1955), Tignes (1958), Génissiat (1973).
- ★ Laurenceau J. N., **Histoire des usines hydroélectriques de la SNCF et de ses filiales et des relations SNCF-EDF**, mars 1987, 36 p.
- Ravel E., Ortega N., **Eaux fortes pour un barrage, le barrage du Gouffre d'Enfer à Saint-Etienne**. *Saint-Etienne, Edelgé, 2007, 231 p.*
- ★ Varaschin D., **Tignes, la naissance d'un géant**, *Presses de l'Université d'Artois, Arras, 2002, 230 p.* ★

Iconographie :

J.L. Bordes, Coyne et Bellier et P. Duffaut.

« pour mémoire »
la revue du Comité d'histoire

rédaction ★ Tour Pascal B 20.20

92 055 La Défense Cedex

téléphone : 01 40 81 36 75

télécopie : 01 40 81 23 24

comite.histoire@developpement-durable.gouv.fr

fondateurs de la publication ★ Pierre Chantereau et Alain Billon

directeur de la publication ★ Louis-Michel Sanche

rédacteur en chef ★ Alain Monferrand

suivi de fabrication ★ Catherine Raby

conception graphique ★ Éric Louis

réalisation graphique ★ Annick Samy

ISSN ★ 1955-9550

impression ★ **couverture** ★ Richard Roussel

Intérieur ★ SG/SPSSI/ATL 2/Repro